



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

**Análisis de los parámetros del proceso de
impresión 3D FGF. Aplicación a la
fabricación de mobiliario.**

Autor:

Mansilla Boyano, Pablo

Tutora:

**Martínez García, María del Henar
Dpto: Química orgánica**

Valladolid, mayo de 2023.

RESUMEN

El presente trabajo Fin de Grado abordará el estudio y análisis de los principales parámetros de operación (temperaturas de impresión, velocidades del husillo y del pórtico, sistema de refrigeración, etc) del proceso de fabricación aditiva denominado extrusión aplicada a la impresión 3D a partir de una tecnología emergente por medio de pellets: "Fused Granulated Fabrication (FGF)".

En este proyecto se llevará a cabo la impresión de probetas modificando los parámetros de impresión. El seguimiento de las temperaturas durante la impresión de éstas se realiza por medio de una cámara termográfica. Posteriormente serán analizadas por medio de ensayos a flexión en 3 puntos con el objetivo principal de conocer el comportamiento de la adhesión entre las capas sucesivas de material además de la calidad final de la pieza.

Finalmente se realizó la fabricación de mobiliario infantil a partir de los parámetros óptimos de impresión, fomentando la economía circular ya que se trata de materiales reciclados o reciclables.

PALABRAS CLAVE: Extrusión – Plástico - FGF – Sostenibilidad – Impresión 3D.

ABSTRACT

This Final Degree work will address the study and analysis of the main operating parameters (printing temperatures, screw and gantry speeds, cooling system, etc.) of the additive manufacturing process called extrusion applied to 3D printing from an emerging technology: "Fused Granulated Fabrication (FGF)".

In this project, the printing of test specimens will be carried out by modifying the printing parameters. The monitoring of the temperatures during the printing process will be carried out by a thermographic camera. Subsequently, they will be analyzed by means of flexural tests in 3 points with the main objective of knowing the behavior of the adhesion between the successive layers of material as well as the final quality of the piece.

Finally, the manufacture of children's furniture was carried out based on the optimal printing parameters, promoting the circular economy since the materials used are recycled or recyclable.

KEY WORDS: Extrusion - Plastic - FGF - Sustainability - 3D printing.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
CAPÍTULO 1: ESTADO DE LA TÉCNICA	4
1.1. EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	4
1.2. TIPOS DE EXTRUSORES [6]	5
1.3. COMPONENTES DEL EXTRUSOR [6]	6
1.3.1. Tolva de alimentación y garganta.	6
1.3.2. Tornillo sinfín o husillo.	8
1.3.3. Cilindro o barril.	9
1.3.4. Boquilla o matriz de salida.	10
1.3.5. Motor [6].....	10
1.4. VARIABLES DESTACABLES DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN	11
1.4.1. Presión de fusión.....	11
1.4.2. Temperatura de fusión	12
1.5. PROPIEDADES DE LOS PLÁSTICOS EN EXTRUSIÓN	13
1.5.1. Clasificación de los plásticos	13
1.5.2. Reología de los polímeros	15
1.5.3. Viscosidad	16
1.5.4. Índice de fluidez (MFI) [7]	17
1.6. IMPRESORAS 3D CON EXTRUSOR DE PELLETS	22
1.6.1. PIOCREAT 3D [9].....	22
1.6.2. WASP [10]	24
1.6.3. Re:3D [11]	25
1.6.4. Juggerbot 3D [12] [13]	26
1.6.5. SCULPTUR [14]	27
CAPÍTULO 2: PROCESO Y ANÁLISIS FGF	28
2.1. EQUIPOS UTILIZADOS.....	31
2.1.1. Máquina de secado: Airid Polymer Dryer [7] [20]	32
2.1.2. Tumaker BIG FOOT PRO-500 - DUAL DIRECT DRIVE – PELLET	35
2.2. PARÁMETROS PRINCIPALES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO.....	46
2.2.1. Parámetro E	46
2.2.2. Dimensiones del cordón: anchura y altura de capa [17]	48
2.2.3. Temperaturas de extrusión.....	50

2.2.4. Velocidad del pórtico o velocidad de la herramienta [17].....	51
2.3. CALIBRACIÓN DEL CAUDAL	52
2.3.1. Análisis de los resultados	56
CAPÍTULO 3: ENSAYOS MECÁNICOS	62
3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	63
3.1.1. Principio del método [38]	67
3.1.2. Esfuerzo de flexión.....	67
3.1.3. Deformación en flexión.....	68
3.1.4. Preparación de la probeta en el banco de ensayos	68
3.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	70
3.2.1. Modificación del parámetro “E”	71
3.2.2. Modificación del ventilador de capa.....	73
3.2.3. Modificación de las temperaturas de impresión	75
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES	78
CAPÍTULO 5: PROTOTIPOS DEMOSTRADORES Y LÍNEAS FUTURAS	79
5.1. PROTOTIPOS DEMOSTRADORES	79
5.2. LÍNEAS FUTURAS	82
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA	84
CAPÍTULO 7: ANEXOS	91
ANEXO 1 – FICHA TÉCNICA DE DATOS (TDS) DEL MATERIAL: UPM FORMI 3D 20/19 ..	92
ANEXO 2 – RECOPIACIÓN DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL CAUDAL.....	93
ANEXO 3 - FICHA TÉCNICA DE DATOS (TDS) DEL MATERIAL: PELLET PET-G	95
ANEXO 4 – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CÁMARA INFRARROJA OPTRIS Xi 400	96
ANEXO 5 – DATOS RECOPIADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN: LOTES 1 Y 4	97
ANEXO 6 – DATOS RECOPIADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN: LOTES 2 Y 8	100
ANEXO 7 – DATOS RECOPIADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN: LOTES 11 Y 12	103

Índice de figuras

Figura 1: Comparativa entre la economía circular y la economía lineal. [2]	2
Figura 2: Tecnología FFF. [Fuente propia]	3
Figura 3: Tecnología FGF. [Fuente propia]	3
Figura 4: Esquema de las etapas del proceso FGF que se va a llevar a cabo. [Fuente propia]	4
Figura 5: izquierda: Extrusor de un solo tornillo; derecha: extrusor de doble husillo. [6]	5
Figura 6: Extrusor de pistón.[6]	6
Figura 7: Esquema de los principales componentes de un extrusor monohusillo o de un solo tornillo de escala industrial. [5]	6
Figura 8: Comparativa de un buen diseño de tolva (izqda) y un mal diseño (dcha).[6]	7
Figura 9: Geometría deseada para la zona de apertura de la garganta de alimentación.[6]	7
Figura 10: Garganta de entrada de los pellets a la zona de extrusión. [Fuente propia]	7
Figura 11: Sistema vibratorio para evitar cohesiones. [7]	8
Figura 12: Tipos de cohesión más comunes. [7]	8
Figura 13: Husillo de un solo tramo y sus diferentes partes.[6]	8
Figura 14: Barril con ventilación y husillo de dos etapas.[6]	9
Figura 15: Zonas de calentamiento y enfriamiento en el sistema de extrusión.[6]	10
Figura 16: Efecto de la variación de la presión en la entrada de la matriz en la variación dimensional de material extruido. [6]	11
Figura 17: Ejemplo de sistema de control de la presión en la boquilla.[6]	12
Figura 18: Transductor de presión.	12
Figura 19: Tipos de sondas de temperatura. [6]	12
Figura 20: Seguimiento de la temperatura de extrusión en tiempo real a través de una cámara infrarroja. [Fuente propia]	13
Figura 21: Estructura química del propileno (izqda) y del polipropileno (dcha) como resultado de la polimerización.[8]	14
Figura 22: Estructura de un polímero amorfo.[8]	15
Figura 23: Estructura de un polímero semicristalino.[8]	15
Figura 24: Velocidad de cizalla en función de la densidad.[8]	17
Figura 25: Esquema simplificado de un reómetro capilar.[6]	17
Figura 26: Efecto de la temperatura en los plásticos semicristalinos y amorfos.[6]	18
Figura 27: Impresora 3D Piocreat G5 Industrial FGF Pellets 3D Printer.[9]	23
Figura 28: Impresora 3D FGF Pellet ·D Printer G12 Piocreat.[9]	24
Figura 29: Impresora 3D Delta WASP 3MT Industrial 4.0.[10]	25
Figura 30: Impresora 3D GigabotX 2.[11]	26
Figura 31: Impresora 3D Tradesman P3-44 (izqda.) y el sistema de secado de los pellets (dcha).[12]	27
Figura 32: Empresa Sculptur.[14]	27
Figura 33: Ventilador frontal del extrusor para la retirada de calor del sistema de extrusión. [Fuente propia]	29
Figura 34: Diferentes estados por los que debe de pasar el material durante la extrusión. [19]	30
Figura 35: Esquema simplificado de los pasos a seguir hasta obtener un objeto 3D. [Fuente propia]	31
Figura 36: Secador de material en formato pellets Airid Polymer Dryer de la empresa 3devo. [Fuente propia]	33
Figura 37:sistema de agitación en el interior de la tolva de secado de material de la empresa 3devo. [Fuente propia]	34

<i>Figura 38: Interfaz montada en la secadora para el control del proceso de secado. [Fuente propia]</i>	34
<i>Figura 39: Impresora 3D Tumaker BigFoot Pro-Dual 500 Direct Drive – Pellets. [Fuente propia]</i>	35
<i>Figura 40: Impresión de forma dual. [23]</i>	36
<i>Figura 41: Impresión en forma espejo. [23]</i>	36
<i>Figura 42: Pantalla principal de una pieza en Simplify 3D. [Fuente propia]</i>	38
<i>Figura 43: Simulación del proceso de impresión 3D junto con datos de interés. [Fuente propia]</i>	39
<i>Figura 44: Pantalla táctil implementada en la impresora para el control. [Fuente propia]</i>	40
<i>Figura 45: Interfaz de la impresora para su control vía web. [Fuente propia]</i>	40
<i>Figura 46: Disposición de la tolva donde descarga el aspirador de pellets el material; Tubo corrugado que dirige el pellet al interior del sistema de extrusión. [Fuente propia]</i>	41
<i>Figura 47: Extrusor Mahor XYZ. [Fuente propia]</i>	43
<i>Figura 48: Despiece del extrusor de Mahor. [27]</i>	43
<i>Figura 49: Pieza impresa sin ventilador de capa (izqda) frente a una en la que se ha usado ventilador de capa (dcha). [28]</i>	44
<i>Figura 50: Ventilador de capa visto por la parte exterior. [Fuente propia]</i>	45
<i>Figura 51: Ventilador de capa visto desde la zona interior. [Fuente propia]</i>	45
<i>Figura 52: Zona de calentamiento de la base de impresión. [Fuente propia]</i>	46
<i>Figura 53: Mecanismo de empuje del filamento en FFF. [Fuente propia]</i>	48
<i>Figura 54: Esquema del mecanismo de empuje en la tecnología FFF. [Fuente propia]</i>	48
<i>Figura 55: Ejemplo de sub-extrusión. [30]</i>	49
<i>Figura 56: Diferentes tipos de sobre-extrusión. [31]</i>	49
<i>Figura 57: Localización de las termorresistencias en el extrusor. [Fuente propia]</i>	51
<i>Figura 58: Termorresistencia. [Fuente propia]</i>	51
<i>Figura 59: Estructura del ácido poliláctico (PLA). [33]</i>	52
<i>Figura 60: Extrusión en vacío. [Fuente propia]</i>	53
<i>Figura 61: Pesada del cordón de material tras la extrusión en vacío. [Fuente propia]</i>	54
<i>Figura 62: Nomenclatura de las dimensiones del cordón de material. [Fuente propia]</i>	55
<i>Figura 63: Obtención del caudal en función de las dimensiones del cordón que se desee. [Fuente propia]</i>	57
<i>Figura 64: Medida de un pellet de material usado en este ensayo. [Fuente propia]</i>	58
<i>Figura 65: Simulación de la impresión de un objeto 3D a velocidad de 30 mm/s con una boquilla de 0,8 mm con FFF y tiempo de impresión. [Fuente propia]</i>	58
<i>Figura 66: Simulación de la impresión de un objeto 3D a velocidad de 3,5 mm/s con una boquilla de 5mm con FGF y tiempo de impresión. [Fuente propia]</i>	58
<i>Figura 67: Cilindro impreso para la calibración del caudal. [Fuente propia]</i>	60
<i>Figura 68: Prototipos para comparar las impresiones para conocer si la calibración es correcta. []</i>	60
<i>Figura 69: ejemplos realizados en el laboratorio para conocer el caudal correcto. [Fuente propia]</i>	61
<i>Figura 70: Cámara termográfica Optris Xi 400. [37]</i>	64
<i>Figura 71: Vista desde la cámara termográfica de las capas al inicio, cercanas a la cama de impresión. [Fuente propia]</i>	65
<i>Figura 72: Vista desde la cámara termográfica de las capas finales de la impresión. [Fuente propia]</i>	65
<i>Figura 73: Lote impreso. [Fuente propia]</i>	66
<i>Figura 74: Banco de ensayos para la flexión a 3 puntos. [Fuente propia]</i>	66

<i>Figura 75: Situación de la probeta justo antes de iniciar el ensayo. [Fuente propia]</i>	69
<i>Figura 76: Célula de carga del banco de ensayos. [Fuente propia]</i>	69
<i>Figura 77: Probetas tras la rotura. [Fuente propia]</i>	70
<i>Figura 78: Prototipo de silla Voxel chair. [41]</i>	80
<i>Figura 79: Proceso de fabricación del modelo Voxel Chair. [41]</i>	80
<i>Figura 80: Ejemplos de mobiliario para aulas de infantil. [Fuente propia]</i>	81
<i>Figura 81: Ejemplos de mobiliario infantil (otra vista). [Fuente propia]</i>	81
<i>Figura 82: Diseño del banco de ensayos. [Fuente propia]</i>	82
<i>Figura 83: Molino de corte SM 300 para el triturado de material. [Fuente propia]</i>	83
<i>Figura 84: Rotor de corte de tipo paralelo. [Fuente propia]</i>	83
<i>Figura 85: Ficha técnica de datos - UPM FORMI 3D 20/19.</i>	92

Índice de gráficas

<i>Gráfica 1: Representación del caudal frente al parámetro E. [Fuente propia].....</i>	<i>56</i>
<i>Gráfica 2: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 1.</i>	<i>71</i>
<i>Gráfica 3: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 4.</i>	<i>72</i>
<i>Gráfica 4: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 2.</i>	<i>73</i>
<i>Gráfica 5: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 8.</i>	<i>74</i>
<i>Gráfica 6: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 12.</i>	<i>76</i>
<i>Gráfica 7: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 11.</i>	<i>76</i>
<i>Gráfica 8: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 1.</i>	<i>97</i>
<i>Gráfica 9: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 4.</i>	<i>97</i>
<i>Gráfica 10: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 2.</i>	<i>100</i>
<i>Gráfica 11: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 8.</i>	<i>100</i>
<i>Gráfica 12: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 11.</i>	<i>103</i>
<i>Gráfica 13: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 12.</i>	<i>103</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Tipos de matriz en función del material extruido.</i>	10
<i>Tabla 2: Viscosidad en función de la temperatura para plásticos semicristalinos y amorfos. [6]</i>	18
<i>Tabla 3: Ejemplos de temperaturas de transición vítrea y temperaturas de fusión para distintos plásticos. [6]</i>	20
<i>Tabla 4: Densidad de diferentes materiales plásticos. [6]</i>	21
<i>Tabla 5: Características generales de la BF Pro 500. [21]</i>	37
<i>Tabla 6: Matriz de datos de los parámetros escogidos para la realización de los lotes que se van a ensayar. [Fuente propia]</i>	63
<i>Tabla 7: Dimensiones promedio de las probetas de cada lote y la distancia entre apoyos del banco de ensayos. [Fuente propia]</i>	70
<i>Tabla 8: Resumen de los parámetros de los lotes 1 y 4. [Fuente propia]</i>	71
<i>Tabla 9: Resumen de los valores máximos de esfuerzo y los valores promedio de la deformación obtenidos.</i>	72
<i>Tabla 10: Resumen de los parámetros de los lotes 2 y 8. [Fuente propia]</i>	73
<i>Tabla 11: Resumen de los valores máximos de esfuerzo y los valores de la deformación obtenidos.</i>	74
<i>Tabla 12: Resumen de los parámetros de los lotes 11 y 12.</i>	75
<i>Tabla 13: Resumen de los valores máximos de esfuerzo y los valores de la deformación obtenidos.</i>	77
<i>Tabla 14: Datos de las pesadas en la extrusión en vacío para diferentes valores de "E".</i>	93
<i>Tabla 15: Cálculos necesarios para obtener el caudal a partir de las pesadas.</i>	94
<i>Tabla 16: Ficha técnica de datos – Pellet PET-G.</i>	95
<i>Tabla 17: Datos técnicos cámara infrarroja Optris Xi 400.</i>	96
<i>Tabla 18: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 4 del lote 1.</i>	98
<i>Tabla 19: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 3 del lote 4.</i>	99
<i>Tabla 20: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 10 del lote 2.</i>	101
<i>Tabla 21: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 10 del lote 8.</i>	102
<i>Tabla 22: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 3 del lote 11.</i>	104
<i>Tabla 23: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 18 del lote 12.</i>	105



INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los materiales plásticos representan un gran grupo que se distingue prácticamente en su totalidad por el hecho de ser desarrollados por el ser humano. Son consideradas sustancias macromoleculares en su mayoría orgánicas.

Gracias a su versatilidad y potencial de innovación inherentes, los plásticos están destinados a realizar un papel crucial en el marco de la economía sostenible y eficiente en el uso de los recursos. Pues son materiales que se han convertido en fundamentales para nuestra vida diaria y es inaceptable que haya residuos plásticos en el medioambiente. La industria debe avanzar y evolucionar hacia una producción de éstos fomentando una economía circular baja en carbono y su sostenibilidad.

Para fomentar dicho potencial por completo, es necesario no dejar de lado la gran lista de retos relativos al vertido y las opciones al final de la vida útil de los plásticos. El 60% de los productos y componentes plásticos tienen una vida útil de hasta 50 años, que es el tiempo que tardan en convertirse en residuos [1].

En 2018, la Comisión Europea lanzó la Estrategia Europea para el Plástico en Economía Circular para de esta manera dar un enfoque que haga que el reciclaje sea rentable para las empresas, reducir los residuos generados, así como su vertido al mar. Cerrando el ciclo de vida de los plásticos impulsará la competitividad a nivel europeo, ser conscientes del cambio climático y contribuir de este modo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [1].

Según la empresa multienergética REPSOL: “La economía circular es un modelo de producción y consumo que garantiza un crecimiento sostenible en el tiempo. Con la economía circular se promueve la optimización de recursos, la reducción en el consumo de materias primas y el aprovechamiento de los residuos, reciclándolos o dándoles una nueva vida para convertirlos en productos. El objetivo es, por tanto, aprovechar al máximo los recursos materiales de los que disponemos alargando el ciclo de vida de los productos, tratando de imitar a la naturaleza, donde todo tiene valor y todo se aprovecha”. Así, la economía circular fomenta el empleo, beneficia la economía local y protege el medioambiente, entre otras cosas. [2]

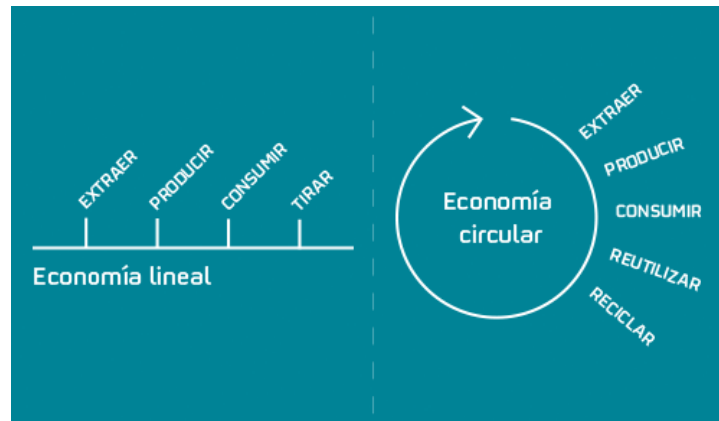


Figura 1: Comparativa entre la economía circular y la economía lineal. [2]

En el ámbito del reciclado de plástico, la impresión 3D juega un papel decisivo. Es un método de extrusión de materiales termoplásticos que, en los últimos años, ha abierto nuevas oportunidades para el diseño de piezas. Ha permitido a los ingenieros salirse de las técnicas de fabricación tradicional como pueden ser el mecanizado o la inyección y gozar de la libertad para crear geometrías más complejas que permitan personalizar las piezas. La impresión 3D que permite obtener piezas a través de la superposición de capas de material, es la tecnología de moda en esta generación y su uso aumenta día a día ya que reduce los costes de producción.

Actualmente, existen dos tecnologías: [3]

- La fabricación con filamento fundido (Fused Filament Fabrication, FFF) que es la técnica de fabricación aditiva (Additive Manufacturing, AM) más común y utilizada hasta ahora, que requiere de la formación de un filamento como materia prima para realizar los objetos 3D (ver figura 2).
- La fabricación granular por fusión (Fused Granular Fabrication, FGF) imprime directamente a través de los pellets. De esta forma, se elimina un proceso de calentamiento necesario en FFF, pues para obtener filamento se parte de pellets como materia prima y mediante un proceso de extrusión se obtiene el filamento. Es por eso por lo que, los pellets son más baratos (ver figura 3).

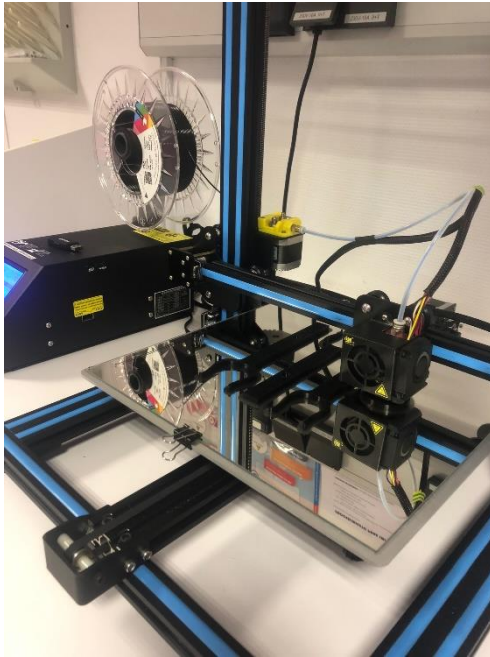


Figura 2: Tecnología FFF. [Fuente propia]

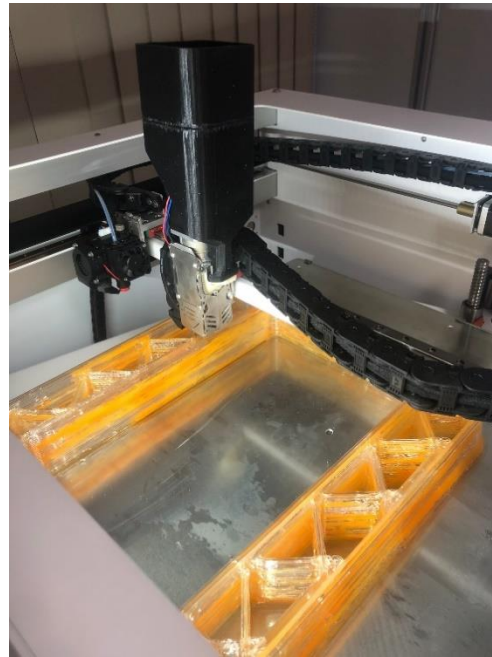


Figura 3: Tecnología FGF. [Fuente propia]

La creciente popularidad de la impresión 3D con la técnica FGF está animando a muchas empresas a desarrollar sus propias soluciones de fabricación. En España, se pueden encontrar empresas como Tumaker que cuenta con un amplio abanico de impresoras 3D profesionales de desarrollo propio y fabricación 100% española, destinadas al sector industrial. [4]

El objetivo general de este proyecto es conocer y manejar los principales parámetros que rigen la impresión 3D con tecnología FGF. Para la consecución de este objetivo se plantean una serie de objetivos específicos tales como:

- Obtener las dimensiones adecuadas de la pieza a fabricar por medio de la calibración del caudal.
- Analizar las propiedades fisicoquímicas del material a través de la modificación de parámetros de impresión que afectan directamente a éstas (velocidad del husillo, temperaturas, etc.).
- Estudiar la adhesión entre capas durante el proceso de extrusión por medio de ensayos a flexión en 3 puntos de las probetas fabricadas con FGF.



CAPÍTULO 1: ESTADO DE LA TÉCNICA

1.1. EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Se entiende como extrusión al proceso continuo que consiste en forzar el paso de un material (arcillas, cerámicas, metales, plásticos) a través de una abertura o boquilla que tiene la forma del producto que se quiere obtener. Para llevar a cabo este proceso las máquinas más utilizadas en la industria reciben el nombre de extrusoras. Éstas tienen como objetivo principal ser capaces de desarrollar una presión suficiente de tal forma que obligue al material a salir a través de la boquilla. [5]

El presente trabajo se centrará en la extrusión de materiales termoplásticos a partir de pellets para la fabricación de piezas 3D mediante FGF. El procedimiento que se llevará a cabo queda resumido en el esquema que se muestra a continuación (ver figura 4):

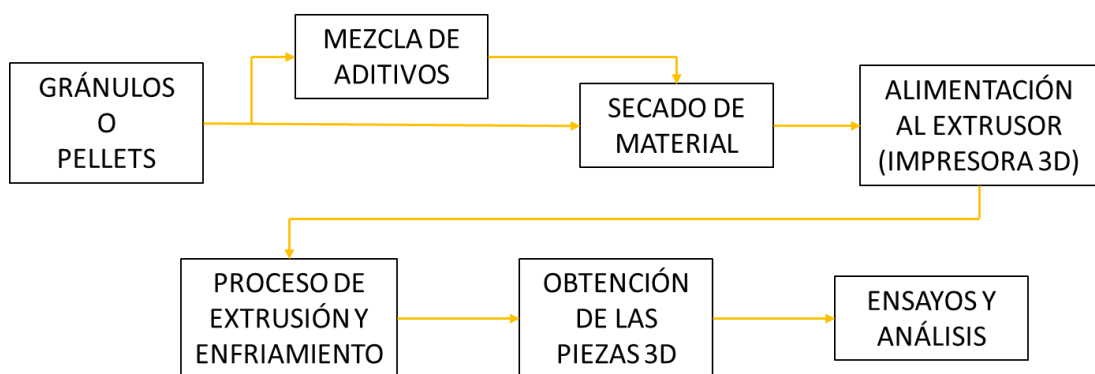


Figura 4: Esquema de las etapas del proceso FGF que se va a llevar a cabo. [Fuente propia]

Como se puede ver, hay varias etapas de pretratamiento del material antes de ser sometido al proceso de extrusión. Cabe la posibilidad de mezclar el material polimérico con gran variedad de aditivos (refuerzos, cargas, retardantes de llama, etc.) que confieran unas propiedades deseadas al material. El secado del material previo a la extrusión es posiblemente una de las etapas críticas del proceso, ya que es necesario eliminar la humedad que pueda haber absorbido durante su almacenaje.

A continuación, se introduce en la extrusora por medio de una tolva que hace llegar los pellets a la zona del husillo donde estará girando en el interior de un cilindro (barril) para obligar al plástico a avanzar. Durante el recorrido, el

polímero atravesará varias zonas de calentamiento que junto con el calor generado por la fricción material-husillo provocarán la fusión del plástico. Finalmente, a medida que va saliendo a través de la boquilla, el material es enfriado mediante unos ventiladores situados en el extrusor. Una vez finalizada la fabricación de las probetas, serán sometidas a ensayos de flexión.

1.2. TIPOS DE EXTRUSORES [6]

En el sector del plástico existen tres tipos de extrusores:

- 1.2.1. **Extrusor monohusillo o de un solo tornillo:** como su nombre indica, únicamente posee un tornillo de extrusión. Es el más común (ver figura 5).
- 1.2.2. **Extrusor de doble husillo o de dos tornillos:** posee dos tornillos de extrusión (ver figura 5).
En función de la dirección de giro de los husillos se tiene:
 - Extrusor de doble husillo corrotante: giran en la misma dirección.
 - Extrusor de doble husillo contrarrotante: giran en direcciones opuestas. El transporte del material es más eficaz que el caso anterior.
- 1.2.3. **Extrusor de pistón:** la presión ejercida al material para forzar su salida se realiza mediante un pistón (ver figura 6).

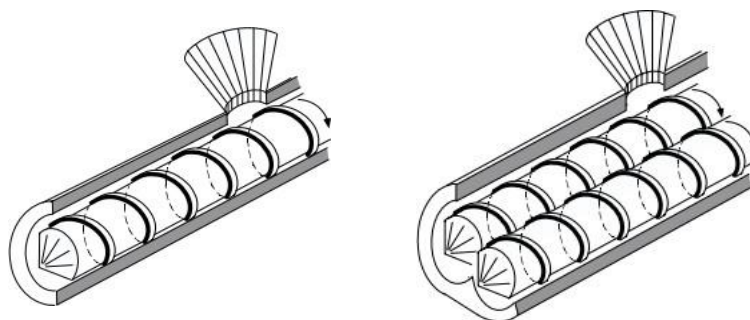


Figura 5: izquierda: Extrusor de un solo tornillo; derecha: extrusor de doble husillo. [6]

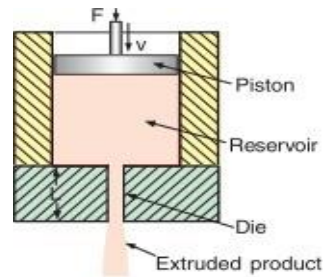


Figura 6: Extrusor de pistón.[6]

1.3. COMPONENTES DEL EXTRUSOR [6]

Una extrusora convencional consta principalmente de las siguientes partes (ver figura 7):

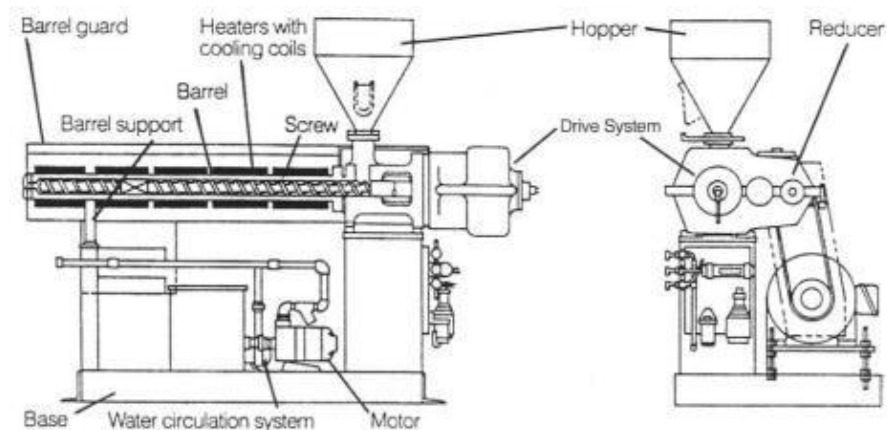


Figura 7: Esquema de los principales componentes de un extrusor monohusillo o de un solo tornillo de escala industrial. [5]

1.3.1. Tolva de alimentación y garganta.

Los pellets son añadidos a la tolva de alimentación (ver figura 8) que descarga el material a la garganta, una abertura a través de la cual pasa el material (ver figura 10). El diseño de la tolva es importante para conseguir un flujo de material constante y, por consiguiente, una buena extrusión. La mejor solución es una tolva de sección transversal circular que tenga una transición gradual en la sección cónica como puede observarse a continuación.

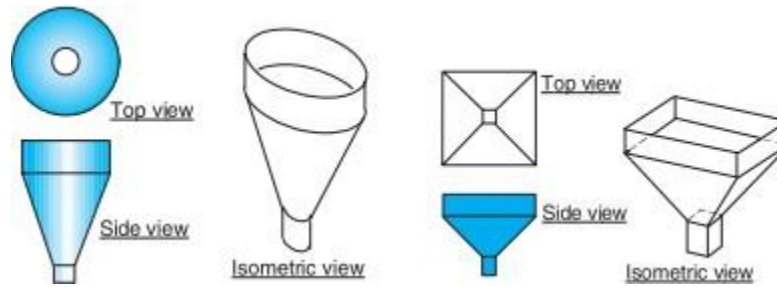


Figura 8: Comparativa de un buen diseño de tolva (izqda) y un mal diseño (dcha).[6]

Respecto a la garganta, existen casos en los que posee un sistema de refrigeración por agua con el fin de evitar la fusión del plástico al comienzo del husillo y así no se pegue a la pared.

Otras máquinas de extrusión en vez de tener acoplada una garganta, se mecaniza un agujero directamente en el barril. Se consigue así un menor número de piezas, reducción de coste y evitar problemas relacionados con la alineación de la garganta con el barril. Por otro lado, mediante esta configuración existe una mayor dificultad para crear una barrera térmica entre las zonas de calentamiento al inicio del husillo y la garganta.

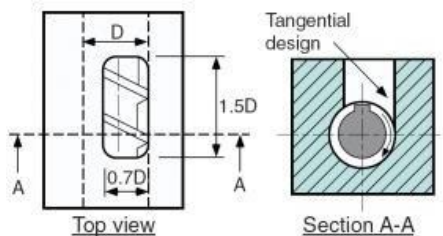
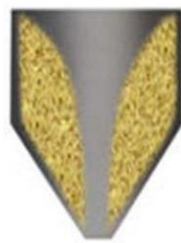


Figura 9: Geometría deseada para la zona de apertura de la garganta de alimentación.[6]

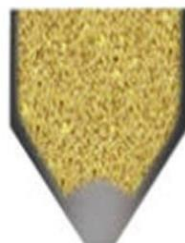


Figura 10: Garganta de entrada de los pellets a la zona de extrusión. [Fuente propia]

En muchas ocasiones, junto con el sistema de extrusión, viene un dispositivo de agitación (ver figura 11) para evitar atascos de material (generalmente cuando se introduce material en forma de polvo o triturado) en el interior de la tolva que haga que el flujo de salida sea menor que el deseado.



Ratholing



Bridging



Figura 12: Tipos de cohesión más comunes. [7] Figura 11: Sistema vibratorio para evitar cohesiones. [7]

1.3.2. Tornillo sinfín o husillo.

Se trata de la pieza fundamental de la extrusora y por ello un buen diseño de éste es crucial. Es un cilindro largo de diferentes longitudes en función del sistema de extrusión necesario con un vuelo helicoidal que lo envuelve (ver figura 13), cuyas propiedades han de cumplir funciones claves en el proceso como son: carga, transporte, calentamiento y mezcla de plástico. [6]

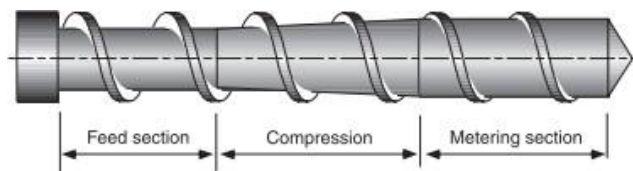


Figura 13: Husillo de un solo tramo y sus diferentes partes. [6]

Como se puede observar en la figura anterior, se pueden diferenciar tres zonas a lo largo del husillo:

- **Zona de alimentación:** primer contacto entre el material en forma de pellets o gránulos aún en estado sólido y el husillo.
- **Zona de compresión:** se produce la fusión de manera paulatina del material y se compacta gracias al aumento gradual de la sección transversal del tornillo que hace que las partículas rocen entre éste y la pared del barril. Así, se consigue obtener calor por fricción.
- **Zona de descarga:** en esta última zona, el material ya está completamente fundido y se produce una homogenización para obtener el producto final.

1.3.3. Cilindro o barril.

El cilindro o barril de la extrusora es un cilindro recto equipado normalmente con una camisa bimetálica con elevada resistencia al desgaste, superior a la del husillo. El barril puede contener una abertura para la ventilación del equipo y sacar del sistema los compuestos volátiles producidos durante la fusión. En este caso, se usa un tornillo especial denominado “tornillo de dos etapas” para que por dicha abertura de ventilación no se salga material fundido.

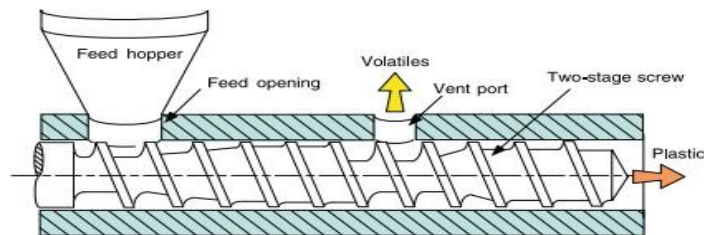


Figura 14: Barril con ventilación y husillo de dos etapas.[6]

- **Calentamiento y enfriamiento del barril.**

El barril tiene la capacidad de calentamiento y enfriamiento.

El proceso de calentamiento generalmente viene dado por calentadores eléctricos que están situados a lo largo del barril, llegando a alcanzar temperaturas alrededor de los 550°C. Otros métodos menos conocidos son el calentamiento a través de fluidos, por inducción y por radiación.

En la mayoría de las extrusoras, existen al menos tres zonas de calentamiento durante el recorrido del material por el husillo pudiendo incluso llegar a tener ocho zonas los sistemas de extrusión más largas. En todos los casos, cada zona de calentamiento va equipada de un sensor de temperatura (ver figura 15).

Por otro lado, el proceso de enfriamiento del cilindro es necesario cuando se esté trabajando con plásticos de elevada viscosidad a una velocidad de extrusión alta. Debido a la fricción material-tornillo, es tal el calor que hace que la temperatura del barril sobrepase los valores de consigna. Lo más común es que el sistema cuente con un equipamiento de ventiladores, uno en cada zona de calentamiento y por medio de aire se refrigere la zona cercana.

Si las necesidades de refrigeración fueran grandes debido al alto calor producido, el enfriamiento es llevado a cabo mediante agua o aceite cuyo principal inconveniente es que complica el control la temperatura.

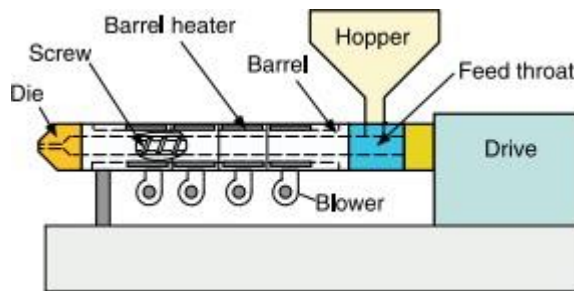


Figura 15: Zonas de calentamiento y enfriamiento en el sistema de extrusión.[6]

1.3.4. Boquilla o matriz de salida.

Situada en la parte final de la extrusora donde acaba el tornillo, en la zona de descarga de material hacia la cama de impresión. Tiene como función dar la forma deseada al plástico fundido según el producto final que se requiera obtener.

<u>Tipo de matriz</u>	<u>Producto extruido</u>
Anular	Tubos, tuberías y revestimientos de alambre
De corte	Láminas planas
Circular	Fibras y varillas
De perfil	Formas diferentes a las anteriores

Tabla 1: Tipos de matriz en función del material extruido.

1.3.5. Motor [6]

Es el encargado de suministrar la potencia precisa al tornillo sinfín para que gire a la velocidad necesaria y que el proceso de extrusión se realice de forma óptima. Cabe destacar que la velocidad del motor es más alta que la del husillo por lo que lleva equipado una reductora. Las relaciones de reducción típicas son entre 15:1 y 20:1.

1.4. VARIABLES DESTACABLES DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN [6]

Los parámetros más importantes en el proceso son la temperatura y presión de fusión. A partir de la lectura de éstas, se revelan en la mayoría de los casos los primeros indicios de problemáticas en la extrusión.

Existen también otros parámetros que afectan de manera directa a las propiedades finales de los objetos impresos como pueden ser las temperaturas en las zonas de calentamiento, velocidad del tornillo y del extrusor, carga del motor, entre otras, que se estudiarán más adelante.

1.4.1. Presión de fusión

Es la variable más importante del proceso. A través de su medición a lo largo del tiempo durante el proceso de extrusión, se lleva a cabo un buen seguimiento y control, así como de seguridad. Pues de esta manera se evitan accidentes graves por elevadas presiones (las extrusoras deberían de contar con un disco de ruptura para contrarrestar las sobrepresiones).

La presión de la boquilla es necesaria para poder superar la resistencia de la matriz. Es una medida directa del caudal a lo largo de dicha matriz y por lo tanto es esta presión la que determina la dimensión del material extruido. La relación entre ambos parámetros se puede observar a continuación (ver figura 16):

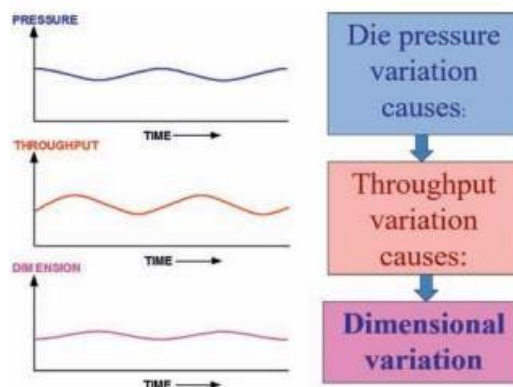


Figura 16: Efecto de la variación de la presión en la entrada de la matriz en la variación dimensional de material extruido. [6]

Con respecto al seguimiento y control de la presión, una buena medición de ésta a lo largo del tiempo permitirá dar a conocer la estabilidad del proceso. El dispositivo utilizado para medir presión es denominado transductor de presión

(ver figura 18) que contienen una fina membrana en contacto con el plástico fundido. La adquisición de datos se realiza por ordenador.

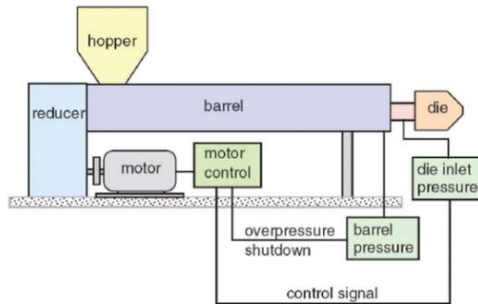


Figura 17: Ejemplo de sistema de control de la presión en la boquilla.[6]



Figura 18: Transductor de presión.

1.4.2. Temperatura de fusión

En todo proceso de extrusión, es indispensable realizar una correcta medición de la temperatura para obtener un elevado grado de estabilidad en la extrusión.

Generalmente, la temperatura de fusión se mide con termopares de inmersión (ver figura 19). Se introduce el vástago de la sonda en la masa de plástico fundida y lee la temperatura en el punto de unión del termopar. El principal inconveniente de este sistema de medida es que modifica las velocidades en el canal por lo que la lectura de la temperatura difiere con la que realmente hay en ese punto en el caso de no haber introducido la sonda.

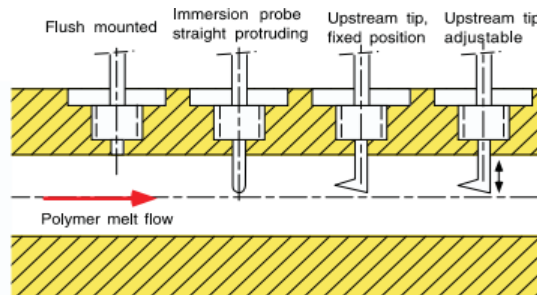


Figura 19: Tipos de sondas de temperatura. [6]



También se puede medir la temperatura de fusión mediante termómetros infrarrojos. En este proyecto, el seguimiento de la temperatura durante la impresión de las probetas se realiza a través de una cámara infrarroja (ver figura 20).

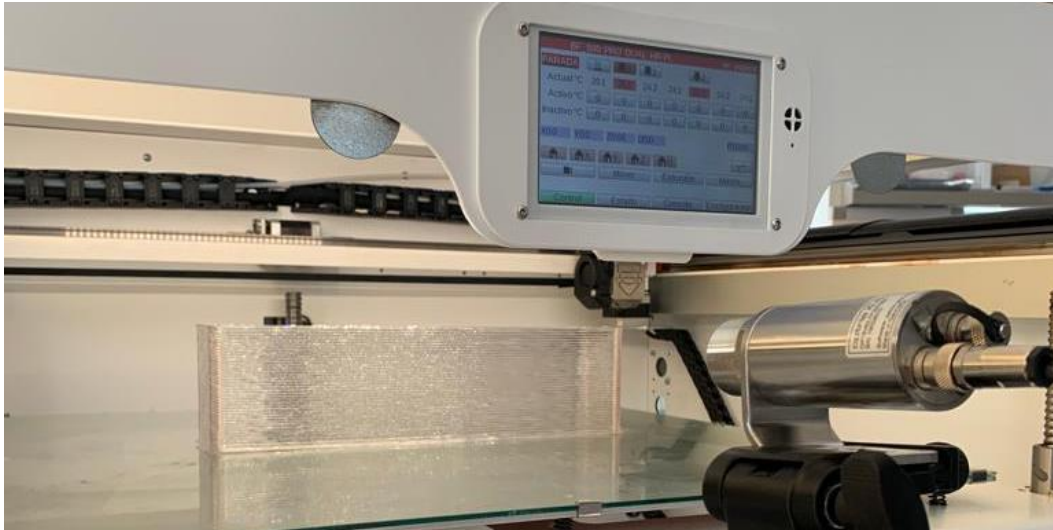


Figura 20: Seguimiento de la temperatura de extrusión en tiempo real a través de una cámara infrarroja.
[Fuente propia]

1.5. PROPIEDADES DE LOS PLÁSTICOS EN EXTRUSIÓN

A continuación, se desarrollarán las clases de plásticos y las propiedades tanto de flujo como térmicas que influyen en gran medida en este proceso.

1.5.1. Clasificación de los plásticos

Los plásticos, también llamados polímeros, son sustancias macromoleculares formadas por la unión repetida de unidades químicas simples denominadas monómeros. El proceso de obtención de los polímeros se conoce como polimerización.

Los átomos que forman parte de la cadena principal del polímero suelen ser carbono (C) por excelencia, aunque en algunos casos pueden aparecer nitrógeno (N) o azufre (S) que se combinan dando lugar a una configuración

única para cada polímero. Átomos como el hidrogeno (H) o el cloro (Cl) entre otros, se unirán a la cadena principal que hacen que se diferencia un polímero de otro. Cada polímero posee una configuración espacial única que le confiere propiedades físicas y reológicas concretas (ver figura 21).

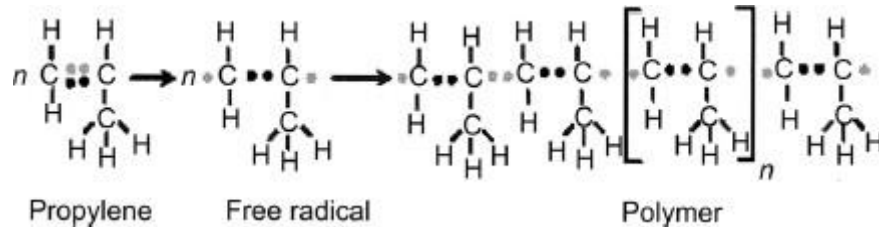


Figura 21: Estructura química del propileno (izqda) y del polipropileno (dcha) como resultado de la polimerización.[8]

Según su estructura química y el comportamiento que adoptan frente a la temperatura, se tienen plásticos termoplásticos y termoestables.

- **Termoplásticos:** aquellos que al ser calentados por encima de la temperatura de fusión se ablandan, funden y fluyen. Por ello, son utilizados en los procesos de extrusión e inyección. Una vez que se enfrían, se endurecen y vuelven al estado sólido. Esta característica hace que los termoplásticos sean adecuados para el reciclaje ya que pueden ser procesados varias veces. A este grupo pertenecen materiales como el ABS, polietileno y propileno.
- **Termoestables:** en este caso, durante un proceso de calentamiento por encima de una determinada temperatura, se endurecen formando así una red tridimensional muy estable debido a los fuertes enlaces entre moléculas. Ya que no se blandan como los termoplásticos, su reciclado es más difícil. Las resinas epoxi y las ureas son ejemplos de materiales termoestables.

Otra posible clasificación de los plásticos es atendiendo a su estructura. De esta forma se tienen: materiales amorfos y semicristalinos.

- **Amorfos:** su estructura está formada por cadenas poliméricas de forma aleatoria sin presencia de regiones cristalinas (ver figura 22). A este grupo pertenecen el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), el poliestireno (PS) y el PVC (Policloruro de Vinilo), entre otros.



Figura 22: Estructura de un polímero amorfo.[8]

- **Semicristalinos:** su estructura está formada por cadenas poliméricas con regiones aleatorias (amorfas) y cadenas poliméricas ordenadas (cristalinas) (ver figura 23). Esta estructura confiere al material mayor resistencia a la fatiga y a flexión. A este grupo pertenecen el polietileno de alta densidad y el polipropileno (PP), entre otros.

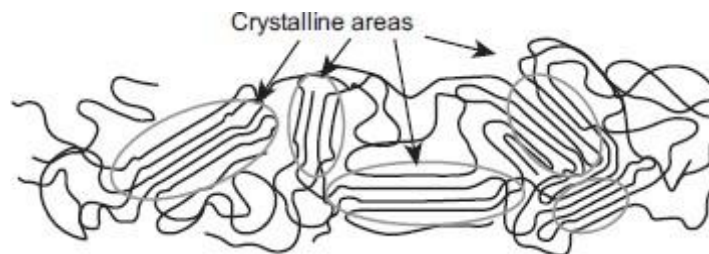


Figura 23: Estructura de un polímero semicristalino.[8]

La morfología desarrollada por el material polimérico es dependiente de la velocidad de enfriamiento, así como de las tensiones generadas sobre el material a lo largo de todo el procedimiento. Por este motivo, el control de las temperaturas antes y después de la boquilla (y por lo tanto también son importantes los ventiladores) juegan un papel fundamental en las propiedades y en la morfología del material extruido. [6]

1.5.2. Reología de los polímeros

Es la rama de la física cuyo objeto de estudio es el flujo y la deformación de los materiales cuando éstos son sometidos a fuerzas y/o tensiones.

Mientras que la mayoría de los líquidos cotidianos como el agua o el aceite, y disolventes orgánicos son fluidos newtonianos, esto quiere decir que, son deformados al aplicarles una fuerza y que continúan deformándose hasta que cesa la fuerza aplicada, siendo la velocidad de deformación proporcional a dicha fuerza, los polímeros cuando están fundidos no presentan esta relación velocidad-fuerza, por ello son considerados como fluidos no newtonianos. [8]



Cuando se aplica una fuerza sobre un plástico fundido puede ocurrir que:

- **Deformación plástica:** el material se deforma cuando se le aplica una fuerza y se mantiene deformado cuando ésta cesa.
- **Deformación elástica:** el material se deforma cuando se le aplica una fuerza y recupera su estado inicial cuando ésta cesa.
- **Ruptura:** el material se deforma superando el valor del límite elástico provocando la ruptura del material sin posibilidad de volver a su estado inicial. [8]

Para conocer mejor el comportamiento de un plástico durante su transformación, es necesario conocer su fluidez y viscosidad en estado fundido.

1.5.3. Viscosidad

Es la medida de la resistencia de un fluido a la deformación gradual por cizallamiento o tensión. Describe la resistencia de un fluido a fluir. El agua es un fluido de baja viscosidad y a ello se debe su facilidad para fluir. Sin embargo, la miel es un fluido de elevada viscosidad y por eso le cuesta más fluir. [6]

La viscosidad tiene unidades de Pa·s cuya ecuación queda descrita como el cociente entre el esfuerzo de cizallamiento sobre el fluido y la tasa de cizallamiento:

$$\eta = \frac{\text{esfuerzo de cizallamiento}}{\text{tasa de cizallamiento}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ec. (1)}$$

El esfuerzo de cizallamiento (τ) tiene unidades de fuerza por unidad de superficie. Es el esfuerzo requerido para mantener la velocidad de movimiento constante. [8]

La tasa de cizallamiento ($\dot{\gamma}$) nos indica la deformación del polímero una vez fundido. Se obtiene a partir de la velocidad de flujo y de la geometría de la región por donde circula el fluido. Las unidades normales de la velocidad de cizalla son los segundos recíprocos. [8]

A continuación, en la figura 24 que relaciona la variación de la viscosidad en función de la velocidad de cizalla además de las zonas en las que se producen procesos como la extrusión.

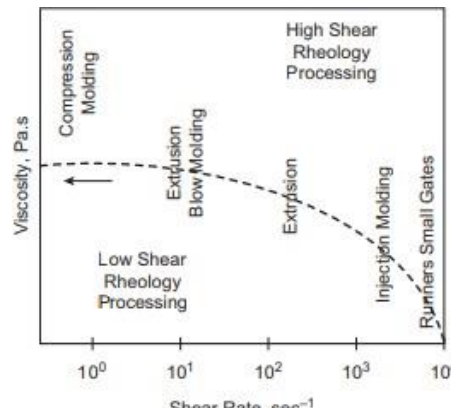


Figura 24: Velocidad de cizalla en función de la densidad.[8]

1.5.4. Índice de fluidez (MFI) [7]

Generalmente, la viscosidad se mide por medio del índice de fluidez (MFI). Indica la cantidad de material extruido (gramos (g)) en un determinado tiempo (normalmente 10 minutos). Para la medida de este parámetro se utiliza un reómetro capilar. Las unidades son: masa/tiempo de extrusión.

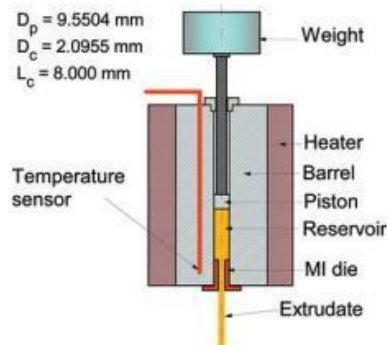


Figura 25: Esquema simplificado de un reómetro capilar.[6]

Para la realización del proceso, se retira el pistón y se añade en el interior del cilindro calefactado. Se deja que el material alcance la temperatura de equilibrio y se aplica peso al pistón que fuerce al material fundido a salir a través del orificio localizado al final del barril. Al cabo de diez minutos se recoge la cantidad extruida y se pesa. De esta forma se obtienen el valor del MFI, en este caso, g/10 min.

El MFI es inversamente proporcional a la viscosidad, es decir, un valor alto del índice de fluidez indica que su viscosidad es baja y por el contrario, los materiales con elevada viscosidad presentan un valor bajo de MFI. Según este

índice, se pueden encontrar los materiales poliméricos más adecuados para el proceso de extrusión:

- **MFI < 10:** materiales aptos para la extrusión por tener mayor viscosidad.
- **MFI ~ 10:** materiales adecuados para la extrusión. Buen funcionamiento en la impresión 3D.
- **MFI > 10:** materiales aptos para inyección por moldeo. En este tipo de procesos es condición necesaria que la resistencia a la fluidez sea baja. No son adecuados para la impresión 3D ya que es más complicado el control del flujo.

La temperatura es un parámetro que influye en gran medida en el valor de la viscosidad. En función del material que se trate afectara en mayor o menor medida. Para el caso de los materiales amorfos, éstos presentan mayor sensibilidad a la temperatura respecto a los semicristalinos.

De la tabla 2 se deduce que un cambio producido en la temperatura del barril se traduce en una variación de la viscosidad del material cuyo efecto es más notable en plásticos amorfos que semicristalinos. Por ello, en caso de tratar con los primeros, un buen control de la temperatura es indispensable. [6]

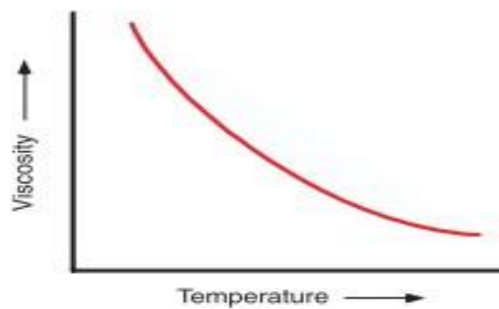


Figura 26: Efecto de la temperatura en los plásticos semicristalinos y amorfos.[6]

Tipo de plástico	Variación de la viscosidad por cada grado de cambio en la temperatura
Amorfo	5-20 %
Semicristalino	2-3 %

Tabla 2: Viscosidad en función de la temperatura para plásticos semicristalinos y amorfos.[6]



- **Generación de calor viscoso**

Es aquel calor generado por la fuerza de cizallamiento aplicada sobre el termoplástico. Se define como el producto de la velocidad de cizallamiento elevado al cuadrado por la viscosidad. En esta línea, cuando se trabaje con velocidades elevadas y materiales viscosos, la generación de calor viscoso será mayor, sobre todo debido a la velocidad ya que dicho término aparece elevado al cuadrado. En el caso del proceso de extrusión, la mayor parte del calentamiento del plástico proviene de este calor, pues se suele trabajar con materiales viscosos. [6]

Llegado este punto, se van a definir una serie de propiedades térmicas que se han de tener en cuenta a la hora de seleccionar el equipo, el material a utilizar y los parámetros de proceso necesarios.

- **Punto de fusión**

Es la temperatura a la que el plástico se funde. Aplicable a materiales semicristalinos ya que los amorfos no presentan zonas cristalinas en su estructura. El procesamiento de los plásticos se suele hacer a temperaturas que superan en 50°C su temperatura de fusión, aunque también influyen otras variables como la viscosidad. En caso de trabajar con materiales de elevada viscosidad, se tratará de trabajar a la mayor temperatura posible sin llegar a la degradación del material.

- **Temperatura de transición vítrea**

Es aquella temperatura para la cual, se produce la transición en un material desde un estado sólido (temperaturas relativamente bajas) a un estado en que son dúctiles y maleables (altas temperaturas). En la tabla 3 se muestran algunos ejemplos.



Plástico	Temperatura de transición vítrea (°C)	Temperatura de fusión (°C)
Poliestireno	101	217
Cloruro de polivinilo (PVC)	80	177
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	115	200
Policarbonato (PC)	150	
Polietileno de baja densidad (LDPE)	-120/-90	120
Polietileno de alta densidad (HDPE)	-120/-90	130
Polipropileno (PP)	-10	175
Tereftalato de polietileno (PET)	70	275

Tabla 3: Ejemplos de temperaturas de transición vítrea y temperaturas de fusión para distintos plásticos.[6]

- **Conductividad térmica**

Es la capacidad de un material a la conducción de calor. En el caso de los plásticos, poseen valores bajos de conductividad (son considerados aislantes de calor) y por ello, en la extrusión, se pueden producir regiones no uniformes de temperatura ya que, al introducir el material en el barril, se necesita un tiempo hasta que las temperaturas de toda la masa fundida se igualen por conducción.

- **Calor específico y entalpía**

El calor específico se conoce como la energía necesaria para aumentar 1°C la temperatura de un 1 Kg de material. Sus unidades son: J/Kg*K. La cantidad de calor que se necesita para aumentar la temperatura del material viene expresada por la diferencia de entalpías entre ambas temperaturas. Las unidades de la entalpía son: KW*h/Kg, energía por unidad de masa.



- **Densidad**

Queda definida como la relación entre la masa y su volumen. Tiene unidades de: Kg/m^3 . Por lo general, los plásticos poseen valores de densidad cercanos al del agua (1000 Kg/m^3). La densidad de algunos plásticos comunes se muestra en la tabla 4:

Plástico	Densidad (g/cm^3)
Polietileno de baja densidad (LDPE)	0,92
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0,95
Policloruro de vinilo (PVC)	1,40
Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)	1,02
Polipropileno (PP)	0,91
Tereftalato de polietileno (PET)	1,35

Tabla 4: Densidad de diferentes materiales plásticos. [6]

- **Estabilidad térmica y tiempo de inducción**

Durante el proceso de extrusión, el material está sometido a elevadas temperaturas durante un tiempo prolongado que hace que exista la probabilidad de que éste se degrade llegando incluso a quemarse y pierda sus propiedades mecánicas.

El tiempo de inducción es aquel que el plástico es capaz de aguantar a elevadas temperaturas sin que muestre indicios de degradación detectables, es decir, está ligado a la estabilidad térmica. Para un tiempo de inducción elevado, indica que el material es térmicamente estable.



1.6. IMPRESORAS 3D CON EXTRUSOR DE PELLETS

Hasta ahora, se ha expuesto el procesado de los materiales plásticos mediante la extrusión a nivel industrial. El presente trabajo se llevará a cabo por medio de un extrusor de pellets a escala de laboratorio, muy útil para todos aquellos usuarios que quieran emprender y conocer la extrusión a través de los plásticos y el amplio abanico de aplicaciones posibles que conlleva.

Siguiendo esta línea, aunque el concepto en sí del proceso de extrusión a partir de pellets es el mismo, el manejo y control de este tipo de impresoras es más sencillo que a nivel industrial, donde ya se están utilizando robots de grandes dimensiones cuyos cabezales están provistos de un extrusor para realizar piezas 3D del orden de metros.

A continuación, se realizará un estudio de mercado de las diferentes impresoras 3D mediante tecnología FGF.

1.6.1. PIOCREAT 3D [9]

Shenzhen PioCreat 3D Technology Co, Ltd. es uno de los primeros fabricantes de dispositivos de impresión 3D que surgió en el año 2015 cuya sede está localizada en China.

Se centran en la investigación y desarrollo (I + D), producción y venta de impresoras 3D para odontología, joyería o lo que a este trabajo se refiere, para la fabricación aditiva de gran tamaño. Tienen una base de producción a gran escala que cubre un área de 10.000 metros cuadrados, servicio post-venta y cuentan con institutos de investigación, laboratorios de impresión 3D para probar nuevos materiales, así como líneas modernas de producción en China.



Cuentan con dos modelos de impresoras que se muestran a continuación:

- **Piocrete G5 Industrial FGF Pellets 3D Printer**

El conjunto de cabezal de impresión es totalmente nuevo. Plataforma de atracción magnética. Posee modos de nivelación auxiliar y automática. La tecnología de impresión 3D de bajo coste y alta eficiencia precisión y velocidad.

Cuenta con un calentamiento de la cama en un breve periodo de tiempo, un diseño del husillo que hace que la presión ejercida al material para forzarlo a salir sea mayor y con la posibilidad de impresión multicolor.



Figura 27: Impresora 3D Piocrete G5 Industrial FGF Pellets 3D Printer.[9]

- **FGF Pellet 3D Printer G12 Piocrete**

Cuenta con un espacio de impresión más grande que la Piocrete G5, se consigue que la presión a la que está sometida el material sea uniforme. Motor mucho más potente llegando a velocidades de impresión de 100 mm/s. La gran novedad es que cuenta con un sistema de control de la temperatura de la cámara de impresión.

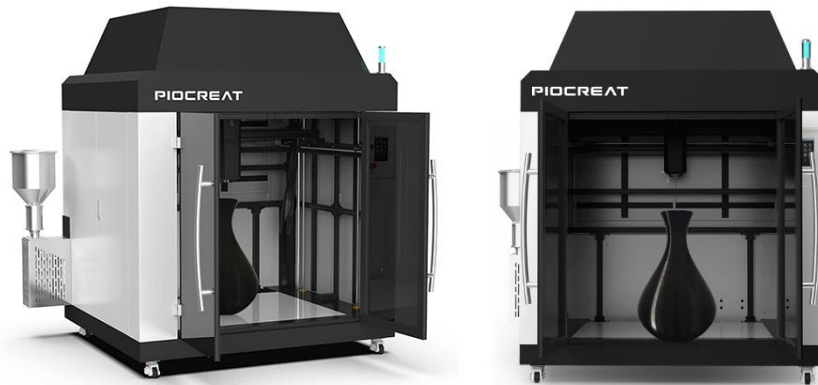


Figura 28: Impresora 3D FGF Pellet ·D Printer G12 Piocreat.[9]

1.6.2. WASP [10]

La impresión 3D es el corazón de esta empresa. Con sede en Massa Lombarda, cerca de Bolonia (Italia), utilizan los ingresos procedentes de la venta de impresoras sólidas en la inversión para la investigación y desarrollo de proyectos integrados que aspiran a una revolución de la producción que dará lugar a una prosperidad generalizada. Su objetivo principal como empresa es construir viviendas de “kilómetro cero” a partir del reciclado de material. Ofrecen la mejor gama de impresoras 3D en el mercado con tecnología delta.

WASP Iberia es la delegación oficial de WASP y TreeD Filaments en la península ibérica.

- Delta WASP 3MT Industrial 4.0

Está optimizada para impresión en gran formato. Su estructura es metálica con un sistema mecánico de correas reforzadas y cerramiento tanto térmico como acústico. Cuentan con conexión vía Wifi pudiéndose controlar con un smartphone, tablet o PC. Además, posee un sistema de carga automática de pellets que reduce el peso en el cabezal. Diseñada para combinar materiales técnicos y reciclados.



Figura 29: Impresora 3D Delta WASP 3MT Industrial 4.0.[10]

1.6.3. Re:3D [11]

Es una empresa social pionera en nuevas innovaciones para diezmar las barreras del coste y escalada de impresión 3D con el fin de crear puestos de trabajo y permitir a los ingenieros de todo el mundo a abordar de manera independiente las necesidades locales. Con sede en Houston, Austin y Puerto Rico, cuentan con clientes en más de 50 países en todo el mundo. Una particularidad de esta compañía es que dona una impresora 3D a alguien que trate de hacer una diferencia en su comunidad por cada 100 unidades vendidas.

Esta empresa fabrica la impresora 3D con tecnología FFF más grande del mundo llamada Gigabot por menos de 9000\$.

- GigabotX 2

Permite la impresión de pellets vírgenes y reciclados, escamas o material triturado que permite acercarse más aún al sueño de la economía circular. Permite trabajar con gránulos de entre 3 – 5 mm que fundan por debajo de los 270°C. Es modular, actualizable con servicio de atención al cliente de por vida.

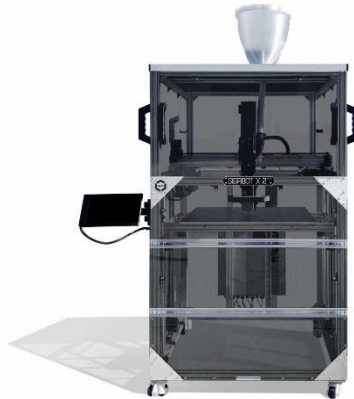


Figura 30: Impresora 3D GigabotX 2.[11]

1.6.4. Juggerbot 3D [12] [13]

Con sede en el noroeste de Ohio, en Youngstown (Estados Unidos), construyen impresoras 3D a nivel industrial. Apoyan este tipo de fabricación aditiva ya que confían en que desempeñará un papel importante en la forma que diseñan, fabrican y se consumen productos.

- **Serie Tradesman™ P3-44**

Equipada con tecnología de extrusión alimentada mediante gránulos capaz de aumentar el rendimiento en más de 30 veces el de las impresoras 3D tradicionales. El sistema de extrusora de posición ajustable permite a los operarios utilizar un segundo material o doble rendimiento en un solo sistema, así como una fácil calibración de la boquilla del extrusor. Incluye un software de corte profesional y los programas de control de máquina que incluye una biblioteca de información de procesamiento.

Juggerbot 3D ofrece programas de servicio y soporte para garantizar su máximo aprovechamiento.



Figura 31: Impresora 3D Tradesman P3-44 (izqda.) y el sistema de secado de los pellets (dcha).[12]

1.6.5. SCULPTUR [14]

Es una empresa sueca fundada en 2019 convirtiéndose en una de las primeras empresas del mundo en utilizar robots para la fabricación aditiva a gran escala, apostando por una economía circular.

Por ello, han refinado tanto los diseños como la tecnología para obtener productos fabricados con material reciclado o de base biológica listo para reciclarse fácilmente. Sculptur comenzó como un proyecto pionero junto con ABB y RISE. El objetivo era explorar el futuro de la fabricación aditiva a gran escala mediante robots.



Figura 32: Empresa Sculptur.[14]



CAPÍTULO 2: PROCESO Y ANÁLISIS FGF

La fabricación aditiva a gran escala mediante extrusión directa de pellets, como ya se ha dicho, se conoce como FGF (Fused Granular Fabrication). Es una tecnología que hasta hace no mucho tiempo requería de grandes inversiones y presentaba varias limitaciones respecto al diseño y los acabados. [15]

A medida que la impresión 3D sigue la línea buscando la fabricación industrial, cada vez un mayor número de fabricantes están desarrollando tecnologías y materiales en este sector capaces de reunir fuerza, rigidez y resistencia al calor que son necesarias para crear grandes aplicaciones estructurales. Con ratios de relleno de hasta 50%, el material en formato de pellets puede cumplir los requisitos de rendimiento sin llegar a estar sujetos a las limitaciones que presentan otro tipo de tecnologías de impresión 3D. [16]

Hay algunos diferenciadores clave en la tecnología FGF. Se produce un aumento en la velocidad de producción que, basándose en un mayor rendimiento, se ve la posibilidad de imprimir hasta 200 veces más rápido que la impresión tradicional. Las opciones de materiales también son mucho más amplias, ya que el tipo y la cantidad de rellenos que pueden utilizarse en múltiples sistemas de resinas se amplían enormemente, pues evita la creación de filamento. Como resultado, el coste total de la pieza se reduce considerablemente, lo que hace que esta tecnología sea más competitiva. Además, la cantidad de tiempo empleado en el ciclo de desarrollo puede reducirse al utilizar tiempos de impresión más rápidos.

La fabricación mediante tecnología FGF es un proceso similar al de la FFF, pero en lugar de utilizar como alimentación un hilo de termoplástico, usa gránulos de material (pellets). La mecánica sigue siendo relativamente sencilla solo que ahora incorpora un sistema robusto de extrusión que como se ha comentado en el apartado anterior, consta de un barril y un husillo o tornillo. Los pellets, añadidos al sistema de extrusión por medio de la tolva, se introducen por gravedad hacia la zona del tornillo. Éste es accionado a través de un servomotor que los empuja hacia la salida por medio de la boquilla pasando a lo largo de todo el husillo donde se encuentran varias zonas de calentamiento que funden los pellets de forma paulatina con el objetivo de que, a la salida, se tenga una mezcla de material fundido y homogéneo. Para cumplir dicho objetivo es trascendental que la transición de los pellets desde el estado sólido hasta el estado fluido no se realice de forma brusca.

En primer lugar, al inicio del tornillo los gránulos serán sólidos. A diferencia de lo que ocurre en FFF (es necesario conseguir más calor en el material para que pueda imprimir a mayor velocidad y no cristalice demasiado rápido), para FGF el problema es, al contrario. Se necesita retirar calor del material porque debido al accionamiento del tornillo, se produce fricción cuyo resultado es que se produce calentamiento por cizallamiento. El calor aportado en los pellets a través del tornillo será probablemente mayor que la temperatura del barril. Con un rendimiento tan alto en FGF, si la temperatura del material es demasiado alta, las capas iniciales impresas podrían ser demasiado débiles para soportar el peso del resto de capas durante la impresión. Las capas impresas se hundirán y podrían causar mala calidad o incluso una impresión fallida. [Juggerbot 3D, hojas impresas] [17]

Como se puede observar en la figura 33, se suele colocar un ventilador a la misma altura que la entrada de pellets cuya función será la retirada de calor del sistema:

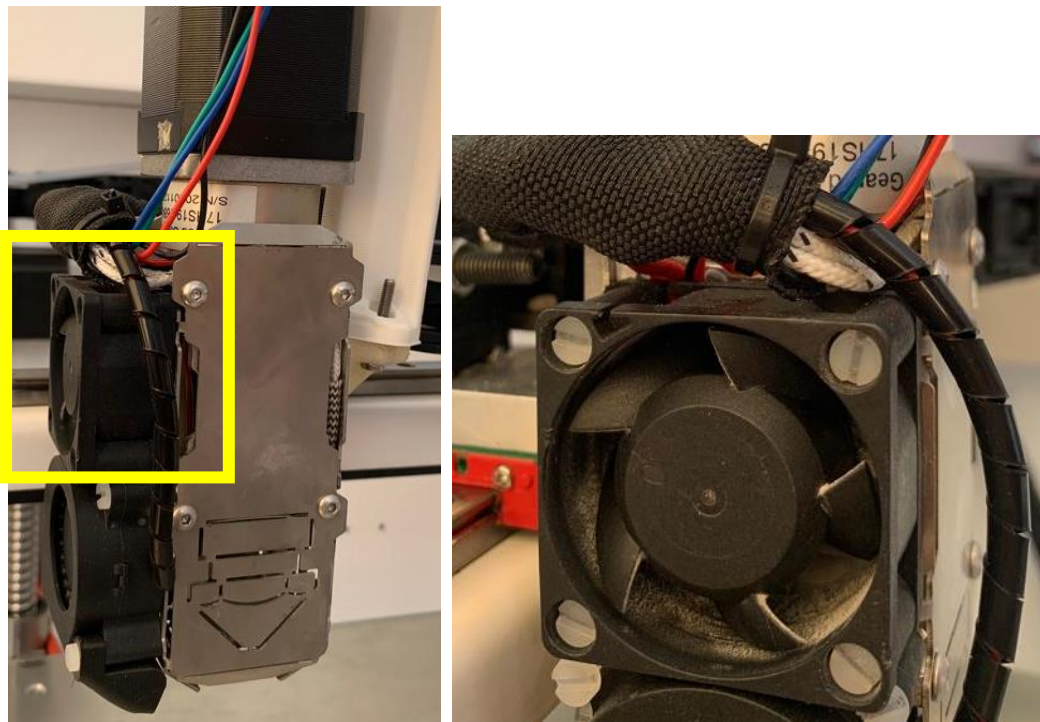


Figura 33: Ventilador frontal del extrusor para la retirada de calor del sistema de extrusión. [Fuente propia]

En la siguiente región, situada en la zona inicial del tornillo, se irá alcanzando una temperatura mayor que la entrada con el objetivo de llegar a la temperatura de transición vítrea del material, que como ya se dijo, es característica de cada uno de ellos y provoca un aumento de la ductilidad del

material (capacidad de un material de experimentar grandes deformaciones en frío sin romperse) [18]. Es a esta altura del tornillo donde está situada la primera zona de calentamiento a través de una resistencia.

De esta manera, los gránulos se irán mezclando unos con otros e irán formando una mezcla homogénea (ver figura 34) que se irá comprimiendo por el aumento a lo largo del husillo de la sección transversal de éste y el barril (ver imagen 13).

Por último, al final del tornillo, se encuentra la última zona de calentamiento. Ésta tendrá una temperatura superior a la región anterior para superar el estado vítreo del plástico y se obtenga una masa bien fundida y homogénea a la salida por medio de la boquilla.

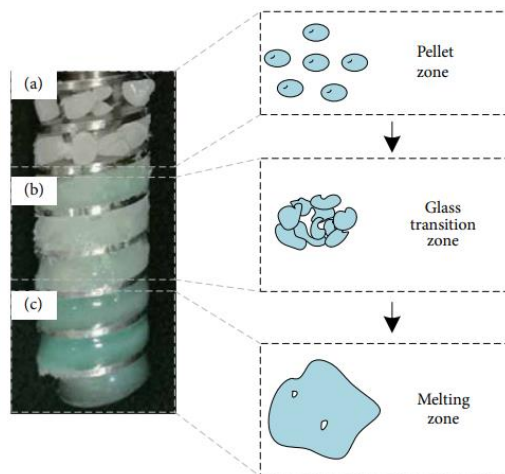


Figura 34: Diferentes estados por los que debe de pasar el material durante la extrusión. [19]

Los pasos necesarios para conseguir un objeto impreso en 3D se resumen en la figura 35:

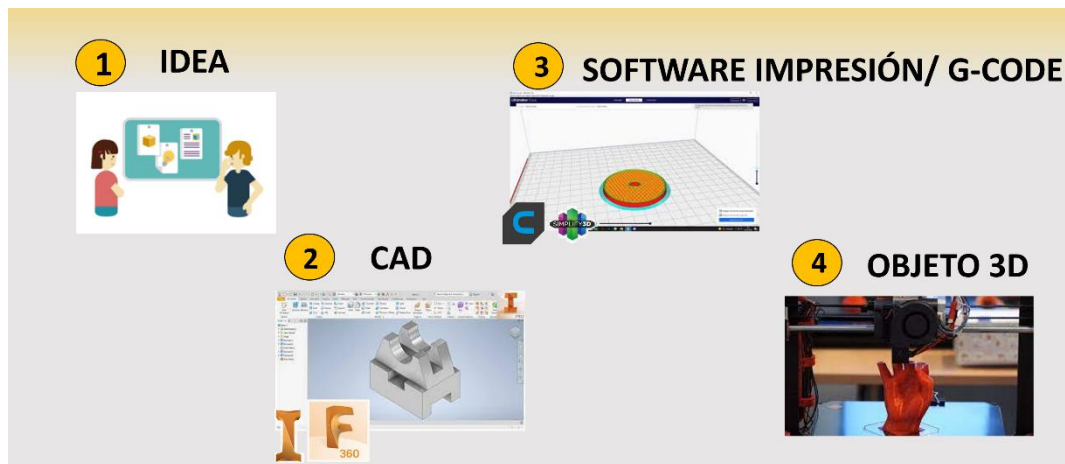


Figura 35: Esquema simplificado de los pasos a seguir hasta obtener un objeto 3D. [Fuente propia]

Se parte de la necesidad de imprimir una pieza que cumpla una determinada función. Mediante el diseño asistido por ordenador CAD (Computer Aided Design) como puede ser “Inventor”, “Fusion 360” o incluso a través de escáneres 3D, se realiza el diseño de dicha pieza. Una vez finalizado, se obtiene el “mallado” del objeto que no es más que una nube o conjunto de puntos que forman la superficie de éste que se guardará como formato “.stl”. Este archivo es llevado a un software de impresión como “Ultimaker Cura” o “Simplify3D” que llevan a cabo el devanado de la pieza en diferentes capas. Es en este punto donde generalmente se deciden las características de impresión como pueden ser las temperaturas, velocidades, rellenos, etc. Finalmente, se genera un archivo de extensión “.gcode” porque es el lenguaje utilizado por las impresoras. Consta de un patrón que contienen todas las coordenadas que debe seguir la impresora y así conseguir el objeto en tres dimensiones.

2.1. EQUIPOS UTILIZADOS

Tanto para FFF y FGF antes de someter al material al proceso de extrusión, la materia prima plástica se seca en un horno o en una tolva de secado industrial, generalmente situada al lado de la impresora. El material es llamado desde los sensores dentro de la impresora 3D y se transporta a través de tubos corrugados a una tolva secundaria más pequeña por medio de un sistema de aspiración que no es más que una bomba que aspira pellets para transportarlos a dicha tolva secundaria.

En ambos tipos de tecnología es fundamental el secado de material previo a la extrusión para evitar problemas posteriores como la pérdida de propiedades.



2.1.1. Máquina de secado: Airid Polymer Dryer [7] [20]

Durante la síntesis, el transporte o el almacenamiento de los materiales poliméricos, éstos tienen cierta tendencia a la absorción de humedad para tratar de alcanzar un valor de equilibrio (que depende del tipo de polímero y su tamaño, de la humedad y de la temperatura del aire) con el medio ambiente.

Los materiales plásticos poliméricos pueden ser higroscópicos o no higroscópicos, y cada tipo tienen un conjunto de características de procesamiento que tienen una cierta afinidad por absorber la humedad, en función de la polaridad de la estructura química de las macromoléculas que componen el material.

- **Higroscópicos:** el agua es absorbida en el interior del pellet y se une químicamente con el material. La eliminación de la humedad de estos materiales es una tarea difícil que requiere de dispositivos deshumidificadores u hornos en los que el aire caliente es deshumidificado antes de ser inyectado en el sistema. Estos polímeros son polares como el agua.
A este grupo pertenecen materiales como el ABS, el PET o el PC.
- **No higroscópicos:** en este caso, el agua no penetra en el material, permanece en la superficie y por ello el secado es más simple, rápido y con el uso de un secador de aire caliente sería suficiente.
A este grupo pertenecen el PVC, el PP o el poliestireno.

La humedad de los polímeros desempeña un papel importante en la forma en la que el material será extruido y en su comportamiento. Puede afectar al acabado superficial de la pieza, causar decoloración, reducir las propiedades mecánicas (afectando a la resistencia y al alargamiento hasta rotura) e incluso afectar a la viscosidad.

En algunos materiales es fácil notar la humedad ya que se pueden observar burbujas en la superficie del material extruido o incluso la desgasificación de vapor de agua atrapado en el interior. En otros materiales es posible que a simple vista parezca que todo está correcto y no se será hasta después de comenzar la impresión cuando se puedan ver efectos directos. [17]



En esta línea, se utilizará un dispositivo de secado Airid Polymer Dryer de la empresa 3Devo (ver figura 36).

Se trata de una empresa tecnológica fundada por jóvenes ingenieros en los Países Bajos. Su misión se centra en desarrollar productos accesibles y de elevada calidad para capacitar a innovadores y creadores ayudándoles en la transición (de empresas, centros educativos y laboratorios) hacia un modelo de negocio más sostenible no solo a nivel económico, sino que también desde una práctica de impresión 3D respetuosa con el medio ambiente.



Figura 36: Secador de material en formato pellets Airid Polymer Dryer de la empresa 3devo. [Fuente propia]

El secador de polímeros está diseñado para eliminar la humedad superficial de la mayoría de los materiales poliméricos. En su interior, está dotado de un sistema de agitación (ver figura 37) para garantizar que el secado sea lo más uniforme posible en toda la superficie de los gránulos.



Figura 37: sistema de agitación en el interior de la tolva de secado de material de la empresa 3devo. [Fuente propia]

El control del dispositivo, así como la elección de los diferentes ajustes y configuraciones de secado (temperatura, velocidad de giro del rotor y el tiempo) se realizan a través de la interfaz situada en el propio secador (ver figura 38). También permite seleccionar si lo que se desea secar son pellets o material triturado, así como la cantidad aproximada que se desee secar con el objetivo de introducir mayor o menor caudal de aire durante el proceso de secado.



Figura 38: Interfaz montada en la secadora para el control del proceso de secado. [Fuente propia]



2.1.2. Tumaker BIG FOOT PRO-500 - DUAL DIRECT DRIVE – PELLET

Tumaker nació en el año 2014 para la innovación industrial con el objetivo de alcanzar una perfecta conexión entre el producto y el usuario. Cuentan con un amplio abanico de impresoras 3D profesionales de desarrollo propio, fabricación 100% española y de gran diferenciación a nivel internacional. En 2016, su impresora Big Foot fue la primera de gran formato profesional fabricada íntegramente en España.

Fue en el año 2020 cuando los CEOs de las empresas de IT3D e Indart 3D se hicieron con los derechos de la marca iniciando así una era de impresoras 3D únicas en el sector de la fabricación aditiva. A partir de esta unión, comenzaron a incluir en las impresoras una electrónica de última generación que maximiza el rendimiento y afianza la fiabilidad.

En 2021 se lanza al mercado internacional la gama DUAL de doble cabezal independiente, con 3 tipos de cabezales, 4 tamaños de impresoras alcanzando un volumen máximo de 500x500x500 (mm) y 36 posibles combinaciones a escoger por el cliente. Esto supone una revolución en este sector ofreciendo una infinita personalización. [21]

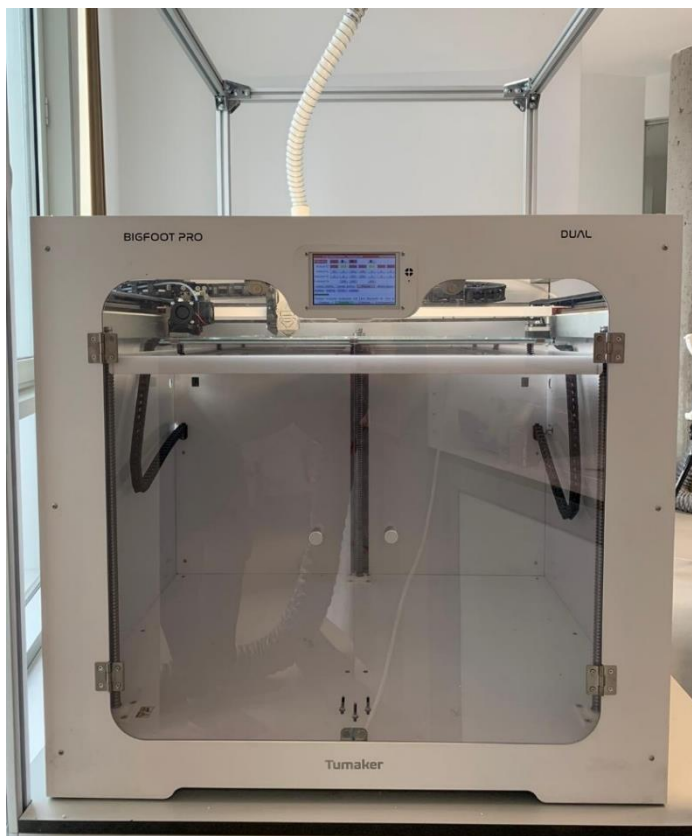


Figura 39: Impresora 3D
Tumaker BigFoot Pro-Dual 500
Direct Drive – Pellets. [Fuente
propia]

La impresora 3D Tumaker Pro-Dual (ver figura 39) está equipada con dos cabezales independientes: Direct Drive HR y Pellets. Es la única impresora 3D que permite trabajar de forma simultánea e independiente con dichos cabezales utilizando al mismo tiempo filamento y pellets.

Su cabezal de pellets rompe con la barrera del material. Un desarrollo exclusivo que permite el uso de materiales de desarrollos propios, certificados o que no se encuentran en formato de filamento.

Esta impresora ofrece diferentes posibilidades de impresión:

- **Producción con un cabezal:** imprime únicamente con un cabezal, como si se tratara de una impresora de un solo extrusor.
- **Producción con doble cabezal:** se realiza la impresión de una sola pieza empleando dos cabezales. Se alternan colores, materiales y técnicas de impresión incluso llegando a usar materiales solubles que actúen como soporte (ver figura 40).
- **Producción simultánea:** impresión en espejo, crea dos piezas a la vez cada una con uno de los cabezales (ver figura 41). [21] [22]



Figura 40: Impresión de forma dual.[23]



Figura 41: Impresión en forma espejo. [23]

A continuación, se procede a comentar los elementos principales de la impresora, así como su función dentro del proceso de extrusión. Cabe destacar que como el presente proyecto trata de la tecnología FGF únicamente se proporcionará información acerca del cabezal de extrusión de pellets.



❖ Características generales de la BigFoot Pro 500

Tamaño de la impresora (mm)	860 x 720 x 810
Peso de la impresora (Kg)	82
Volumen de impresión (mm ³)	490 x 470 x 500
Volumen en impresión dual (mm ³)	475 x 450 x 500
Volumen en impresión espejo (mm ³)	250 x 470 x 500
Diámetros de boquillas (mm)	0,4 - 0,6 - 0,8 - 2,0 - 4,0 - 5,0
Resolución de capa (µm)	10
Boquilla (mm): Tamaño de capa máximo (mm)	0,4:0,3 - 0,8:0,6 - 5,0:4,1
Materiales optimizados	ABS - WOOD - PLA - PETG - PP - ASA

Tabla 5: Características generales de la BF Pro 500. [21]

Equipada con un procesador de 32 bits se asegura la estabilidad durante la fabricación de la pieza 3D además de incrementar la velocidad de impresión consiguiendo así gran eficiencia. Gracias a los innovadores drivers con los que cuenta, los movimientos que realiza durante el funcionamiento son ultra silenciosos haciendo así un entorno de trabajo agradable. Diseñada con dos puertas como cierre de seguridad que incrementa la protección del usuario en el trabajo. [21]

Impresiones de calidad gracias al uso combinado de los diferentes diámetros de boquillas con los que se puede trabajar y del software profesional Simplify3D. Se trata de un laminador diseñado para ayudar a importar un modelo desde algún software de diseño asistido (CAD) como Inventor, modificar los parámetros necesarios para su impresión (temperaturas, soportes, relleno, velocidades de extrusión, etc) y poder enviarlo a una impresora 3D como código G (conocido en inglés como G code) para llevar a cabo la impresión del objeto 3D (ver figura 42).

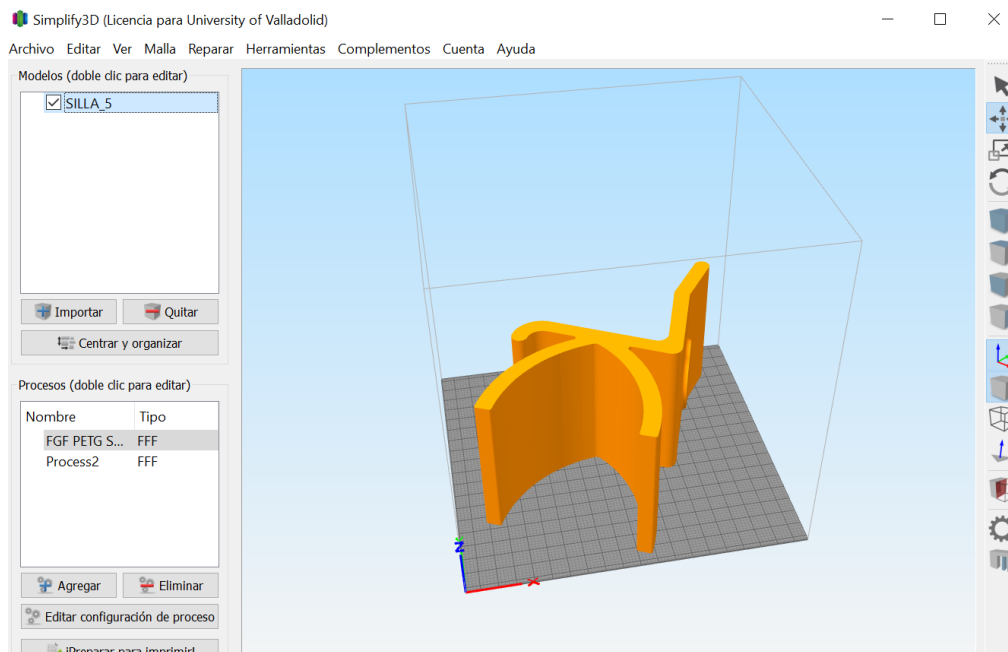


Figura 42: Pantalla principal de una pieza en Simplify 3D. [Fuente propia].

A diferencia de otros softwares de laminación, Simplify3D se ha diseñado para su uso profesional y educativo debido a su complejidad además de por su coste. Permite realizar cambios antes de la impresión real. La gran distinción de este software con respecto a otros es que da la posibilidad de dividir el modelo en diferentes partes y realizar sobre cada una de ellas las modificaciones pertinentes. Así, tiene la gran ventaja de poder ajustar el grosor, el relleno y la estructura de la superficie según sea necesario. [24]

Finalmente, cuenta con un modo de vista previa que ofrece la posibilidad de simular la impresión con el objetivo de evitar obtener piezas defectuosas. Está dotado de un código de colores que el cliente puede manipular para observar de forma más intuitiva parámetros como velocidades de impresión, soportes, etc (ver figura 43). [24]

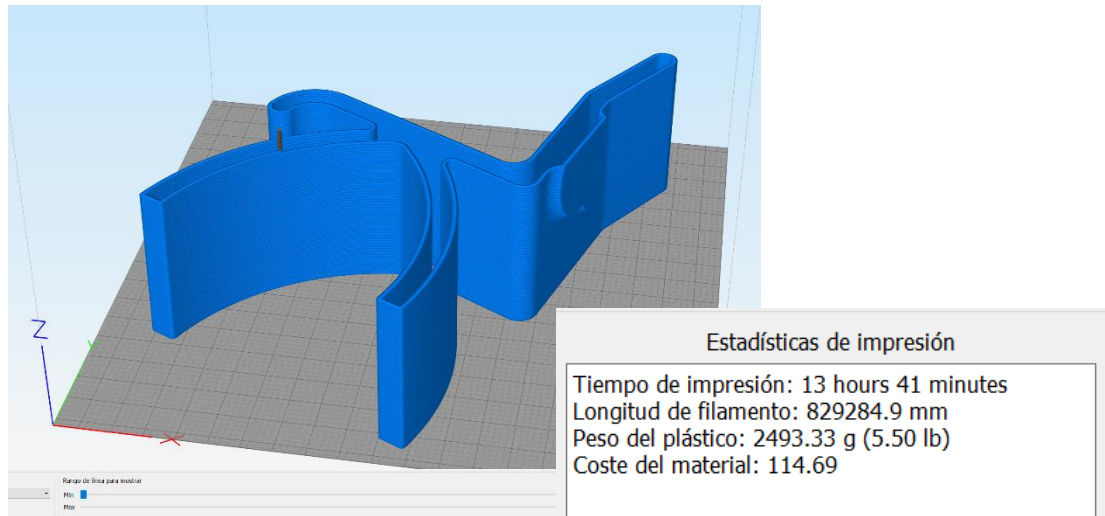


Figura 43: Simulación del proceso de impresión 3D junto con datos de interés. [Fuente propia]

❖ Panel de control

La impresora está dotada de una pantalla táctil de 5" a color (ver figura 44), así se podrá controlar a pie de campo. Además, mediante una dirección IP (modo de control: web), también se puede controlar a través de un PC, Tablet o smartphone (ver figura 45). Mediante sendos modos de control, se pueden modificar los principales parámetros de operación como son:

- Velocidad del husillo (rpm)
- Valores de las temperaturas de las dos zonas de calentamiento y de la base de impresión.
- Velocidad del sistema de ventilación (%)
- Carga y descarga de los materiales (FFF y FGF) ya que cada material cuenta con su propia configuración.
- Calibraciones de la cama de impresión.

Cabe destacar que, en todo momento, independientemente del modo de control empleado, se pueden visualizar los valores de las temperaturas en tiempo real.



Figura 44: Pantalla táctil implementada en la impresora para el control. [Fuente propia]



Capa 1 de 5, Filamento usado: 1916.7 mm (694015.7 mm restante)

Figura 45: Interfaz de la impresora para su control vía web. [Fuente propia]

❖ Tolva

Como ya se ha dicho, es la zona del sistema de extrusión por donde el material en formato de pellet accede al husillo. Generalmente, para no tener que estar pendiente del nivel de pellet restante y recargar cada cierto tiempo, se utiliza un sistema de aspiración de pellets cuya misión es transportar los pellets desde



un saco de material listo para su uso hasta la garganta del extrusor mediante gravedad.

De esta forma se sustituye la tolva por un tubo corrugado que mediante sus extremos une el material aspirado hasta su introducción en el sistema husillo – barril (ver figura 46). En dicho tubo se sitúa un sensor de nivel que es quien da la orden de aspirar más material consiguiendo así obtener piezas que requieran muchas horas sin necesidad de estar pendientes de recargar la tolva, es decir, se consigue cierta independencia impresora – operario.



Figura 46: Disposición de la tolva donde descarga el aspirador de pellets el material; Tubo corrugado que dirige el pellet al interior del sistema de extrusión. [Fuente propia]



❖ Extrusor MAHOR XYZ [25] [26]

Un extrusor de pellets es un conjunto de piezas que conforman en un solo elemento un fusor de pellets y un mecanismo de empuje. Al sustituir al conjunto extrusor – fusor (tecnología FFF), el extrusor de pellets debe de incluir todas las funcionalidades que éstos incluyen: carga de material, empuje de material hacia el tornillo sinfín, calentadores, termistores, boquilla...

Actualmente no existen muchos proyectos de extrusores de pellets en la actualidad. Un ejemplo de uno de ellos es el “pellet extruder” de Mahor XYZ (ver figura 47) que es con el que cuenta la impresora BigFoot Pro Dual 500. Ha sido bastante testeado por la comunidad maker española y existen varias reviews en Youtube. Incluye bastantes mejoras pensadas para garantizar la máxima fiabilidad como son:

- Motor de alto torque.
- Bloque calentador de alta potencia con posición regulable para garantizar un flujo óptimo para cada material y evitar atascos.
- Husillo diseñado y mecanizado especialmente para el extrusor.

Es una herramienta de calidad para empresas y makers profesionales que vayan a emplear materiales exóticos o a imprimir piezas de gran formato.



Figura 47: Extrusor Mahor XYZ. [Fuente propia]

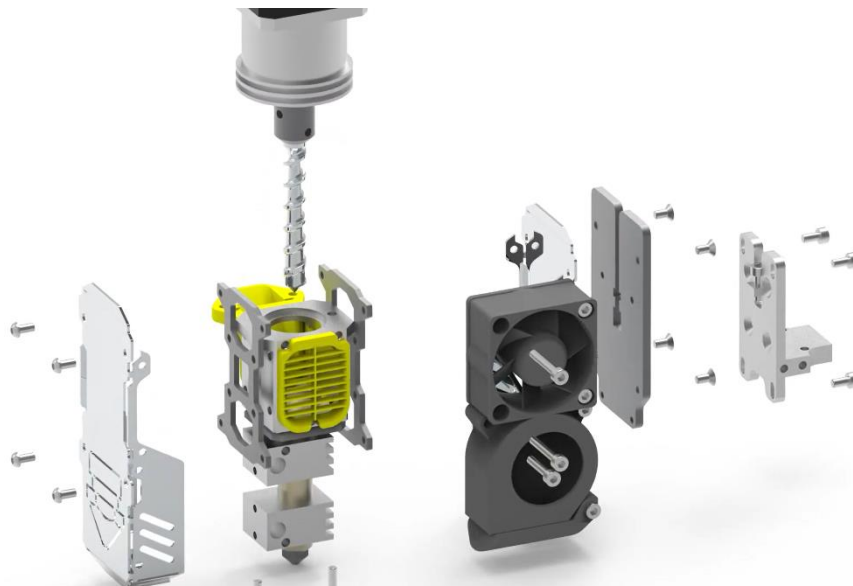


Figura 48: Despiece del extrusor de Mahor. [27]



❖ Sistemas de ventilación [28]

Como se ha dicho con anterioridad a lo largo del presente proyecto, una de las principales diferencias entre la tecnología FFF y FGF es que para el primer caso es necesario realizar un aporte de calor para la fusión del filamento polimérico justo antes de salir por la boquilla mientras que para la tecnología FGF debido a la fricción que se produce a lo largo del husillo entre éste y el material del interior del barril genera un calor que no puede considerarse despreciable.

Por este motivo, para no obtener material muy fundido al inicio del husillo y que pueda deslizar (lo que implicaría la incapacidad de generar la presión necesaria para sacar material por la boquilla), se dispone de un ventilador a la altura de la garganta del extrusor (por donde se introducen los pellets al sistema de extrusión) cuya función es retirar calor y así conseguir que la granza se encuentre en estado sólido al inicio del proceso.

El extrusor está dotado de un segundo ventilador, el ventilador de capa, uno de los componentes más importantes. Situado al final del tornillo, justo a la salida del material fundido cuyo objetivo es enfriar el “cordón” de material que va saliendo. En muchos casos donde es necesario imprimir piezas pequeñas con poca área, donde la boquilla está constantemente moviéndose en la misma zona, provoca que se genere un exceso de temperatura que reblandece la pieza provocando la deformación de ésta (ver figura 49).



Figura 49: Pieza impresa sin ventilador de capa (izqda) frente a una en la que se ha usado ventilador de capa (dcha). [28]

Cabe destacar que, al comienzo de una impresión, es importante que haya una buena adhesión de la primera capa a la base de impresión para que no se despegue durante la fabricación y por ello el ventilador de capa debe de estar apagado generalmente durante las dos primeras capas. Una vez que ya la impresión ha cogido cierta altura, se debe de ajustar la velocidad del ventilador de capa (viene dada en porcentaje) en función de la geometría de la pieza. Para el caso de FGF, al tratarse de piezas grandes y voluminosas con tiempos de capa elevados (del orden de 10 minutos) el ventilador de capa pierde algo de importancia, aunque suele estar activado en torno al 40% de su velocidad máxima (ver figuras 50 y 51).

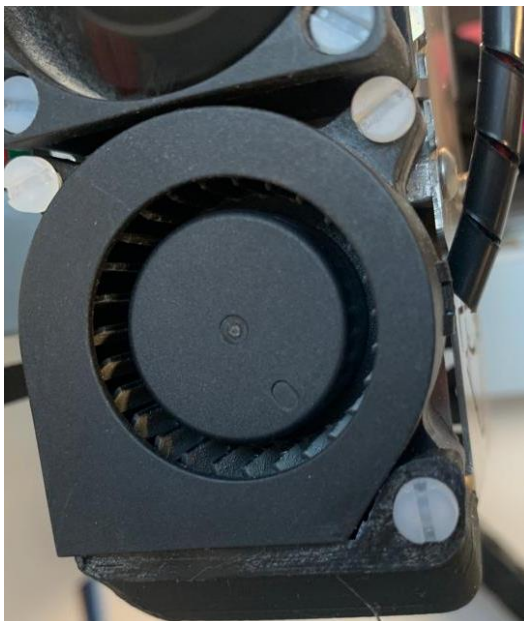


Figura 50: Ventilador de capa visto por la parte exterior. [Fuente propia]

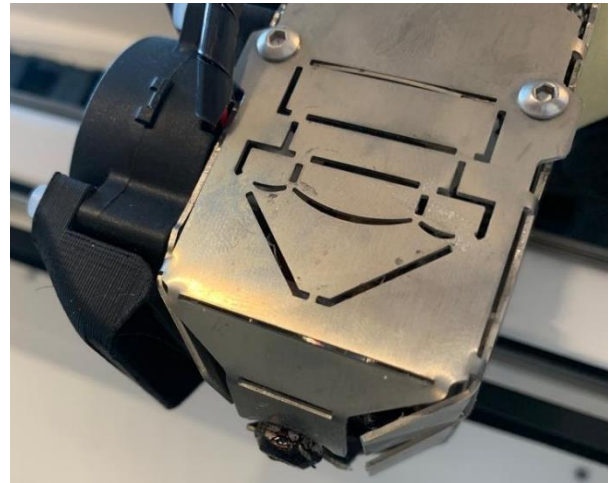


Figura 51: Ventilador de capa visto desde la zona interior. [Fuente propia]

❖ Cama/base de impresión [29]

La principal función es conseguir buena adhesión de la pieza a la base de impresión durante su fabricación mediante su calentamiento a una determinada temperatura (a elección del usuario, aunque depende en gran medida del material a extruir) y que, al finalizar el proceso, la cama se enfríe para poder despegar el objeto 3D (ver figura 52). En muchas ocasiones para mejorar la adhesión se utiliza laca.



Figura 52: Zona de calentamiento de la base de impresión. [Fuente propia]

2.2. PARÁMETROS PRINCIPALES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO

A continuación, se procede a explicar los principales parámetros que influyen en el proceso de extrusión mediante tecnología FGF como son el parámetro E, las dimensiones del cordón de material, las temperaturas y las velocidades del pórtico.

2.2.1. Parámetro E

El parámetro E es el equivalente a los pasos/mm de una impresora de filamento, es decir, en el caso de la de filamento los pasos por milímetro indican cuántos pasos tiene que dar el motor del extrusor para hacer avanzar un milímetro de filamento.

En el caso de la de pellet no es tan visual, pero es lo mismo, indica los pasos que tiene que dar el motor para extruir una cierta cantidad de material. En este caso no son pasos por mm porque no es un filamento lineal, pero se puede entender como los pasos que tiene que dar el motor para extruir un volumen determinado de material en un tiempo dado (caudal).

En el caso de una impresora de filamento este parámetro es el mismo para todos los materiales porque sólo depende del ángulo girado por cada paso del motor, del factor de reducción de la reductora del mecanismo de extrusión (en el caso de tener reductora) y de la geometría del eje dentado que empuja el filamento, que no cambian de un material a otro.



En el caso de la impresora de pellet es más complicado porque además de depender de parámetros propios del extrusor como los anteriores (ángulo/paso del motor, mecanismo de reducción y geometría del tornillo), también depende del tipo de material, de la geometría de los granos de ese material (por los huecos que pueda haber entre ellos), de las temperaturas que se configuren (que hacen que el material se extruya con mayor o menor facilidad), etc. Por eso hay que configurarlo para cada material y formato de pellet individualmente.

Lo complicado de este asunto es conseguir el valor de E óptimo que, junto con el resto de las variables de proceso (velocidad, temperaturas, etc.), sea capaz de aportar el material necesario en cada momento para conseguir “rellenar” el volumen de chorro requerido teniendo en cuenta la capacidad del motor del extrusor. Es decir, este parámetro es quien va a relacionar la velocidad de impresión con el caudal necesario para unas dimensiones del chorro dadas, por lo que está íntimamente relacionado con la velocidad angular (w) del husillo.

En caso de trabajar con filamento, el control a la salida es más simple. Se trata de una rueda dentada que irá empujando el filamento una distancia X mm (**ver figuras 53 y 54**). De esta forma, dicha distancia se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$w \cdot R = X \quad \text{Ec. (2)}$$

$$X = v \cdot t \quad \text{Ec. (3)}$$

Siendo w la velocidad angular de la rueda dentada (rps), R el radio de la rueda dentada (mm), X la distancia recorrida por el material (mm), v la velocidad a la que se mueve el filamento (mm/s) y t el tiempo (s) que está arrastrando el material por medio de la rueda dentada.

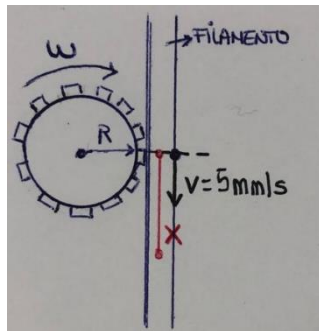


Figura 54: Esquema del mecanismo de empuje en la tecnología FFF. [Fuente propia]

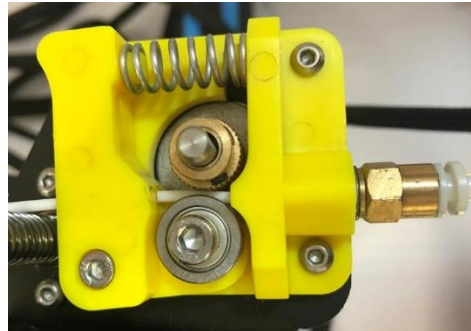


Figura 53: Mecanismo de empuje del filamento en FFF. [Fuente propia]

Como ya se ha dicho anteriormente, en el caso del pellet es más complicado, pues no se puede hablar de pasos/mm porque no se trata de un filamento. Se sabe que dicho parámetro está relacionado con la cantidad de material depositado de manera lineal, de tal forma que a medida que se aumenta E, aumenta la cantidad de material que deposita.

Más adelante, en el apartado 2.3. se explicará el procedimiento a seguir para obtener el valor del parámetro E óptimo. El truco consiste en tratar de conseguir una velocidad de flujo de material constante, en la que dicho material esté a una temperatura que se funda y se adhiera bien a las capas anteriores pero que también sea lo suficientemente rígido como para mantenerse durante toda la fabricación de la pieza. Las revoluciones del tornillo deben coincidir con una cierta velocidad del pórtico del extrusor para conseguir la anchura deseada del cordón.

Es importante destacar que el flujo constante que se quiere obtener se consiga sin que el motor paso a paso que hace girar al husillo salte pasos. Aquí es donde cobra importancia la intensidad transmitida al motor, así como el par que es capaz de generar con el fin de empujar los pellets hacia la boquilla.

2.2.2. Dimensiones del cordón: anchura y altura de capa [17]

Tanto la precisión de la anchura del cordón como de la altura de capa son los parámetros más importantes en cuanto a la exactitud dimensional. Lo que realmente dictará la dimensión de la pieza y las tolerancias es la precisión con la que el operario pueda marcar las variables críticas ya numeradas al inicio de este apartado.

Con las máquinas y materiales de código abierto (de acceso público), uno de los problemas más comunes a la hora de conseguir unas tolerancias adecuadas es no ajustar la anchura del cordón y la altura de capa al grosor de la pared y la altura de la pieza.

Es importante asegurarse de que la anchura del cordón es menor que el grosor de la pared de la pieza y se considerará optimizada si puede asegurarse que la anchura del cordón es un número divisible por su grosor de pared. Por ejemplo, si se intenta imprimir con una boquilla de 1 (mm) de diámetro, y el grosor de la pieza es de 0,4 (mm), corre el riesgo de que la trayectoria de la herramienta se pierda completamente esta sección durante la impresión. El software de hoy en día no es lo suficientemente inteligente como para alertar al usuario de dicho error.

Otra opción es imprimir cordones más pequeños que el propio diámetro de la boquilla, pero lo que en realidad se está haciendo es lo que se denomina sub-extrusión (ocurre al seleccionar una velocidad del pórtico demasiado alta para la velocidad de giro del extrusor que se traduce en una reducción de las dimensiones del cordón que se habían planeado, el hecho contrario se llama sobre-extrusión) (ver figuras 55 y 56).

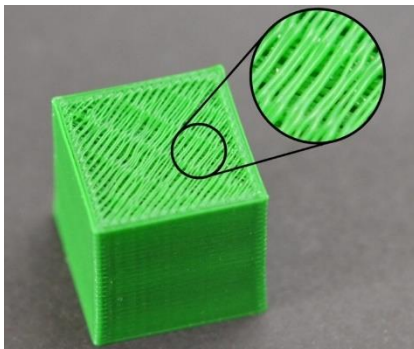


Figura 55: Ejemplo de sub-extrusión. [30]



Figura 56: Diferentes tipos de sobre-extrusión. [31]

Algo similar ocurre con la altura de capa, considerada como una variable fija. La impresora se mueve en dos dimensiones (de izquierda a derecha y de adelante a atrás), y después, para realizar la siguiente capa se moverá la placa de impresión hacia abajo. La altura de capa se derivará en primera instancia a partir del diámetro de boquilla seleccionada. Generalmente suele utilizarse entre el 60-80 (%) del diámetro. Por ejemplo, si se tiene una boquilla de 1 (mm), una primera aproximación de la altura de capa será 0,6 – 0,8 (mm) aunque



luego se tratará de que dicha altura de capa sea un número divisible de la altura total de la pieza.

2.2.3. Temperaturas de extrusión

Como ya se ha dicho, el truco consiste en conseguir una velocidad de flujo de plástico constante a la que el material esté a una temperatura que funda y se adhiera bien a las capas anteriores.

Los fabricantes de filamentos y pellets suelen proporcionar información acerca del material adquirido en la que constan parámetros como el índice de fluidez (MFI) que se comentó en el estado de la técnica y un rango de temperaturas de extrusión como guía, entre otros datos. Es prácticamente imposible proporcionar una temperatura exacta a utilizar ya que cada fabricante de impresoras 3D utiliza equipos y sensores de temperatura distintos que proporcionan lecturas diferentes.

Para evitar la degradación del material, es inteligente empezar por el extremo inferior del rango proporcionado. Al probar para diferentes temperaturas se buscará un flujo constante que muestre un diámetro consistente. En caso de que el material parezca demasiado delgado tras la extrusión o incluso si el material gotea desde la boquilla a la cama de impresión, es posible que esté demasiado caliente y sea necesario enfriarlo.

Más en concreto, el extrusor de la impresora BigFoot 500 cuenta con dos zonas de calentamiento por medio de dos termorresistencias (ver figuras 57 y 58) y cada una de ellas cuenta con un sensor de temperaturas que nos indica la temperatura en tiempo real en la pantalla que tiene equipada.

Se denomina “Input temperature” a la temperatura de calentamiento de la zona de entrada de material, es decir, a la zona más alejada de la boquilla. Por otro lado, “Output temperature” a la zona de calentamiento próxima a la salida de material por la boquilla. Como norma general, la primera de ellas es más baja que la segunda por lo que se ha explicado de que al inicio del husillo no es bueno tener ya el material fundido y sea una transición física de sólido a fundido paulatina.

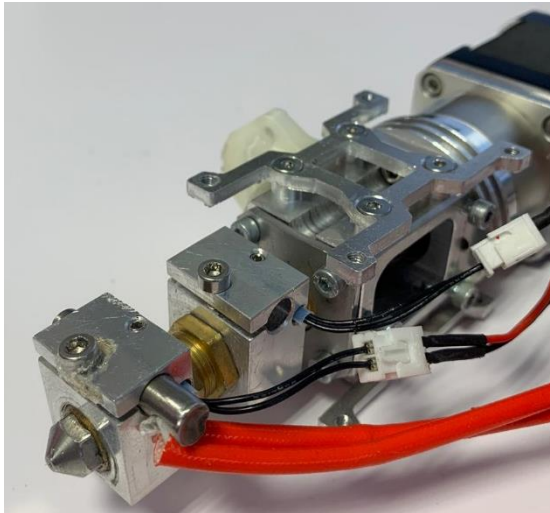


Figura 57: Localización de las termorresistencias en el extrusor. [Fuente propia]



Figura 58: Termorresistencia. [Fuente propia]

Hay que tener cuidado de no calentar de forma inadecuada el material o de dejarlo demasiado tiempo a altas temperaturas. En caso de FFF, debido a la pequeña sección de calentamiento el plástico es menos probable que se degrade. Sin embargo, en FGF, es mucho más fácil y se traduce en malos resultados, pérdidas de dinero, así como tener la máquina parada todo un día.

2.2.4. Velocidad del pórtico o velocidad de la herramienta [17]

Tras haber conseguido un flujo de material óptimo, la selección de las velocidades del pórtico determinará la precisión final del ancho del cordón y por tanto de la calidad superficial final de la pieza.

Si la velocidad de la herramienta es demasiado alta con respecto al caudal que sale por la boquilla, se obtiene un ancho de cordón inferior al deseado. En caso de tener una velocidad inferior a la óptima, la anchura del cordón será superior. Por ello cabe destacar la importancia de llegar a un equilibrio entre el caudal de material y la velocidad.



2.3. CALIBRACIÓN DEL CAUDAL

Cabe destacar la importancia que se ha ido dando a lo largo del desarrollo de este presente Trabajo de Fin de Grado acerca de la calibración del caudal como un equilibrio entre la velocidad de giro del husillo, el intervalo de temperaturas de extrusión y la velocidad lineal del pórtico. En este apartado se mostrará el procedimiento seguido para llevar a cabo dicha calibración.

Este proceso se realizó con un material compuesto por una matriz polimérica de ácido poliláctico (PLA) con un porcentaje en fibra de madera del 20%. La hoja técnica de datos de dicho material (en inglés: technical data sheet, TDS) se puede encontrar en el anexo 1.

El PLA es un biopolímero perteneciente al grupo de los termoplásticos formado a partir del proceso de polimerización del ácido láctico. Una de sus características principales que lo distingue en gran medida del resto de polímeros plásticos es que es sintetizado a partir de materias primas naturales como el almidón o la caña de azúcar (ver figura 59). [32]

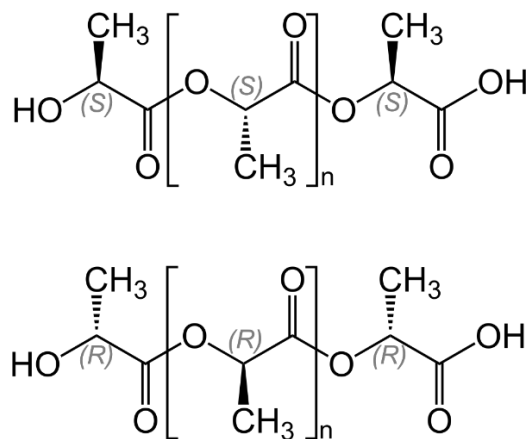


Figura 59: Estructura del ácido poliláctico (PLA). [33]

En primer lugar, se realizaron varias pruebas de extrusión en vacío (extrusión de material sin apoyar sobre la cama de impresión, véase figura 60) con este material en un rango de temperaturas cercano a lo que recomiendan en la TDS (200°C aproximadamente).

A la hora de establecer las temperaturas de las dos zonas de calentamiento, se recomienda que la temperatura output que se establezca sea la recomendada por el fabricante mientras que, la temperatura input, suele ser



50-80 °C menor que la recomendada por el fabricante (se recuerda que las temperaturas proporcionadas por el fabricante son aproximadas). [34]

A continuación, establecer los pasos aproximados del motor (parámetro E). Una vez seleccionadas las temperaturas y los pasos del motor, se irá extruyendo de forma manual material hasta que salga por la boquilla. En el caso de que el motor perdiera pasos, ir subiendo poco a poco la temperatura input hasta que salga material sin que el motor salte pasos. Normalmente esta última temperatura suele ser menor que el output. [34]

Para este caso, las temperaturas fueron:

- T^a input (al inicio del tornillo extrusor): 200 (°C).
- T^a output (a la salida, en la boquilla): 220 (°C).

Con las temperaturas de las dos zonas de calentamiento ya escogidas, también en vacío, se ha llevado a cabo la extrusión de material durante dos minutos de manera constante para diferentes valores del parámetro E.

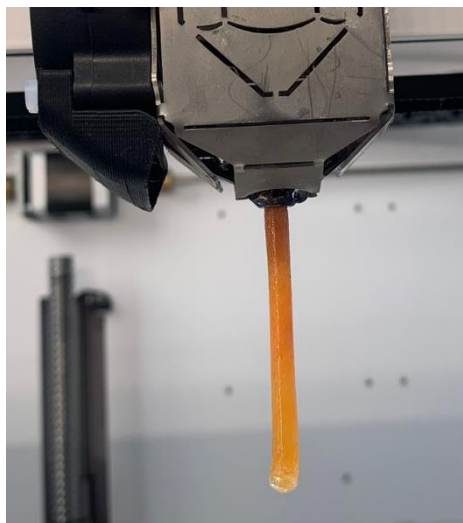


Figura 60: Extrusión en vacío. [Fuente propia]

Así, se van a ir obteniendo diferentes “cordones” extruidos de material que posteriormente serán pesados en una balanza (ver figura 61). De este modo se ha llegado a la conclusión de que, a mayor valor de E, para un mismo tiempo (en este caso 2 minutos) se extruye mayor cantidad de plástico [44], manteniéndose así una relación lineal (los resultados se muestran en el siguiente apartado).



Figura 61: Pesada del cordón de material tras la extrusión en vacío. [Fuente propia]

Como al aumentar el valor de E aumenta la cantidad de material extruido, este parámetro está íntimamente relacionado con la velocidad angular (w) del husillo. A partir de las **ecuaciones (2) y (3)**, se sabe que:

$$w = \frac{X}{R} = \frac{v \cdot t}{R} \quad \text{Ec. (4)}$$

Y dicha ecuación, por física es así y siempre se cumple. Es por ello que el valor de E es un factor de multiplicación de la velocidad angular (w) de modo que:

$$w = \frac{X}{R} \cdot E = \frac{v \cdot t}{R} \cdot E \quad \text{Ec. (5)}$$

Para que se cumpla, E tiene que tender al valor de 1 ($E \rightarrow 1$) que será el óptimo. Para ello, una vez conocidos los pesos de los cordones de material extruido en función del valor de E , se deben de comparar los valores experimentales con los teóricos.



El peso teórico se obtiene a partir de la densidad ρ (kg/m^3) y el volumen del cilindro de material plástico que ha sido extruido.

El volumen de material se obtiene a partir de:

$$V = \pi R^2 \cdot h = \pi R^2 \cdot v \cdot t \quad \text{Ec. (6)}$$

Siendo V el volumen del cilindro (mm^3), R (mm) el radio del cordón extruido (coincide con el valor del diámetro de la boquilla), h (mm) la longitud del cordón extruido que es igual a $v \cdot t$ ya descritos anteriormente.

El caudal (Q) se puede conocer a partir de:

$$Q \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right) = a \cdot b \cdot \frac{L}{t} = a \cdot b \cdot v' \quad \text{Ec. (7)}$$

Siendo a (mm) el ancho de línea, b la altura de capa (mm), L la longitud del cordón (mm) y t el tiempo de extrusión (s). El término V' es la velocidad (mm/s) a la que sale el material polimérico por la boquilla (no la velocidad a la que gira el husillo) que es proporcional al parámetro E y por consiguiente a la velocidad angular w . A continuación, se muestra una imagen de dichos parámetros (figura 62).

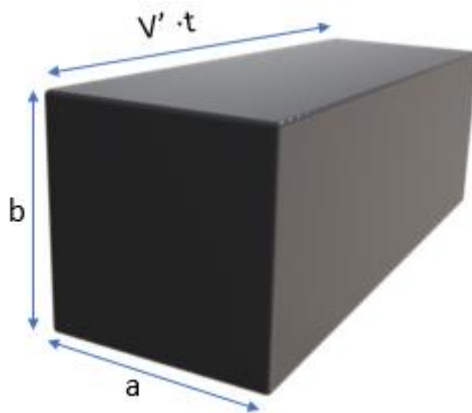


Figura 62: Nomenclatura de las
dimensiones del cordón de material.
[Fuente propia]



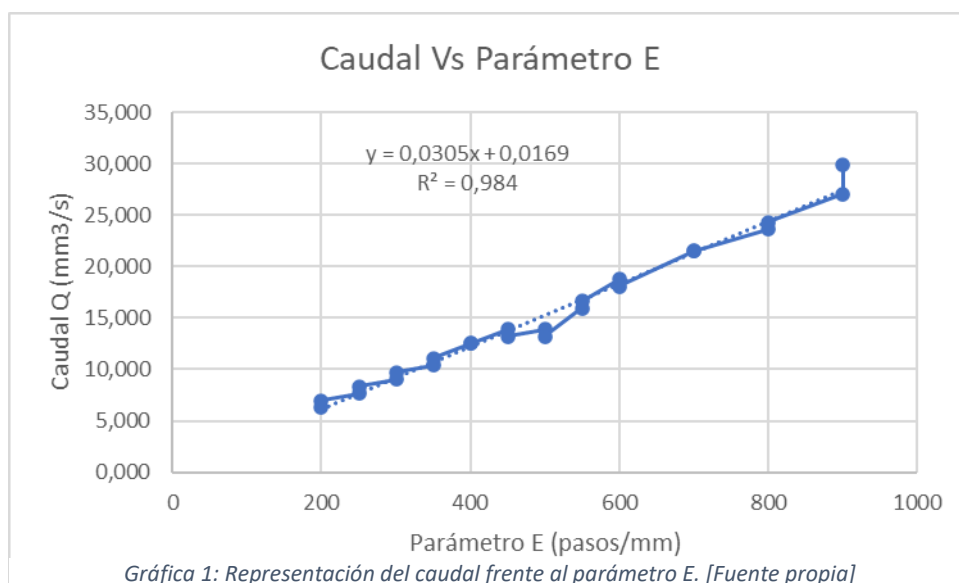
Se realiza este experimento hasta llegar a un valor del parámetro E en el cual, el motor paso a paso que acciona el husillo salte pasos. Esto significará que, para esos valores de temperaturas, es tal la velocidad a la que se debe mover el husillo que no da el tiempo necesario a que los pellets alcancen cierta temperatura y comiencen a fundir.

2.3.1. Análisis de los resultados

El material que se ha utilizado para este análisis es UPM Formi 3D 20/19. Consiste en una matriz polimérica de PLA al que le han añadido fibra de madera (20%) con el objetivo de obtener mejor resistencia mecánica, así como obtener un material cuya estética simule el mobiliario fabricado en madera.

El PLA es un plástico biodegradable debido a su origen natural (se puede encontrar en el maíz, en la patata o en la caña de azúcar). Las piezas obtenidas en 3D son fáciles de post-procesar ya que pueden ser lijadas, pulidas e incluso pintadas. Se suele usar para prototipado, objetos de decoración y figuras, maquetas de arquitectura o piezas de gran envergadura. [35]

Llevado a cabo el experimento de las pesadas en balanza de los diferentes cordones extruidos para diferentes valores del parámetro E se ha corroborado que un aumento de dicho parámetro se traduce en un aumento de caudal de forma lineal (ver gráfica 1).





Se generó una matriz en Excel para la recogida de los gramos pesados en un rango de valores del parámetro E desde 200 hasta 900 (pasos/mm). Se pudo comprobar que para el valor más alto (900), el motor del husillo apenas saltó algún paso. Así, se escogió el valor de E = 900 (pasos/mm) cuya pesada fue de 4'20 (g) (Para cada valor de E se realizaron dos experimentos y como resultado final se realizó la media aritmética). Todos los datos recopilados en este ensayo se pueden observar en el anexo 2.

A partir del valor de la pesada, el tiempo de extrusión y la densidad, se obtiene el caudal como se muestra en la siguiente ecuación (tener en cuenta las unidades):

$$\frac{\text{Gramos pesados (g)}}{\text{tiempo de extrusión(s)}} = \frac{4'20g}{120s} = \frac{3'50 \cdot 10^{-5} \left(\frac{kg}{s}\right)}{1200 \left(\frac{kg}{m^3}\right)} = 2'92 \cdot 10^{(-8)} \left(\frac{m^3}{s}\right) = 29'17 \left(\frac{mm^3}{s}\right) = Q$$

Una vez conocido el caudal, conociendo las dimensiones del cordón (ancho de línea, a, y altura de capa, b) que se requieran, elegidas por el usuario y por medio de la ecuación 7, se despeja la velocidad a la que se debe de mover el cabezal de extrusión.

a (mm)	b (mm)	V. Ext (mm/s)	E	Q (mm3/s)
2	4	3,5	900	28,00

Figura 63: Obtención del caudal en función de las dimensiones del cordón que se desee.
[Fuente propia]

Como se puede ver en la imagen anterior, la velocidad del cabezal de extrusión es demasiado baja con respecto a las utilizadas en la tecnología FFF (30 – 50 mm/s). Una de las principales razones es el tamaño del material, al ser pellets grandes, le costará más al extrusor empujarlos hacia la boquilla (tendencia a saltar pasos). En las especificaciones de la impresora 3D recomiendan usar pellets circulares de entre 3 y 5mm. En este caso, las dimensiones que tienen se observan en la figura 64:



Figura 64: Medida de un pellet de material usado en este ensayo. [Fuente propia]

A pesar de ser una velocidad baja, cabe destacar que se está trabajando con una boquilla de 5 mm mientras que, generalmente, con FFF se utilizan boquillas de 0,4 y 0,8 mm. Es por ello por lo que, al usar una boquilla tan grande, los tiempos de impresión se ven reducidos del orden de horas. Se muestra un ejemplo a continuación (ver figuras 66 y 65):

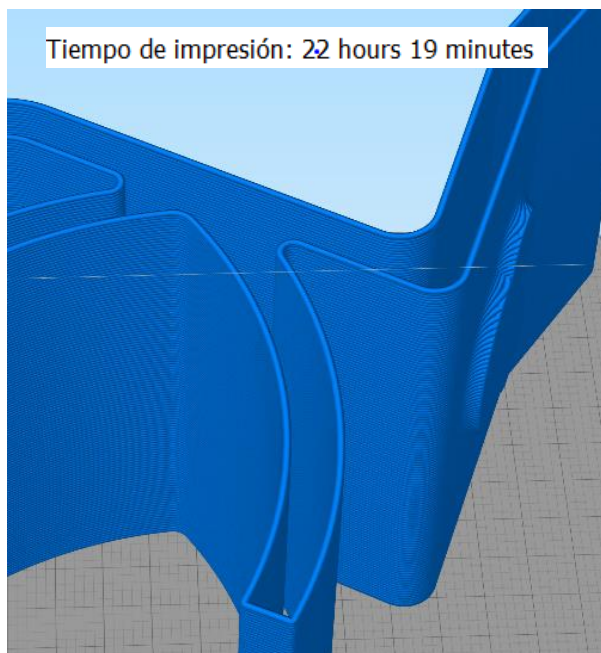


Figura 66: Simulación de la impresión de un objeto 3D a velocidad de 3,5 mm/s con una boquilla de 5mm con FGF y tiempo de impresión. [Fuente propia]

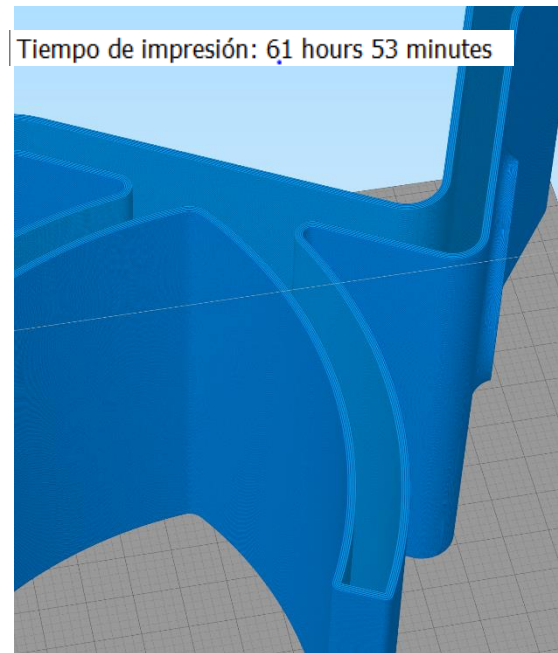


Figura 65: Simulación de la impresión de un objeto 3D a velocidad de 30 mm/s con una boquilla de 0,8 mm con FFF y tiempo de impresión. [Fuente propia]



Se imprimieron piezas de prueba con los parámetros obtenidos y uno de los principales problemas que se encontró es que el motor que acciona el husillo saltaba muchos pasos, cosa que no ocurría en las extrusiones en vacío durante los dos minutos. Este hecho hacía que la calidad de las piezas no fuese buena. Se transmitió este hecho a los fabricantes de la impresora y como solución nos propusieron lo que se va a comentar a continuación.

Se nos informó que, al tener una boquilla de 5 mm, ya de por sí para ser capaz de sacar el material por una boquilla tan grande el propio motor estará girando muy deprisa y si se trabaja con una altura de capa grande o a velocidades altas, posiblemente no transcurra el tiempo suficiente para fundir el plástico a este flujo en concreto. Para sumar variantes a este caso, nos recomendaron utilizar el perfil de configuración del material “advanced” que permite modificar más parámetros que con la configuración básica. Se pueden ajustar parámetros como el amperaje al motor e incluso reducir los micro pasos del motor obteniendo así mayor par para poder mover con más fuerza los materiales al ser extruidos.

En primer lugar, calentar el cabezal a la temperatura de fusión recomendada por el proveedor de material (en caso de ser temperaturas por encima de 260°C mantener al menos cinco minutos el cabezal caliente antes de comenzar a imprimir). Utilizar el parámetro de “multiplicador de extrusión” para regular el caudal. Los valores de éste suelen rondar entre 2 y 3 para materiales comunes. En caso de tener pellets con formas y tamaños irregulares serán más difíciles de calibrar y podrán apreciarse irregularidades en el caudal por lo que también en el aspecto final de la pieza. Es importante destacar que la temperatura de fusión puede afectar en el caudal en mayor o menor medida en función del material con el que se trate.

El siguiente paso es diseñar un cilindro de 60 mm de diámetro y 60 mm de alto (las dimensiones del cubo varían en función del diámetro de la boquilla) totalmente sólido por diseño, pero a la hora de imprimirlo sólo se hará el contorno/perímetro del cubo. Una vez impreso (véase figura 67), se mide una de las paredes, si el grosor no corresponde con el diámetro de la boquilla hay que modificar el multiplicador de extrusión de forma proporcional para acercarse al diámetro e la boquilla. Repetir este proceso hasta acercarse al valor con un error de ± 1 mm. [43]



Figura 67: Cilindro impreso para la calibración del caudal. [Fuente propia]

Una vez logrado se imprime una moneda de 2€ que, para nuestro caso, al usar una boquilla de 5 mm, se ha escalado el diseño hasta un 300%. Se usan los parámetros seleccionados como óptimos y se imprime con 100% de relleno. Tras la impresión de la moneda, hay que ver si cierra bien la parte superior y no rebosa material, es decir, la pieza cuenta con un buen acabado (ver figura 68).

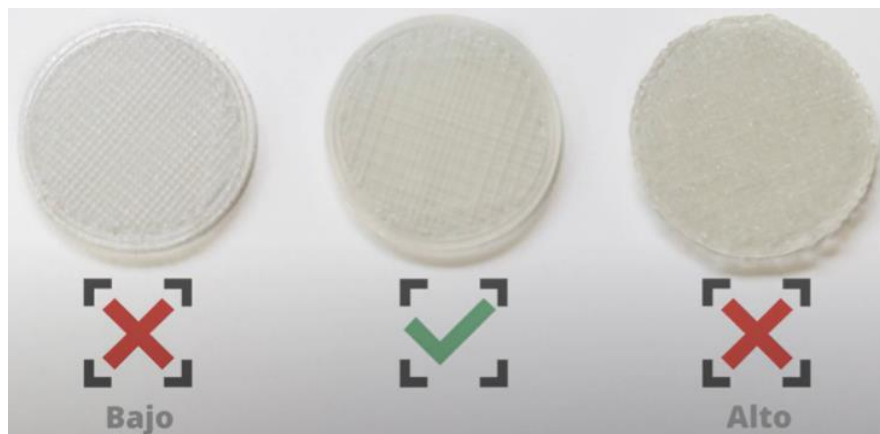


Figura 68: Prototipos para comparar las impresiones para conocer si la calibración es correcta. []

Algún ejemplo acerca de la calibración del caudal mediante la impresión de monedas puede observarse a continuación en la figura 69:



Universidad de Valladolid

Análisis de los parámetros del proceso de
impresión 3D FGF. Aplicación a la fabricación de
mobiliario.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Figura 69: ejemplos realizados en el laboratorio para conocer el caudal correcto. [Fuente propia]

Tras la realización de estos procedimientos, se considerará que el material estará calibrado.



CAPÍTULO 3: ENSAYOS MECÁNICOS

Por lo general, dos de las principales preocupaciones en los materiales que tienen gran influencia en la imprimibilidad y en la deformación durante el proceso de impresión 3D a gran escala son la contracción y la adhesión de las capas.

Respecto a la primera de ellas, se sabe que la impresión 3D se realiza en un espacio abierto y, por lo tanto, no hay nada que limite la deformación del material una vez que ya se ha depositado. Aunque el material se asienta en caliente, se enfría gradualmente con el proceso. Todos los materiales encogen un poco, pero cuando dicha contracción es excesiva, la deformación puede superar ciertos límites que se traduce en un aumento de la dificultad a la hora de trabajar con el material.

De cara al problema de la adhesión entre capas, éstas se colocan una encima de la otra en sentido ascendente en la dirección Z y durante la fabricación de las piezas 3D es importante colocar la nueva capa sobre la anterior y que aún esté relativamente caliente. Esto se debe a que, si se encuentra demasiado caliente, puede ser una masa de plástico demasiado líquida que provocaría una deformación no deseada por su propio peso. Al mismo tiempo, el material no debe estar demasiado frío, pues las capas deben de fusionarse (la adhesión entre capas se favorece a mayor temperatura) para conseguir buenas características mecánicas del material.

En la impresión 3D a gran escala, los cordones de plástico situados uno encima de otro, están calientes y tienen mucha masa. Es por ello por lo que la capa anterior se calienta en cierta medida. Por supuesto que depende del tamaño de los cordones, en definitiva, del tamaño del diámetro de boquilla que se esté utilizando. Cuando se imprime con unas dimensiones del cordón de 4 mm de ancho y 1'5 mm de altura de capa es mucho más crítico que si se imprime con 20 mm de ancho y 4 mm de alto.

Al final, ambos retos para evitar la deformación durante la extrusión se afectan mutuamente. La contracción se reduce aumentando el relleno (como son las fibras), sin embargo, cuanta más fibra, se tiene menor matriz polimérica.

Al observar la adhesión de las capas, las fibras no se cruzan con las de la capa anterior, ya que están bastante alineadas con la dirección de la impresión (dirección del movimiento de la boquilla). Esto significa que cuando un material se rellena por ejemplo con un 50% de fibra, sólo queda un 50% de matriz



polimérica que es quien se encarga de cuidar la adhesión entre las capas. Por otro lado, si un material no cuenta con relleno de fibras, es decir, es una matriz polimérica del 100% la que se encarga de la adhesión, entendiéndose que dicho material tendrá mejores resultados que si sólo contase con un 50%.

Esto es lo que finalmente provoca las grandes diferencias entre la resistencia y rigidez en el plano XY frente al plano XZ, donde en XY para materiales de mayor resistencia puede llegar al rango de 100 – 200 MPa que, a diferencia del plano XZ a menudo sólo alcanzan un 20% de dicho rango. Las resistencias típicas de los termoplásticos sin fibras son mucho más bajas que se traduce en que los valores en XZ son inferiores a los de XY.

3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo el estudio de la adhesión en Z, se han realizado ensayos a flexión de lotes impresos con diferentes parámetros ya estudiados recogidos en la tabla 6 que se muestra a continuación:

LOTE Nº	T _{INPUT} (°c)	T _{OUTPUT} (°c)	E (pasos/mm)	VENTILADOR CAPA (%)
1	190	210	400	75
2	215	230	400	75
3	225	245	400	75
4	190	210	450	75
5	215	230	450	75
6	225	245	450	75
7	190	210	400	25
8	215	230	400	25
9	225	245	400	25
10	190	210	450	25
11	215	230	450	25
12	225	245	450	25

Tabla 6: Matriz de datos de los parámetros escogidos para la realización de los lotes que se van a ensayar.
[Fuente propia]

Cabe destacar que dichos ensayos se han efectuado con un material distinto a los que se han llevado a cabo en el apartado anterior para la calibración del caudal por temas de confidencialidad. En este caso se han usado pellets de PET-G (en el anexo 3 se puede consultar su TDS) con el que previamente ya se realizó el calibrado del caudal de la forma en la que se ha explicado en el presente Trabajo de Fin de Grado.

Como se ha comentado al inicio de este apartado, las temperaturas entre la capa que se está imprimiendo y la anterior tiene gran influencia respecto a las propiedades mecánicas en la dirección del eje Z. Es por ello por lo que para tener un mejor control de las temperaturas se ha realizado el seguimiento de la fabricación de los lotes con una cámara termográfica.

En este caso se ha utilizado la cámara IR compacta Xi 400 (véase figura 70) con localizador de puntos. Es un generador de imágenes compacto con enfoque motorizado que permite controlar cómodamente la nitidez desde la distancia. Mide con seguridad temperaturas entre -20 y 1500 °C. Otro tipo de características están recogidas en la hoja de datos técnicos que se puede encontrar en el anexo 4. [36]



Figura 70: Cámara termográfica Optris Xi 400. [37]

Este tipo de cámaras proporcionan imágenes térmicas que permiten visualizar cómo irradia calor un objeto, registrando la temperatura de cada pixel de la imagen, y asignando a cada pixel un tono de color (ver figuras 71 y 72). De forma general, para las zonas más frías se usan colores como el azul o el violeta y para las regiones con mayor temperatura se les asignan tonos rojos, anaranjados o amarillentos. Las cámaras térmicas detectan la temperatura capturando diferentes niveles de luz infrarroja, invisible para la vista humana, que es irradiada por los objetos. Cuanto más caliente está un objeto, más radiación infrarroja emite. [37]

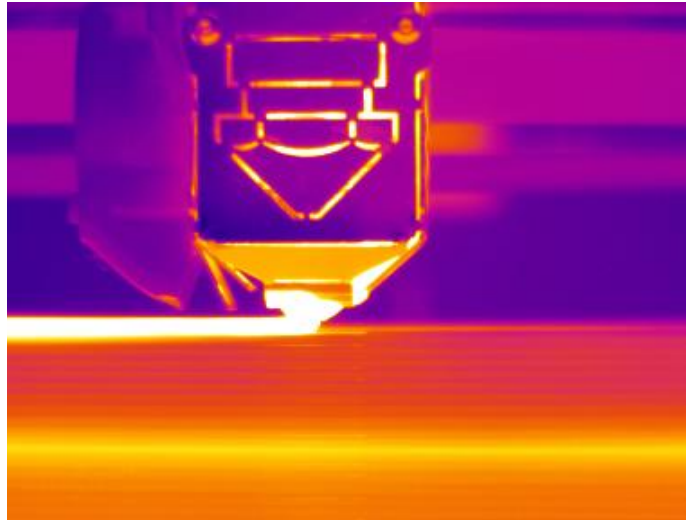


Figura 71: Vista desde la cámara termográfica de las capas al inicio, cercanas a la cama de impresión. [Fuente propia]

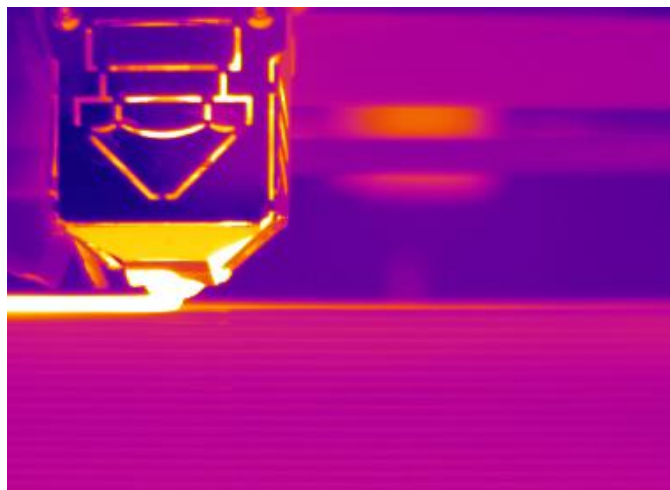


Figura 72: Vista desde la cámara termográfica de las capas finales de la impresión. [Fuente propia]

Los lotes impresos constan de un prisma rectangular de las siguientes dimensiones: 300 x 60 x 80 (mm). En la figura 73 se muestra un ejemplo de uno de ellos.



Figura 73: Lote impreso. [Fuente propia]

A partir de dicho prisma se han mecanizado un total de 27 probetas. De cada lote se han medido la anchura y el espesor de 5 probetas tras el ensayo de las cuáles se ha realizado el promedio de las medidas con el objetivo de reducir el tiempo empleado para los ensayos.

El banco de ensayos que se ha utilizado para estos experimentos se muestra en la figura 74.



Figura 74: Banco de ensayos para la flexión a 3 puntos. [Fuente propia]



3.1.1. Principio del método [38]

La probeta de sección rectangular, que descansa sobre dos soportes (apoyos), se flexiona con un elemento de carga que actúa sobre el punto medio de la probeta entre los apoyos. La probeta se flexiona así a una velocidad constante hasta que rompa o alcance un máximo de deformación. Durante el procedimiento, se mide la fuerza aplicada sobre la probeta y la flecha resultante de la probeta en el punto medio.

Cabe destacar que, en este ensayo de flexión a 3 puntos, la probeta va a estar sometida tanto a tracción como a compresión. Pues el lado de la probeta situado más cerca del elemento de carga sufrirá compresión mientras que la zona lateral que apoya sobre los soportes se estirará y estará sometido a tracción. Debido a la diferencia de propiedades en función de la dirección, estos ensayos están destinados a observar la tendencia del comportamiento del material. Además, las ecuaciones utilizadas para calcular las tensiones y deformaciones están simplificadas a través de hipótesis que no se cumplen para grandes deformaciones como es este caso.

En este caso, debido a la anisotropía, las probetas deben elegirse de tal forma que el esfuerzo a flexión será aplicado en la misma manera y dirección a la que estarán sujetos los productos durante su uso, en caso de conocerse. La relación entre la probeta y el producto final previsto determinará la viabilidad de utilizar probetas normalizadas.

3.1.2. Esfuerzo de flexión

El esfuerzo de flexión es aquel esfuerzo nominal de la superficie externa de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Se expresa en megapascales (MPa). Dicho parámetro se calcula a partir de la ecuación 8:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad \text{Ec. (8)}$$

donde σ_f (MPa) es el parámetro de esfuerzo a flexión, F (N) es la fuerza aplicada, L (mm) es la distancia entre apoyos, b (mm) la anchura de la probeta y h (mm) es el espesor de la probeta.



3.1.3. Deformación en flexión

La deformación en flexión es la variación fraccional nominal en la longitud de un elemento de la superficie exterior de la probeta en el punto de aplicación de la carga. Puede expresarse como una relación adimensional o como porcentaje, para este caso se ha elegido la segunda opción como se observa en la ecuación 9:

$$\varepsilon_f = \frac{600sh}{L^2} \% \quad \text{Ec. (9)}$$

donde ε_f (%) es el parámetro de flexión, s (mm) es la flecha, h (mm) el espesor de la probeta y L (mm) es la distancia entre los apoyos.

Como ya se ha dicho anteriormente, las propiedades de flexión son estrictamente válidas para un comportamiento lineal en cuanto a la relación tensión (esfuerzo)/deformación; así, para la mayoría de los materiales plásticos las ecuaciones que se describen en el apartado de análisis de resultados sólo son exactas para pequeñas flechas y no son exactas para grandes deformaciones.

3.1.4. Preparación de la probeta en el banco de ensayos

Se coloca la probeta de forma horizontal sobre los dos apoyos del banco de tal modo que el centro de ésta coincida con el punto medio de la distancia entre dichos apoyos y a continuación se sitúa el actuador (elemento de carga), que es quien generará la fuerza justo encima de la probeta sin llegar a tocarla (ver figura 75). Es en este momento cuando se realiza el offset del desplazamiento del actuador.

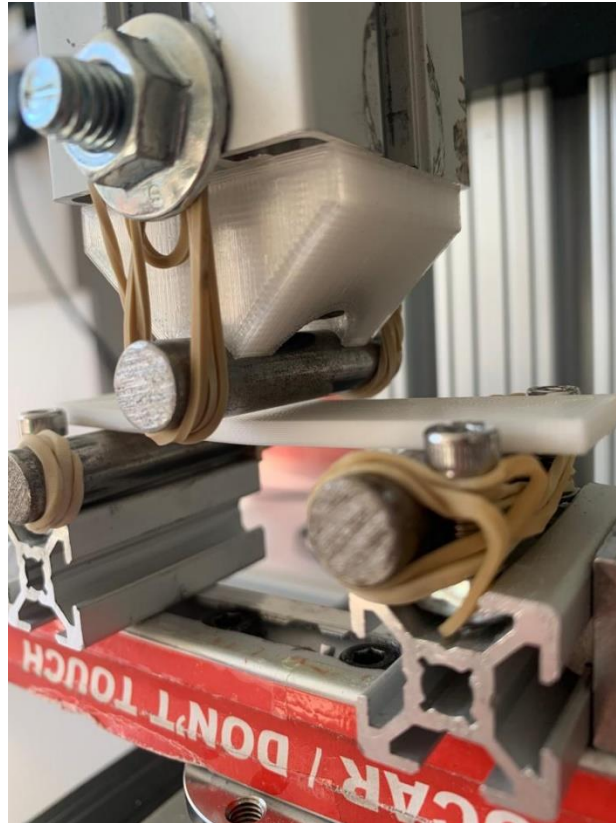


Figura 75: Situación de la probeta justo antes de iniciar el ensayo. [Fuente propia]

A partir de este momento, de forma manual, se va girando la rueda situada en la bancada a una velocidad lo más uniforme posible para tratar de conseguir que la velocidad de desplazamiento del actuador sea constante. Para estos ensayos, el recorrido del actuador se realiza hasta la rotura de las probetas.

Para la medida de la fuerza aplicada se ha situado una célula de carga en el extremo inferior del banco de ensayos (ver figura 76).



Figura 76: Célula de carga del banco de ensayos. [Fuente propia]



El método de ensayo realizado es hasta la rotura de la probeta. Es en este momento cuando se recoge dicha probeta y se realiza la medición de los espesores a un lado y otro de la rotura (ver figura 77).



Figura 77: Probetas tras la rotura. [Fuente propia]

3.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En primer lugar, en la tabla 7 se muestran los datos referidos a las dimensiones de las probetas (se recuerda que de cada lote se seleccionaron 5 de ellas y posteriormente se realizó la media) así como las distancias entre los apoyos del banco de ensayos. Se ha llevado a cabo el análisis de los lotes 1, 2, 4, 8, 11 y 12 con el objetivo, como ya se ha dicho, de observar el comportamiento de la adhesión entre las capas del material a partir de la modificación de diferentes parámetros durante su fabricación 3D.

LOTE	ESPESOR MEDIO (mm)	ANCHURA MEDIA (mm)	DISTANCIA APOYOS (mm)
1	2,53	19,73	49,95
4	2,86	19,69	
2	2,31	19,65	
8	2,33	19,70	
11	2,88	19,60	
12	2,77	19,67	

Tabla 7: Dimensiones promedio de las probetas de cada lote y la distancia entre apoyos del banco de ensayos. [Fuente propia]



Se ha realizado esa distribución en la tabla ya que por cada par de lotes que se muestra se va a estudiar cómo afecta la modificación de un parámetro de la impresión en la adhesión de capas.

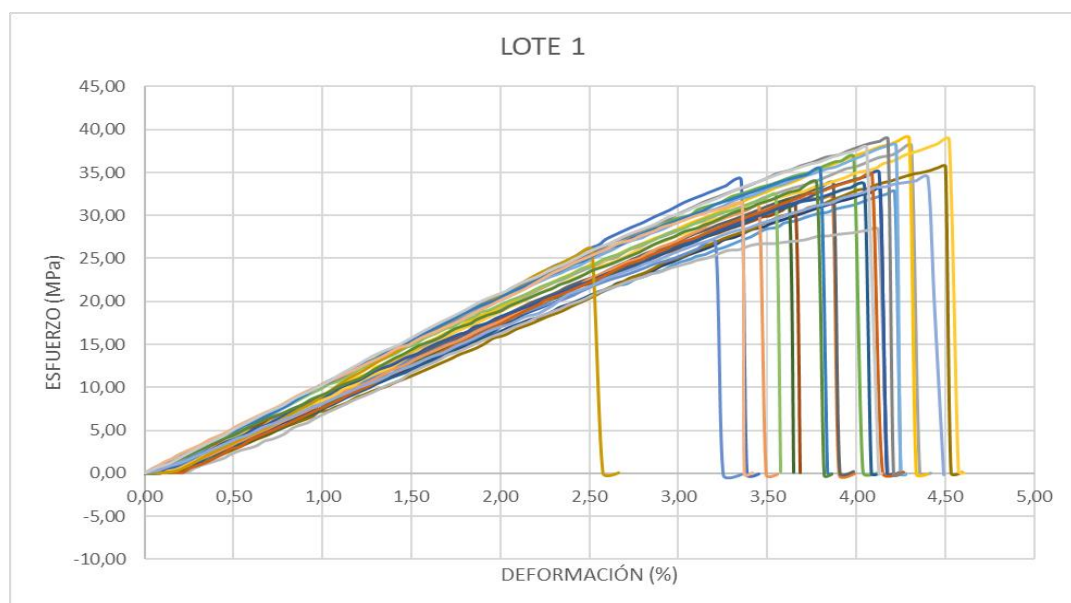
3.2.1. Modificación del parámetro “E”

Para el estudio de la influencia de este parámetro con respecto a la adhesión entre las capas sucesivas se han analizado las probetas correspondientes a los lotes 1 y 4. Los valores de los parámetros utilizados se muestran a continuación en la tabla 8.

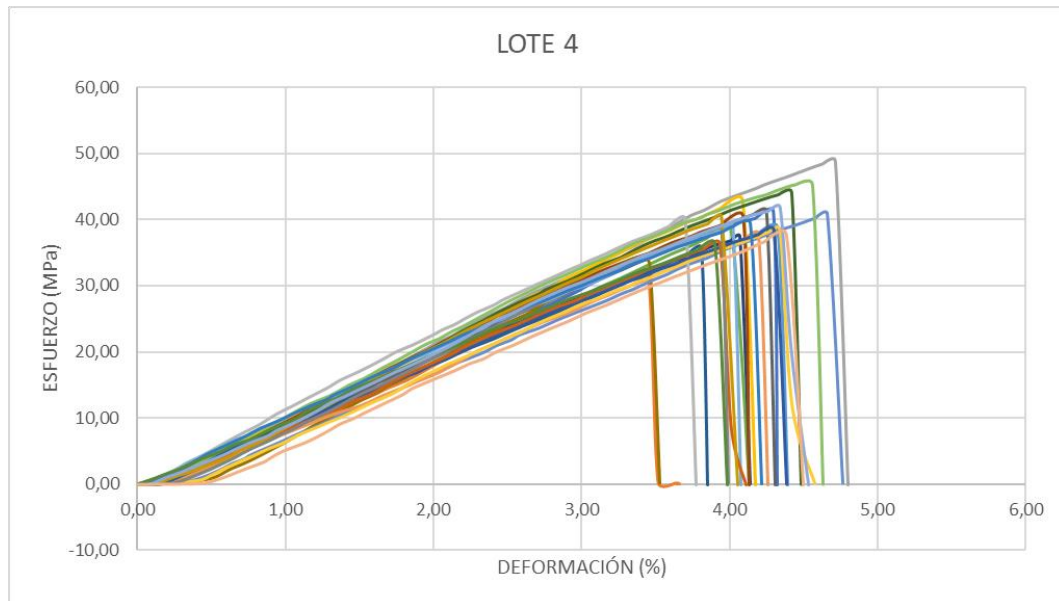
LOTE Nº	T _{INPUT} (°C)	T _{OUTPUT} (°C)	E (pasos/mm)	VENTILADOR CAPA (%)
1	190	210	400	75
4	190	210	450	75

Tabla 8: Resumen de los parámetros de los lotes 1 y 4. [Fuente propia]

Como se puede comprobar, el único valor que difiere entre los dos lotes es el parámetro “E”. Seguidamente se muestran las gráficas resultantes (ver graficas 2 y 3) del esfuerzo de flexión (MPa) frente a la deformación en flexión (%). Ambos parámetros se han obtenido a través de las ecuaciones (8) y (9), respectivamente.



Gráfica 2: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 1.



Gráfica 3: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 4.

En el anexo 5 se pueden encontrar la tabla Excel de valores de los esfuerzos y deformaciones de alguna de las probetas (ya que son demasiadas, se han escogido las más significativas) que aquí se muestran mediante las gráficas además de la representación de las curvas de fuerza (N) frente al desplazamiento (mm).

Como se puede ver, un mayor valor de la variable “E” se traduce en la extrusión de mayor caudal, es decir, mayor cantidad de material extruido por unidad de tiempo. Como resultado, al salir más cantidad de material por la boquilla hace que se genere mayor presión del cordón saliente sobre la capa anterior. Por ello, se consigue mayor adhesión entre capas obteniendo así en las probetas del lote 4 un mayor esfuerzo de flexión hasta la rotura.

LOTE	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (%)
1	39,01	4,30
4	48,84	4,71

Tabla 9: Resumen de los valores máximos de esfuerzo y los valores promedio de la deformación obtenidos.

En el caso del lote 1, se ha llegado a alcanzar un valor del esfuerzo de flexión de 39,01 MPa frente a un 48,84 MPa en el lote 4. Con respecto a las deformaciones, apenas hay una diferencia del 0,3% (ver tabla 9).



3.2.2. Modificación del ventilador de capa

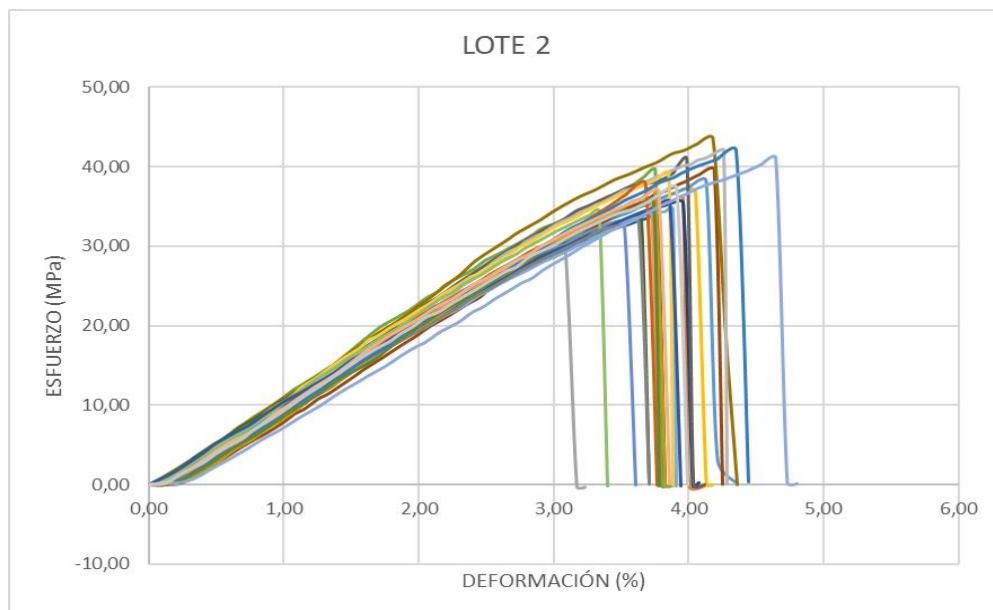
La influencia del sistema de retirada de calor del cordón de material a la vez que va saliendo de la boquilla es una de las variables más importantes para la adhesión entre capas, sobre todo cuando se trata de secciones pequeñas, aunque no es nuestro caso. Su estudio se ha llevado a cabo por medio de las probetas de los lotes 2 y 8. Los valores se observan en la tabla 10.

LOTE Nº	T _{INPUT} (°C)	T _{OUTPUT} (°C)	E (pasos/mm)	VENTILADOR CAPA (%)
2	215	230	400	25
8	215	230	400	75

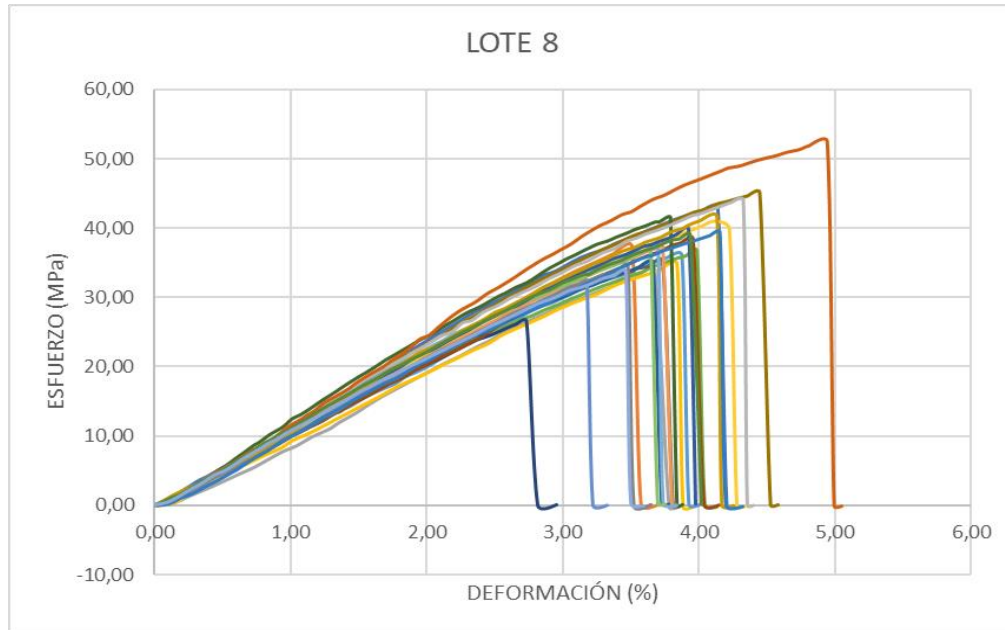
Tabla 10: Resumen de los parámetros de los lotes 2 y 8. [Fuente propia]

Los valores elegidos del ventilador de capa son unos valores intermedios ya que por ejemplo si se escogiera un 0% podría haber complicaciones durante el proceso de impresión, pues las temperaturas de impresión de estos lotes están por encima de las recomendadas por el fabricante y podría llegar a deformarse el material a su salida por la boquilla cuando apoye en la capa anterior y dejar mala calidad superficial en la pieza que se vería reflejado en los ensayos a flexión.

Los resultados obtenidos de los ensayos de estos lotes se observan a continuación (ver gráficas 4 y 5).



Gráfica 4: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 2.



Gráfica 5: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 8.

En el anexo 6 se pueden encontrar la tabla Excel de valores de los esfuerzos y deformaciones que aquí se muestran mediante las gráficas además de la representación de las curvas de fuerza (N) frente al desplazamiento (mm). Se puede comprobar que, para un mayor valor del porcentaje de trabajo del ventilador de capa, se retira mayor cantidad de calor (el ventilador gira más revoluciones). De esta manera lo que se consigue es que aumentaremos la diferencia de temperatura entre la capa anterior y la nueva que va saliendo de la boquilla.

Por ello, estamos dificultando la adhesión entre capas que se ve traducido en la obtención de peores características mecánicas. En este ensayo, la tendencia de los valores de los esfuerzos de flexión es bastante pareja. Donde se nota una diferencia más notable es en los valores de la deformación.

LOTE	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (%)
2	43,50	4,18
8	52,42	4,94

Tabla 11: Resumen de los valores máximos de esfuerzo y los valores de la deformación obtenidos.



Aunque haya diferencia entre los valores máximos conseguidos entre ambos lotes, la tendencia de las probetas de ambos lotes acerca del esfuerzo es muy parecida y se aprecia claramente en las representaciones gráficas. Con respecto a la deformación, sí que existe mayor diferencia, en torno al 1%, que para el rango de valores en el que nos movemos es una diferencia notable.

3.2.3. Modificación de las temperaturas de impresión

Es otro de los parámetros que más influencia ejercen sobre la adhesión entre capas. En función de las temperaturas de impresión, se obtendrá material por la boquilla más o menos fluido y como consecuencia se conseguirá una mezcla de los pellets más o menos homogénea a lo largo del sistema barril-husillo. Su estudio ha sido llevado a cabo por las probetas de los lotes 11 y 12. En la tabla X se observan los valores.

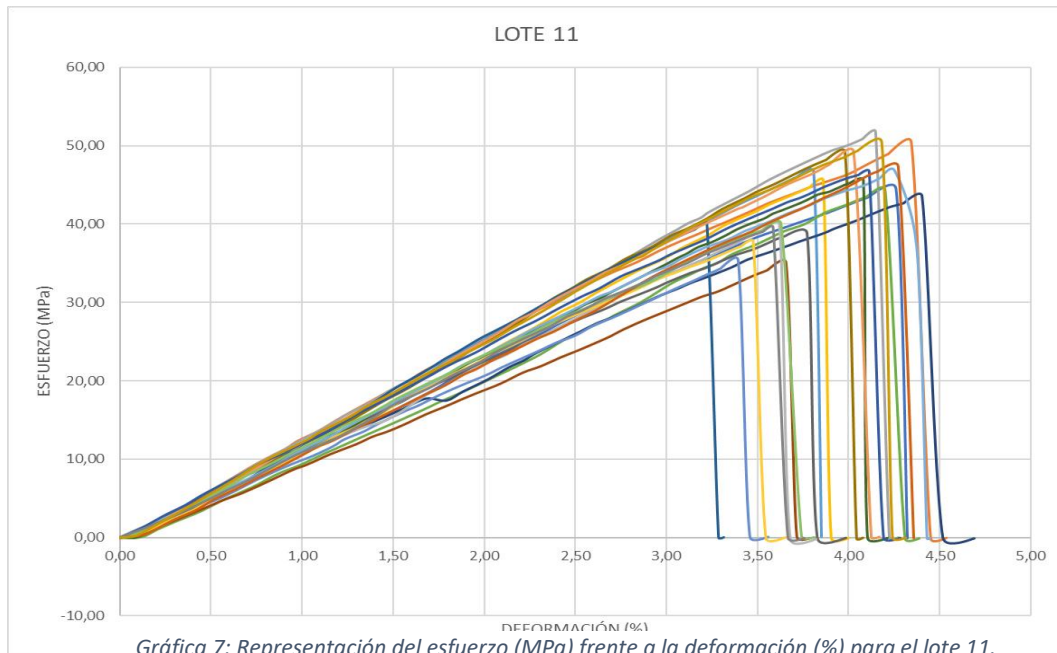
LOTE Nº	T _{INPUT} (°C)	T _{OUTPUT} (°C)	E (pasos/mm)	VENTILADOR CAPA (%)
11	215	230	450	25
12	225	245	450	25

Tabla 12: Resumen de los parámetros de los lotes 11 y 12.

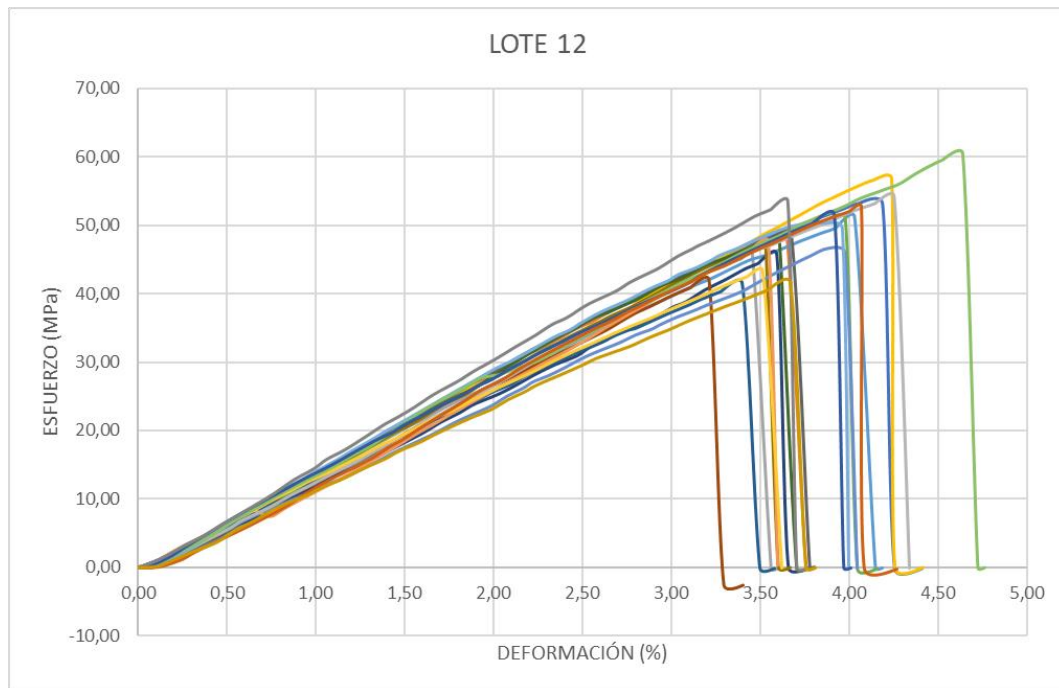
Los valores escogidos como temperaturas de impresión han sido escogidos de forma aleatoria teniendo en cuenta no imprimir en intervalos de temperatura muy por encima de la recomendada por el fabricante. Cabe destacar que entre ambas zonas de calentamiento, la diferencia de temperaturas no es la misma, así para la temperatura input se tiene una diferencia de 10 (°C) para la output se tiene 15 (°C).



Las gráficas resultantes se muestran a continuación (ver gráficas 6 y 7).



Gráfica 7: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 11.



Gráfica 6: Representación del esfuerzo (MPa) frente a la deformación (%) para el lote 12.

En el anexo 7 se pueden encontrar la tabla Excel de valores de los esfuerzos y deformaciones que aquí se muestran mediante las gráficas además de la representación de las curvas de fuerza (N) frente al desplazamiento (mm).



Como resultado de este ensayo, se afirma que cuando se imprime a unos valores de temperatura mayores, se obtiene plástico más fundido, fluye más, y por ello se adhiere mejor a las capas anteriores mejorando así sus capacidades mecánicas, observable en las representaciones gráficas de los lotes 11 y 12.

LOTE	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (%)
11	51,75	4,15
12	60,47	4,64

Tabla 13: Resumen de los valores máximos de esfuerzo y los valores de la deformación obtenidos.

En este caso, dichos valores máximos de esfuerzos de flexión sí que son una muestra de la tendencia de cada uno de los dos lotes.

Por último, cabe destacar que donde se ha alcanzado mayor esfuerzo de flexión (60,47 MPa) es en el lote 12. Tiene los intervalos de temperaturas de impresión más altos (245 y 225 °C) así como el valor del parámetro E (450) con los que se ha trabajado en la realización de estos lotes. Además, se ha realizado con el valor de ventilador de capa más bajo que se ha utilizado en los ensayos. Todo ello favorece la adhesión de capas y se ha visto reflejado.



CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

El objetivo principal al inicio del presente Trabajo de Fin de Grado era el análisis de los parámetros más importantes relacionados con el sistema de extrusión aplicado a la impresión 3D mediante la fabricación de gránulos (pellets) fundidos (FGF, del inglés Fused Granulated Fabrication). Se trata de una tecnología relativamente nueva de la que aún queda mucho por descubrir con la posibilidad de reciclar materiales plásticos dándoles una segunda vida útil fomentando así la economía circular.

Se ha llevado a cabo un estudio acerca de la impresión 3D y del sistema barril-husillo por el que se rige dicha tecnología con la finalidad de conocer los parámetros más importantes. En primer lugar, se ha realizado la puesta a punto del material, es decir, la calibración del caudal. Uno de los problemas que se tuvo inicialmente es que se escogió tanto la boquilla como las dimensiones del cordón que queríamos extruir por encima de las posibilidades de la impresora (el motor paso a paso que acciona el husillo saltaba continuamente pasos). Finalmente se disminuyeron las dimensiones del cordón para las cuales se realizó de forma exitosa la calibración obteniendo un equilibrio entre las dimensiones del cordón, la velocidad del pórtico y las revoluciones del husillo.

A continuación, se imprimieron diversos lotes de probetas modificando las principales variables que rigen la extrusión FGF y posteriormente se sometieron a ensayos de flexión con el objetivo de conocer las características mecánicas (en este caso uno de los principales problemas es la adhesión entre capas y es en el que se ha centrado el proyecto) del material en función de los parámetros de impresión. **Los resultados obtenidos sirven para afirmar lo que se expone en el marco teórico: la adhesión entre capas se ve favorecida principalmente cuanto más próxima sea la diferencia de temperaturas entre una capa y la sucesiva en el momento que sale a través de la boquilla. Esto se ha conseguido en los tres experimentos que se han ejecutado a partir de la modificación de las temperaturas de impresión, el ventilador de capa y la cantidad de material (caudal) que sale a través de la boquilla.**

Finalmente, tratando de dar salida al material plástico, se ha diseñado mobiliario infantil para aulas de trabajo como mesas, sillas y papeleras.



CAPÍTULO 5: PROTOTIPOS DEMOSTRADORES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1. PROTOTIPOS DEMOSTRADORES

La impresión 3D no es solo una revolución en la forma de fabricar objetos, sino que también es un gran aliado del medio ambiente. De forma local se pueden generar los materiales necesarios para crear nuevas piezas 3D a partir de residuos, a partir de otras piezas plásticas fabricadas mediante esta tecnología cuya vida útil ha llegado a su fin, etc.

Este método de fabricación resulta más económico que otros debido a la posibilidad de trabajar con materiales menos costosos y a la poca merma que se produce. Puede considerarse como uno de los métodos que genera menos residuos ya que únicamente emplea el material necesario destinado al producto final. Es por ello por lo que, se considera una buena opción sostenible además de poder emplear materiales biodegradables, reciclables o reciclados.

Además de las ventajas que la impresión 3D ofrece a las empresas como la personalización, diseño, funcionalidad e inmediatez, cualquier usuario que cuente con una impresora 3D puede imprimir su propio mobiliario. Dicha posibilidad reduce considerablemente la huella de carbono producida, pues se evitan procesos a gran escala, así como el transporte de los productos finales hasta su lugar de destino. [39]

Siguiendo esta línea y apoyando la economía circular, a partir de la tecnología FGF es más factible el reciclado de material plástico, pues está la posibilidad de introducir en la tolva directamente como materia prima, plástico triturado con el objetivo de obtener una nueva pieza 3D, sin tener que pasar por un proceso más de calentamiento para la obtención de filamento.

Un sector tan tradicional como es el mobiliario ha experimentado un cambio notable en los últimos años gracias a las diversas posibilidades que ofrece la impresión 3D. Son varias las empresas que actualmente cuentan en sus procesos productivos con esta tecnología capaz de simplificar y economizar tanto los procesos de diseño como de fabricación.

Además, la impresión 3D abre nuevos horizontes que hasta ahora se veían difíciles de alcanzar. De este modo, se pueden crear muebles con diseños únicos a la vez de originales con un elevado grado de personalización de manera más rápida y económica.

Es un hecho que ya existen muebles de diseño fabricados íntegramente mediante la impresión 3D como es el caso de los del estudio de diseño español Nagami, que cuentan con una colección de sillas futuristas por medio de la fabricación aditiva de diferentes materiales. [40]

A continuación, se muestra un ejemplo de silla diseñada y fabricada por la empresa Nagami, denominada “Voxel Chair”. (ver figuras X y X).

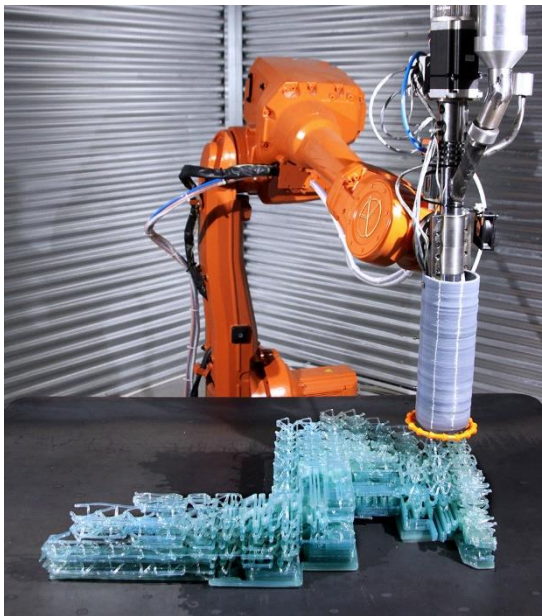


Figura 79: Proceso de fabricación del modelo Voxel Chair. [41]

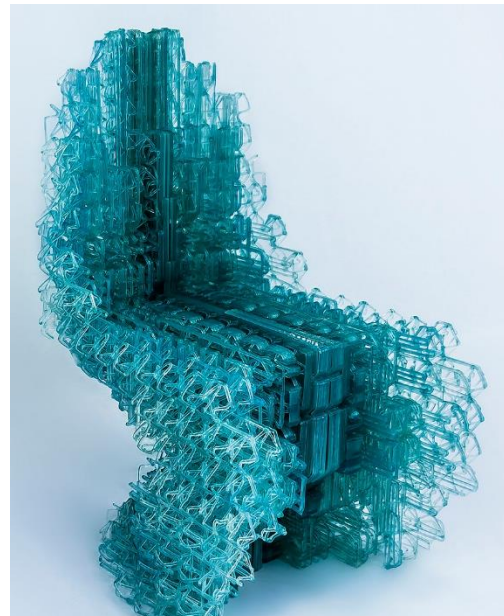


Figura 78: Prototipo de silla Voxel chair. [41]

Como ya se ha dicho, la fabricación aditiva está considerada como respetuosa con el medio ambiente, pues se dispone de diversos filamentos y pellets tanto reciclados como reciclables. Hoy en día, existen muchos plásticos con los que se puede imprimir que simulan materiales como la madera o metal, muy usados en mobiliario. Con respecto a la personalización, es posible crear mobiliario que se adapte perfectamente al uso que se le va a dar. A través de un escaneado 3D del cuerpo del usuario es posible diseñar e imprimir asientos flexibles, permitiendo que se amolde al cuerpo. [42]

Siguiendo esta línea, en el presente Trabajo de Fin de Grado, se ha llevado a cabo el diseño y la fabricación de mobiliario para las aulas de infantil por medio de material plástico reciclable, en este caso PETG.

Se ha realizado el prototipado de mesas y sillas en cuyo diseño se ha seguido la norma UNE EN 1729-1:2015. Además, también se ha diseñado un prototipo de una papelerera. El resultado puede observarse en las figuras 80 y 81 que se muestran a continuación.



Figura 80: Ejemplos de mobiliario para aulas de infantil. [Fuente propia]



Figura 81: Ejemplos de mobiliario infantil (otra vista). [Fuente propia]



5.2. LÍNEAS FUTURAS

A partir del desarrollo del Proyecto se abren varias líneas de investigación y desarrollo para tratar de buscar soluciones útiles para el reciclado de plástico.

En primer lugar, partiendo del diseño y fabricación de mobiliario infantil para las aulas y más en concreto con respecto a las sillas, tratar de hacer un análisis exhaustivo de los posibles materiales plásticos reciclables con los que se podrían fabricar, así como de otros diseños que se puedan llevar a cabo y sean viables a la hora de imprimirlos.

Otro avance que se puede llevar a la práctica es la obtención de las propiedades mecánicas de los diferentes materiales en los que se impriman las sillas a partir de ensayos a fatiga para comprobar su viabilidad y puesta en marcha en la vida real.

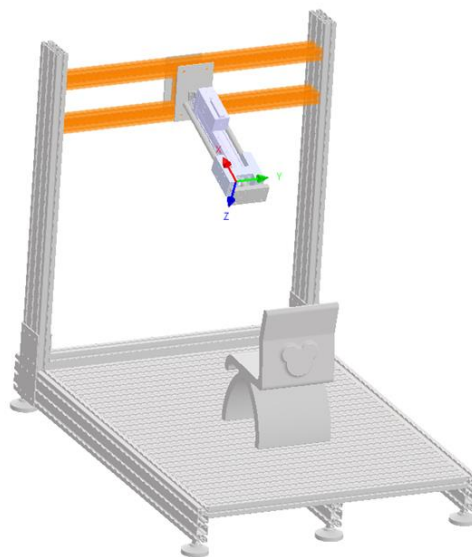


Figura 82: Diseño del banco de ensayos. [Fuente propia]

Por último, de cara al reciclado del material plástico, tratar de imprimir mediante tecnología FGF por medio de viruta procedente del triturado de otras piezas que han llegado al fin de su ciclo útil de vida. Esto es algo que en un momento puntual se probó, pero se encontró el problema de que la viruta era tan pequeña que el ventilador situado en la entrada del material al sistema barril-husillo, expulsaba dicha viruta del sistema de extrusión.



Figura 83: Molino de corte SM 300 para el triturado de material. [Fuente propia]



Figura 84: Rotor de corte de tipo paralelo. [Fuente propia]



CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

[1] Plastics Europe. (n.d.). *Una visión europea LA ECONOMÍA CIRCULAR DE LOS PLÁSTICOS*.

[2] *Qué es la economía circular y por qué es importante* | Repsol. (n.d.).

Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from

<https://www.repsol.com/es/sostenibilidad/economia-circular/index.cshtml>

[3] *JuggerBot 3D: Manufacturer of 3D printers, additive manufacturing in Youngstown, Ohio*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023,

from <https://juggerbot3d.com/>

[4] *Nuestra compañía* | Tumaker. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de

abril de 2023, from <https://tumaker.com/compania/>

[5] D. V. Rosato, D. V. Rosato y M. V. Rosato, «Extrusion,» *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*, pp. 227-281, 2004.

[6] C. Rauwendaal, *Understanding Extrusion*, 3ª ed., Munich: HANSER PUBLICATIONS, 2018. e-ISBN : 978-80-553-2773

[7] *AIRID Polymer Dryer* | *Dry any polymer from any desktop surface* | 3devo.

(n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from

<https://www.3devo.com/dryer>

[8] R. W. J. John, E. M. Mount III y H. F. Giles Jr., *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Segunda ed., Elsevier, 2014.

[9] *Industrial 3D Printer* | Piocreat. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de

abril de 2023, from <https://www.piocreat3d.com/product/18.html>



[10] *Delta WASP 3MT INDUSTRIAL 4.0 | Wasp Iberia*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.wasp3d.es/delta-wasp-3mt-industrial-4-0/>

[11] *GIGABOT® – re:3D | Life-Sized Affordable 3D Printing*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://re3d.org/gigabot/>

[12] *DSM y JuggerBot 3D avanzan en la fabricación de granulado fundido para la impresión 3D de pellets - Impresión 3D - Fabricación aditiva*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/299613-DSM-JuggerBot-3D-avanzan-fabricacion-granulado-fundido-para-impresion-3D-pellets.html>

[13] *Pellet Models - JuggerBot 3D*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://juggerbot3d.com/pellet-models/>

[14] *About Us – sculptur.se*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://sculptur.se/about-us/>

[15] *Integrar la tecnología FGF para cubrir las necesidades de la industria - 3Dnatives*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.3dnatives.com/es/tecnologia-fabricacion-fgf-industria-090620212/#!>

[16] *DSM y JuggerBot 3D avanzan en la fabricación de granulado fundido para la impresión 3D de pellets - Impresión 3D - Fabricación aditiva*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/299613-DSM-JuggerBot-3D-avanzan-fabricacion-granulado-fundido-para-impresion-3D-pellets.html>



[17] *Webinar: Fused Filament Fabrication vs Fused Granulate Fabrication (Pellet Printing) - JuggerBot 3D.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 19 de abril de 2023, from <https://juggerbot3d.com/fused-filament-fabrication-vs-fused-granulate-fabrication/>

[18] *Ciencias para el mundo contemporáneo.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 18 de abril de 2023, from http://www3.gobiernodecanarias.org/aciisi/cienciasmc/web/u8/contenido2_u8.html

[19] Liu, S., Zhao, P., Wu, S., Zhang, C., Fu, J., & Chen, Z. (2019). A Pellet 3D Printer: Device Design and Process Parameters Optimization. *Advances in Polymer Technology*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5075327>

[20] *Absorción de humedad - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.mexpolimeros.com/humedades.html>

[21] *Impresora 3D Tumaker Pro Dual Direct Drive HR - Pellets | Tumaker.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://tumaker.com/impresoras-3d/doble-cabezal/tumaker-pro-dual-direct-drive-hr-pellets/>

[22] *Dual Direct Drive HR – Pellet | Indart3D.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://indart3d.com/dual-direct-drive-hr-pellet/>

[23] *TOP 10, las mejores impresoras 3D de doble extrusión de 2023.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://descubrearduino.com/top-10-las-mejores-impresoras-3d-de-doble-extrusion/>

[24] *Simplify3D, ¿un laminador 3D para profesionales? - 3Dnatives.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.3dnatives.com/es/simplify3d-laminador-profesionales/#!>



[25] *How to paint PLA 3D printed parts?* - Bitfab. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://bitfab.io/es/blog/extrusores-de-pellets/>

[26] *Mahorxyz - Imagine Additive Manufacturing* . (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://mahor.xyz/>

[27] *Pellet extruder* | Indart3D. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://indart3d.com/soporte-tecnico/cabecal-pellet/pellet-extruder/>

[28] *La importancia del ventilador de capa*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from https://filament2print.com/es/blog/76_importancia-ventilador-capa.html

[29] *Partes-de-una-impresora-3d-desde principales-hasta-mecánicas*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://abax3dtech.com/2020/11/05/partes-de-una-impresora-3d-desde-principales-hasta-mecanicas/>

[30] *Problemas comunes y soluciones en impresiones 3D*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from https://filament2print.com/es/blog/78_problemas-soluciones-impresiones-3d.html

[31] *Extrusión excesiva (impresión 3D): trucos para solucionarla* | All3DP. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://all3dp.com/es/2/extrusion-excesiva-sobreextrusion-impresion-3d/>

[32] *Guía completa: El filamento de PLA en la impresión 3D* - 3Dnatives. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/#!>



[33] Martin, O., & Avérous, L. (2001). Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. *Polymer*, 42(14), 6209–6219. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00086-6)

[34] *Calibración material pellet* | Indart3D. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://indart3d.com/sopORTE-tecnico/cabezal-pellet/calibracion-material-pellet/>

[35] *PLA PELLETT - Filamentos SmartMaterials3D*. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.smartmaterials3d.com/pla-y-abs-pellets>

[36] *Cámara ir compacta Xi 400 con localizador de puntos*. (n.d. Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.optris.es/neu-optris-xi-400>

[37] *Cómo funciona una cámara termográfica* | Mesurex. (n.d. Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://mesurex.com/como-funciona-una-camara-termografica/>

[38] *UNE-EN 1729-1:2016 Mobiliario. Sillas y mesas para centros de ...* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056982>

[39] *Muebles impresos en 3D: Funcionalidad y sostenibilidad*. (n.d. Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from https://filament2print.com/es/blog/129_muebles-impresos-en-3d-funcionalidad-y-sosten.html

[40] *Aplicar la impresión 3D en el Sector Mobiliario* | INTECH3D. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://intech3d.es/2021/02/22/aplicacion-impresion3d-sector-mobiliario/>



[41] *Voxel Chair v1.0, a prototype of “spatial 3D printing”* | Nagami. (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://nagami.design/en/project/voxelchair-v1-0/>

[42] *Muebles impresos en 3D: ventajas y ejemplos de mobiliario.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://abax3dtech.com/2020/12/03/muebles-impresos-en-3d-ventajas-y-ejemplos-de-mobiliario/>

[43] Woern, A. L., Byard, D. J., Oakley, R. B., Fiedler, M. J., Snabes, S. L., & Pearce, J. M. (2018). Fused Particle Fabrication 3-D Printing: Recycled Materials' Optimization and Mechanical Properties. *Materials 2018*, Vol. 11, Page 1413, 11(8), 1413. <https://doi.org/10.3390/MA11081413>

[44] *Impresora 3D de Pellets de Tumaker - Primeros Pasos - YouTube.* (n.d.). Fecha de la última consulta: 14 de abril de 2023, from <https://www.youtube.com/watch?v=PWsdkBK6TOg>



Universidad de Valladolid

Análisis de los parámetros del proceso de
impresión 3D FGF. Aplicación a la fabricación de
mobiliario.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

Análisis de los parámetros del proceso de
impresión 3D FGF. Aplicación a la fabricación de
mobiliario.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO 7: ANEXOS



ANEXO 1 – FICHA TÉCNICA DE DATOS (TDS) DEL MATERIAL: UPM FORMI 3D 20/19

UPM Formi 3D20/19

08.02.2022



Material	UPM Formi 3D20/19 is cellulose fiber filled biocomposite. Principal ingredients are specially selected cellulose fibers and native polylactide acid.																																																
Applications	UPM Formi 3D20/19 is grade developed especially for large scale additive manufacturing. Recommended applications include: Furnitures, Moulds (e.g. concrete casting, vacuum infusion), Art and decor, Prototyping.																																																
Environment	UPM Formi 3D is manufactured from renewable cellulose fibers. Material can be recycled or burned for energy. All cellulose fibres are from certificated forests.																																																
Physical and mechanical properties	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Property</th> <th>Test method</th> <th>Injection moulded</th> <th>3D printed*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Density, g/cm³</td> <td>EN ISO 1183</td> <td>1,2</td> <td>1,2</td> </tr> <tr> <td>Tensile strength, N/mm²</td> <td>ISO 527</td> <td>39</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>Tensile strength (z-direction), N/mm²</td> <td>ISO 527</td> <td></td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Tensile modulus, N/mm²</td> <td>ISO 527</td> <td>3600</td> <td>3200</td> </tr> <tr> <td>Tensile modulus (z-direction), N/mm²</td> <td>ISO 527</td> <td></td> <td>2000</td> </tr> <tr> <td>Strain (tensile), %</td> <td>ISO 527</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Impact Strength, Charpy, kJ/m²</td> <td>ISO 179/1eU</td> <td>20</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>Peak melt temperature, °C</td> <td>ISO 11357</td> <td>135-180</td> <td>135-180</td> </tr> <tr> <td>Glass transition temperature, °C</td> <td>ISO 11357</td> <td>65</td> <td>65</td> </tr> <tr> <td>Melt flow index (190 °C/10kg)</td> <td>ISO 1133</td> <td>16</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>Fibre content (%)</td> <td></td> <td>20</td> <td>20</td> </tr> </tbody> </table> <p>* 3D printed with 4mm nozzle / 1,5mm layer</p>	Property	Test method	Injection moulded	3D printed*	Density, g/cm ³	EN ISO 1183	1,2	1,2	Tensile strength, N/mm ²	ISO 527	39	32	Tensile strength (z-direction), N/mm ²	ISO 527		10	Tensile modulus, N/mm ²	ISO 527	3600	3200	Tensile modulus (z-direction), N/mm ²	ISO 527		2000	Strain (tensile), %	ISO 527	4	4	Impact Strength, Charpy, kJ/m ²	ISO 179/1eU	20	13	Peak melt temperature, °C	ISO 11357	135-180	135-180	Glass transition temperature, °C	ISO 11357	65	65	Melt flow index (190 °C/10kg)	ISO 1133	16	16	Fibre content (%)		20	20
Property	Test method	Injection moulded	3D printed*																																														
Density, g/cm ³	EN ISO 1183	1,2	1,2																																														
Tensile strength, N/mm ²	ISO 527	39	32																																														
Tensile strength (z-direction), N/mm ²	ISO 527		10																																														
Tensile modulus, N/mm ²	ISO 527	3600	3200																																														
Tensile modulus (z-direction), N/mm ²	ISO 527		2000																																														
Strain (tensile), %	ISO 527	4	4																																														
Impact Strength, Charpy, kJ/m ²	ISO 179/1eU	20	13																																														
Peak melt temperature, °C	ISO 11357	135-180	135-180																																														
Glass transition temperature, °C	ISO 11357	65	65																																														
Melt flow index (190 °C/10kg)	ISO 1133	16	16																																														
Fibre content (%)		20	20																																														
Colours	Lignin free fibres enable richer colors which, whilst gently lightening over time. The light color remain bright. In 3D extrusion, it is recommended to use PLA-based color masterbatch for coloring.																																																
Post processing	3D printed parts can be post processed by conventional wood post processing methods including: milling, sawing, sanding, staining, waxing, varnishing, painting																																																
Pretreatment	UPM Formi contains cellulose fibres which may absorb moisture if the package is open. Close the package at all times when possible. UPM Formi composite should be dried for minimum of 3 hours at 80 °C (dehumidifying dryer preferred).																																																
Safety	Maximum recommended processing temperature is 200 °C. Overheating may cause risk of thermal degradation. Auto-ignition of UPM Formi material is possible after purging the moulding machine. Recommended to purge into cool water. Product is non-flammable under normal conditions of storage, manipulation and use. In the case of inflammation as a result of improper manipulation, or storage, it is preferable to use polyvalent powder extinguishers (ABC powder) or water, in accordance with fire protection system regulations.																																																
Storage	UPM Formi granulates should be protected from UV-light and stored in closed packages in dry conditions at temperature below 50 °C. Air humidity can increase moisture content of the material and have negative effects on the end product properties.																																																

All information is based on our knowledge and experience. This information has as sole purpose to act as a manual for safe handling, use, processing, transport, storage, removal and release and cannot be used as guarantee or identification of quality. You are required to comply with all rules, regulations, and guidelines applicable to the use of the UPM Formi material. In all cases, you are fully responsible for any claims or liabilities resulting from your handling, use, processing, transport, storage, removal and release of the UPM Formi material.

Figura 85: Ficha técnica de datos - UPM FORMI 3D 20/19.



ANEXO 2 – RECOPIACIÓN DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL CAUDAL

	GRAMOS PESADOS	Kg	E
1	0,9	0,0009	200
2	1,0	0,0010	200
3	1,1	0,0011	250
4	1,2	0,0012	250
5	1,3	0,0013	300
6	1,4	0,0014	300
7	1,5	0,0015	350
8	1,6	0,0016	350
9	1,8	0,0018	400
10	1,8	0,0018	400
11	2,0	0,0020	450
12	1,9	0,0019	450
13	2,0	0,0020	500
14	1,9	0,0019	500
15	2,3	0,0023	550
16	2,4	0,0024	550
17	2,7	0,0027	600
18	2,6	0,0026	600
19	3,1	0,0031	700
20	3,1	0,0031	700
21	3,4	0,0034	800
22	3,5	0,0035	800
23	3,9	0,0039	900
24	4,3	0,0043	900

Tabla 14: Datos de las pesadas en la extrusión en vacío para diferentes valores de "E".



	\dot{m} (Kg/s)	\dot{m} (Kg/min)	Q (m ³ /s)	Q (mm ³ /s)
1	7,50E-06	4,50E-04	6,25E-09	6,250
2	8,33E-06	5,00E-04	6,94E-09	6,944
3	9,17E-06	5,50E-04	7,64E-09	7,639
4	1,00E-05	6,00E-04	8,33E-09	8,333
5	1,08E-05	6,50E-04	9,03E-09	9,028
6	1,17E-05	7,00E-04	9,72E-09	9,722
7	1,25E-05	7,50E-04	1,04E-08	10,417
8	1,33E-05	8,00E-04	1,11E-08	11,111
9	1,50E-05	9,00E-04	1,25E-08	12,500
10	1,50E-05	9,00E-04	1,25E-08	12,500
11	1,67E-05	1,00E-03	1,39E-08	13,889
12	1,58E-05	9,50E-04	1,32E-08	13,194
13	1,67E-05	1,00E-03	1,39E-08	13,889
14	1,58E-05	9,50E-04	1,32E-08	13,194
15	1,92E-05	1,15E-03	1,60E-08	15,972
16	2,00E-05	1,20E-03	1,67E-08	16,667
17	2,25E-05	1,35E-03	1,88E-08	18,750
18	2,17E-05	1,30E-03	1,81E-08	18,056
19	2,58E-05	1,55E-03	2,15E-08	21,528
20	2,58E-05	1,55E-03	2,15E-08	21,528
21	2,83E-05	1,70E-03	2,36E-08	23,611
22	2,92E-05	1,75E-03	2,43E-08	24,306
23	3,25E-05	1,95E-03	2,71E-08	27,083
24	3,58E-05	2,15E-03	2,99E-08	29,861

Tabla 15: Cálculos necesarios para obtener el caudal a partir de las pesadas.



ANEXO 3 - FICHA TÉCNICA DE DATOS (TDS) DEL MATERIAL: PELLET PET-G

PETG PELLET

FICHA TÉCNICA VERSION 1.0



PETG PELLET

El polímero PETG es un material con baja contracción, lo que facilita su impresión. Ideal para piezas de grandes dimensiones. El PETG destaca por su resistencia química y es compatible para uso alimentario. Puedes conseguir piezas translúcidas ya que tiene un 91% de transparencia en estado natural, de gran parecido al vidrio y muy resistente, con gran resistencia térmica.

Dispone de certificado de BIOCOPATIBILIDAD médica USP Clase VI e ISO 10993-1



Recyclable
Recyclable
Recyclable



Apto para contacto
con alimentos
Food Approved
Aliments approuvés

	VALOR	UNIDAD DE MEDIDA	STANDAR	
PROPIEDADES FÍSICAS				
Composición química	Tereftalato polietileno glicol			
Densidad	1.27	g/cm ³	ISO 1183	
Temperatura de transición vítrea	80	°C	DSC	
PROPIEDADES MECÁNICAS				
Resistencia a la tracción (hasta rotura, 23 °C)	30	MPa	ISO 527 – 1	
Módulo de tracción	1920	MPa	ISO 527 – 1	
Elongación a la rotura	≤ 240	%	ISO 527 – 1	
Resistencia a la flexión	67	MPa	ISO 178	
Módulo de flexión	1920	MPa	ISO 178	
Impacto Izod (con entalla a 23 °C)	8.8	kJ/m ²	ISO 180	
PROPIEDADES TÉRMICAS				
Temperatura de deflexión térmica (HDT-B)	73	°C	ISO 75 – 1	
RECOMENDACIONES DE PROCESADO ¹				
Pre secado	6 horas a 65 °C			
Entrada o alimentación	70 – 80 °C			
Zona de fundido	220 – 230 °C			
Zona de mezclado	220 – 230 °C			
Boquilla o salida	195 – 205 °C			
<small>1 (valores típicos, dependiendo del equipo requieren ser optimizados)</small>				
TAMAÑO PESO NETO PESO BRUTO COLOR EMBALAJE				
S	1 Kg	1,1 Kg	Transparente	SmartBag, sello de seguridad.
M	5 Kg	5,2 Kg	Transparente	Bolsa de PA, caja de cartón pequeña.
L	15 Kg	15,5 Kg	Transparente	Bolsa de PA, caja de cartón grande.

Tabla 16: Ficha técnica de datos – Pellet PET-G.



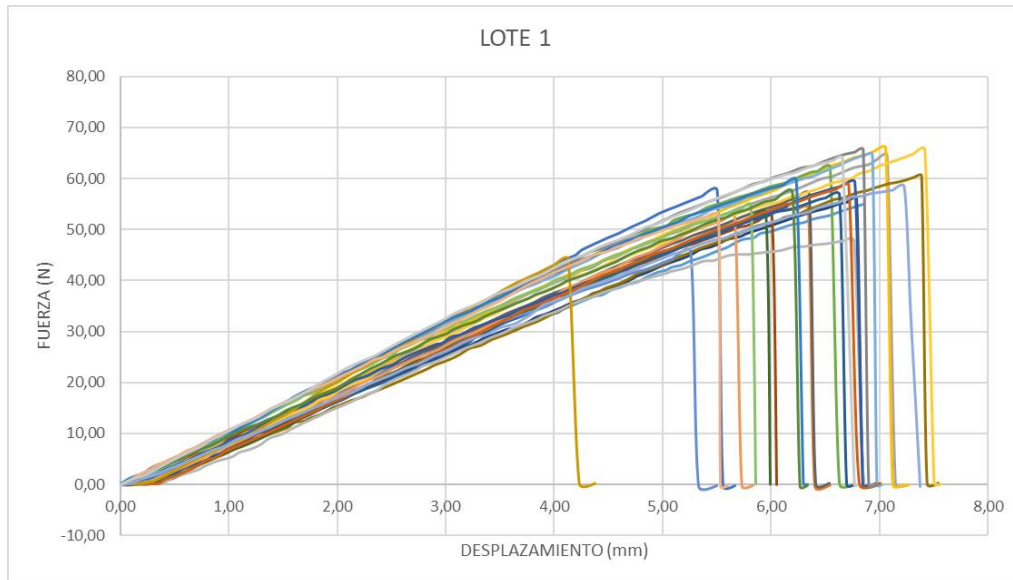
ANEXO 4 – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CÁMARA INFRARROJA OPTRIS Xi 400

Especificaciones técnicas	
Resolución óptica	382 x 288 pixels
Detector	FPA, uncooled (17 μm pitch)
Rango espectral	8 – 14 μm
Rango de temperatura	-20 ... 100 °C; 0 ... 250 °C; (20) 150 ... 900 °C ¹⁾ ; 200 °C ... 1500 °C (option)
Frecuencia de imagen	80 Hz / 27 Hz
Lente (FOV)	18° x 14° (f = 20), 29° x 22° (f = 12,7), 53° x 38° (f = 7,7), 80° x 54° (f = 5,7)
Óptica microscópica (FOV)	18° x 14° (f = 20), smallest measuring spot (IFOV): 80 μm
Enfoque	Enfoque motor manual
Resolución óptica (D:S)	390:1 (lente 18°)
Sensibilidad térmica (NETD)	80 mK
Precisión del sistema (a T_{Amb} 23 \pm 5 °C)	\pm 2 °C or \pm 2 %, cualquiera que sea mayor
Interfaces PC	USB 2.0 / interfaz USB a GigE (PoE) en option
Interfaz de procesos (PIF), estándar	0–10 V entrada, entrada digital (max. 24 V), 0–10 V salida
Interfaz de proceso (PIF), industrial	2 x 0–10 V entrada, entrada digital (max. 24 V), 3 x 0/4–20 V salida, 3 x relé (0–30 V / 400 mA), relé a prueba de fallos
Longitud de cable (USB)	1 m (standard), 3 m, 5 m, 10 m, 20 m
Temperatura ambiente (T_{Amb})	0 °C ... 50 °C
Carcasa (tamaño / clasificación):	\varnothing 36 mm x 100 mm (M30x1 rosca) / IP 67 (NEMA 4)
Peso (sin soporte de montaje)	216 - 220 g, (dependiendo del lente)
Shock ²⁾ / Vibración ²⁾	IEC 60068-2-27 (25G and 50G) / IEC 60068-2-6 (sinusoidale) IEC 60068-2-64 (bruit à large bande)
Fuente de alimentación:	USB
Scope of supply	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara Xi 400 • Cable USB (1 m) • Cable PIF estándar (1 m), borne de conexión incluido • Soporte de montaje von tuerca • Software optris PIX Connect
<p>¹⁾ Declaración de precisión a partir de 150 °C ²⁾ Para obtener más detalles, consulte el manual del operador</p>	

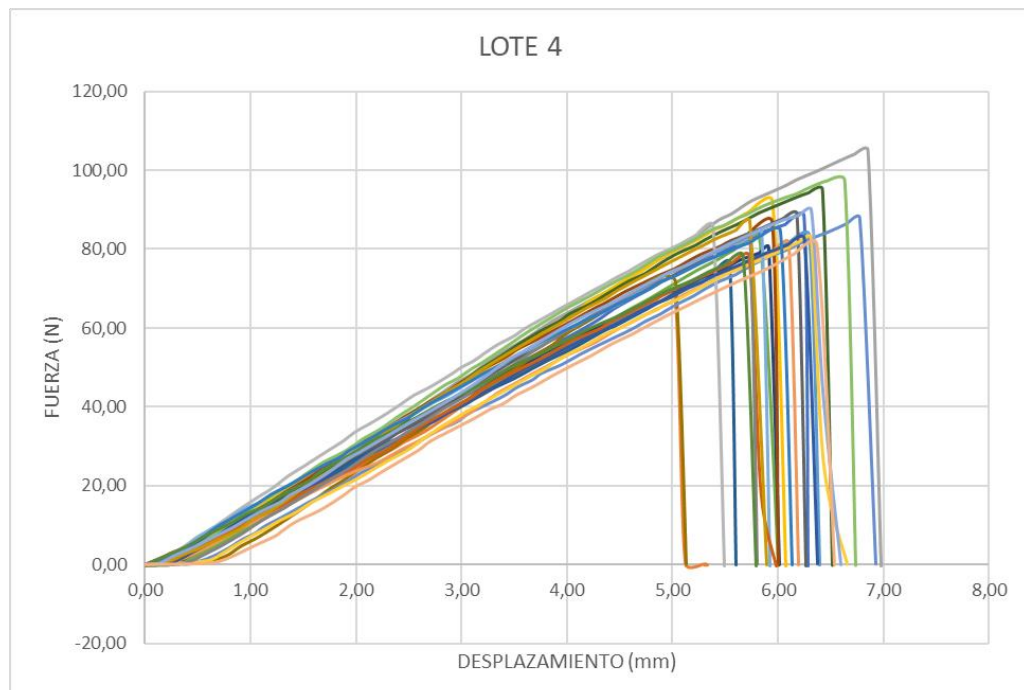
Tabla 17: Datos técnicos cámara infrarroja Optris Xi 400.



ANEXO 5 – DATOS RECOPIADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN: LOTES 1 Y 4



Gráfica 8: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 1.



Gráfica 9: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 4.



Probeta 4			
Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Sigma (MPa)	Epsilon (%)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,15	0,00	0,09
0,97	0,22	0,58	0,13
1,89	0,33	1,12	0,20
2,99	0,46	1,77	0,28
4,42	0,57	2,62	0,35
5,47	0,68	3,23	0,41
6,64	0,77	3,92	0,47
7,28	0,86	4,31	0,52
8,49	0,98	5,02	0,60
9,06	1,05	5,36	0,64
10,17	1,16	6,01	0,71
11,37	1,27	6,72	0,77
12,48	1,37	7,38	0,83
13,49	1,48	7,98	0,90
14,45	1,56	8,55	0,95
15,53	1,65	9,19	1,01
16,53	1,74	9,77	1,06
17,72	1,85	10,48	1,13
18,87	1,96	11,16	1,20
19,73	2,07	11,67	1,26
20,78	2,13	12,29	1,30
22,05	2,27	13,04	1,38
23,18	2,38	13,71	1,45
24,37	2,49	14,41	1,52
25,77	2,60	15,24	1,58
26,72	2,70	15,80	1,65
27,77	2,79	16,42	1,70
28,60	2,89	16,91	1,76
29,31	2,94	17,33	1,79
30,75	3,07	18,19	1,87
31,66	3,17	18,72	1,93
32,34	3,25	19,13	1,98
33,27	3,32	19,67	2,02
34,20	3,42	20,22	2,09
35,37	3,54	20,91	2,16
36,77	3,68	21,75	2,24
38,26	3,83	22,62	2,33
39,21	3,93	23,19	2,40
40,39	4,05	23,88	2,47
41,21	4,14	24,37	2,52
41,66	4,21	24,64	2,57
42,46	4,29	25,11	2,61
43,11	4,37	25,49	2,66
43,93	4,45	25,98	2,71
44,58	4,53	26,36	2,76
45,25	4,60	26,76	2,80
46,24	4,71	27,35	2,87
47,12	4,82	27,86	2,94
48,02	4,91	28,40	2,99
49,16	5,03	29,07	3,06
49,86	5,11	29,48	3,11
50,63	5,21	29,94	3,17
51,43	5,30	30,41	3,23
52,34	5,39	30,95	3,28
52,81	5,46	31,23	3,33
54,05	5,57	31,96	3,40
55,44	5,74	32,78	3,50
56,28	5,83	33,28	3,56
57,04	5,94	33,73	3,62
58,05	6,06	34,33	3,69
59,14	6,16	34,97	3,75
60,27	6,28	35,64	3,83
61,37	6,42	36,29	3,91
62,36	6,53	36,88	3,98
63,30	6,67	37,43	4,06
64,17	6,77	37,95	4,12
64,72	6,88	38,27	4,19
65,45	6,96	38,70	4,24
65,97	7,06	39,01	4,30

Tabla 18: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 4 del lote 1.

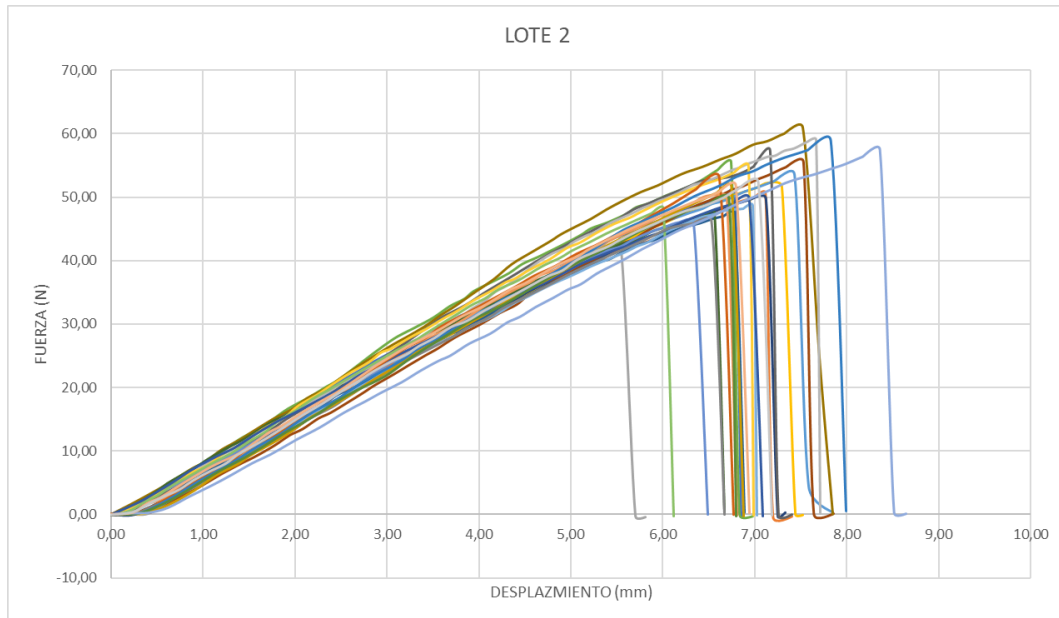


Probeta 3			
Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Sigma (Mpa)	Epsilon(%)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,13	0,01	0,09
1,59	0,33	0,74	0,23
3,85	0,49	1,79	0,33
5,11	0,58	2,38	0,40
6,85	0,70	3,19	0,48
9,33	0,85	4,34	0,58
11,83	1,02	5,50	0,70
14,41	1,17	6,70	0,80
16,22	1,28	7,54	0,88
19,28	1,46	8,97	1,00
21,92	1,64	10,20	1,12
24,58	1,76	11,43	1,21
26,57	1,87	12,36	1,29
29,06	1,99	13,52	1,37
32,12	2,15	14,94	1,48
34,90	2,32	16,24	1,60
36,97	2,43	17,20	1,67
40,44	2,64	18,81	1,81
43,60	2,82	20,28	1,94
46,19	2,96	21,49	2,04
48,31	3,10	22,47	2,13
51,40	3,25	23,91	2,24
54,38	3,43	25,29	2,36
57,04	3,60	26,53	2,48
58,95	3,70	27,42	2,55
61,81	3,87	28,75	2,66
64,71	4,07	30,10	2,80
66,79	4,21	31,07	2,89
68,42	4,32	31,83	2,97
70,67	4,47	32,87	3,08
73,57	4,63	34,22	3,19
76,53	4,83	35,60	3,32
78,35	4,94	36,45	3,40
81,80	5,14	38,05	3,54
84,89	5,31	39,49	3,65
87,32	5,44	40,62	3,74
88,94	5,57	41,37	3,83
91,90	5,73	42,75	3,94
93,95	5,90	43,70	4,06
96,01	6,07	44,66	4,18
97,54	6,18	45,37	4,25
99,90	6,39	46,47	4,40
102,21	6,58	47,54	4,52
103,98	6,73	48,37	4,63
104,99	6,85	48,84	4,71

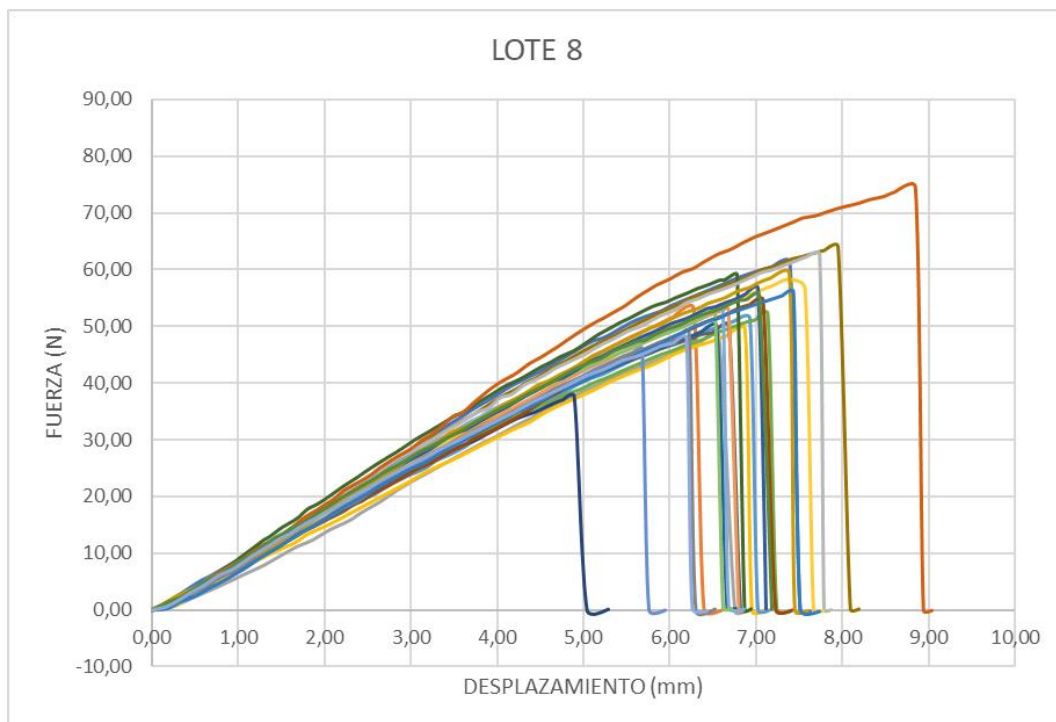
Tabla 19: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 3 del lote 4.



ANEXO 6 – DATOS RECOPIADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN: LOTES 2 Y 8



Gráfica 10: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 2.



Gráfica 11: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 8.



Probeta 10			
Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Sigma (Mpa)	Epsilon (%)
0,00	0,00	0,00	0,00
1,63	0,22	1,16	0,12
3,35	0,44	2,39	0,24
5,23	0,66	3,73	0,37
7,22	0,88	5,15	0,49
8,39	1,03	5,98	0,57
10,21	1,20	7,28	0,67
11,70	1,39	8,34	0,77
13,17	1,55	9,39	0,86
14,98	1,75	10,68	0,97
16,65	1,97	11,87	1,10
18,37	2,14	13,10	1,19
19,85	2,33	14,16	1,30
21,73	2,52	15,50	1,40
23,32	2,68	16,63	1,49
25,15	2,88	17,93	1,60
26,81	3,07	19,12	1,71
28,10	3,23	20,04	1,80
29,65	3,41	21,15	1,90
31,37	3,58	22,37	1,99
32,92	3,75	23,48	2,08
34,87	3,94	24,87	2,19
37,02	4,16	26,40	2,31
39,48	4,36	28,16	2,42
41,46	4,59	29,57	2,55
43,20	4,79	30,81	2,66
44,17	4,89	31,50	2,72
45,40	5,05	32,38	2,81
46,60	5,22	33,23	2,90
48,10	5,39	34,30	3,00
49,44	5,56	35,26	3,09
50,86	5,76	36,27	3,20
51,89	5,94	37,01	3,31
53,28	6,14	38,00	3,42
53,99	6,26	38,50	3,48
54,81	6,43	39,09	3,57
55,99	6,63	39,93	3,68
56,88	6,79	40,57	3,77
58,31	6,98	41,59	3,88
58,87	7,13	41,98	3,97
60,06	7,32	42,83	4,07
61,00	7,52	43,50	4,18

Tabla 20: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 10 del lote 2.

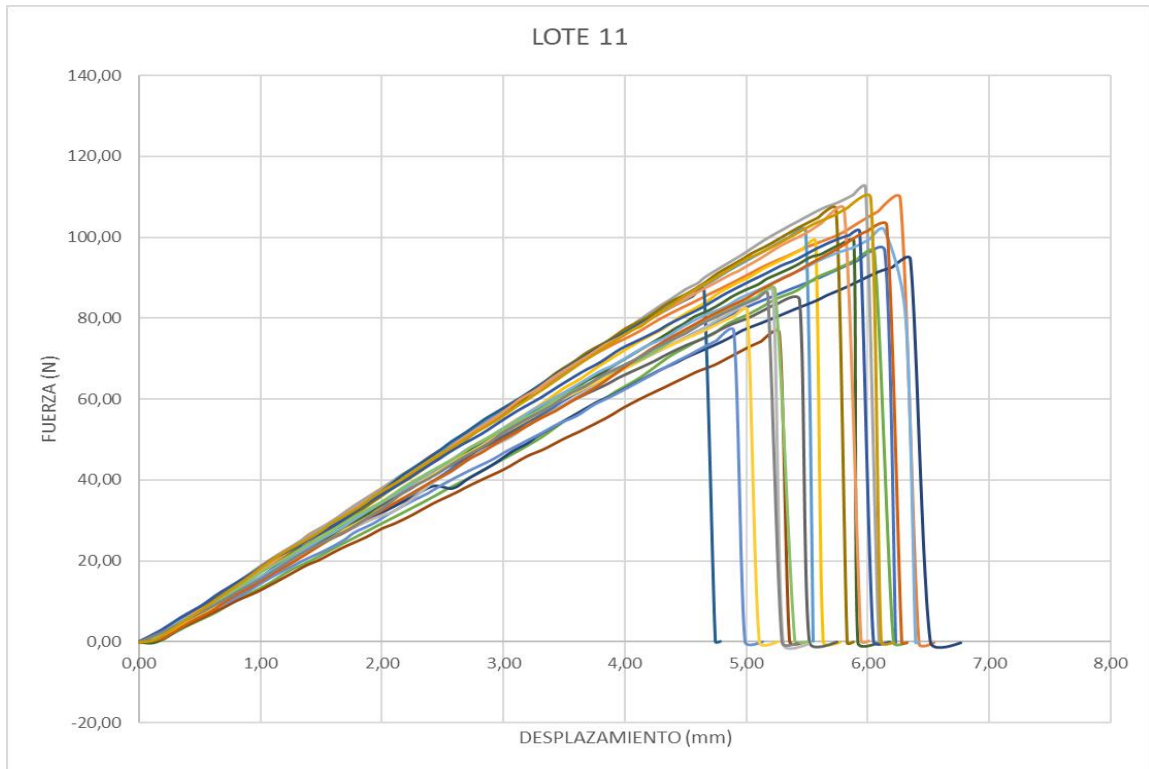


Probeta 10			
Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Sigma (Mpa)	Epsilon(%)
0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	0,14	0,70	0,08
1,65	0,21	1,16	0,12
2,70	0,37	1,90	0,21
4,09	0,55	2,88	0,31
5,55	0,70	3,90	0,39
6,56	0,83	4,61	0,46
7,61	0,96	5,36	0,54
9,04	1,10	6,36	0,61
10,40	1,26	7,32	0,70
11,85	1,43	8,34	0,80
12,95	1,53	9,11	0,86
14,53	1,72	10,23	0,96
15,74	1,85	11,07	1,04
16,92	1,97	11,90	1,10
18,52	2,11	13,03	1,18
20,12	2,25	14,16	1,26
21,85	2,40	15,38	1,34
22,89	2,52	16,11	1,41
25,14	2,71	17,69	1,51
27,60	2,98	19,42	1,66
29,17	3,14	20,52	1,75
30,50	3,27	21,46	1,83
31,79	3,43	22,37	1,92
33,36	3,61	23,47	2,02
34,86	3,77	24,53	2,11
35,84	3,88	25,22	2,17
37,40	4,03	26,31	2,25
38,97	4,23	27,42	2,37
40,17	4,35	28,26	2,43
40,90	4,45	28,78	2,49
42,41	4,61	29,84	2,58
43,77	4,79	30,80	2,68
45,12	4,94	31,75	2,76
46,43	5,10	32,67	2,85
47,61	5,26	33,50	2,94
48,98	5,44	34,47	3,04
50,47	5,63	35,51	3,15
51,68	5,80	36,36	3,24
52,49	5,90	36,94	3,30
53,58	6,07	37,70	3,39
55,01	6,26	38,71	3,50
55,79	6,40	39,25	3,58
56,26	6,50	39,59	3,64
57,23	6,64	40,27	3,71
58,00	6,79	40,81	3,79
58,83	6,92	41,39	3,87
59,97	7,08	42,19	3,96
60,53	7,21	42,59	4,03
61,74	7,40	43,45	4,14
62,21	7,52	43,77	4,21
62,72	7,63	44,13	4,27
63,39	7,80	44,60	4,36
64,05	7,95	45,07	4,45

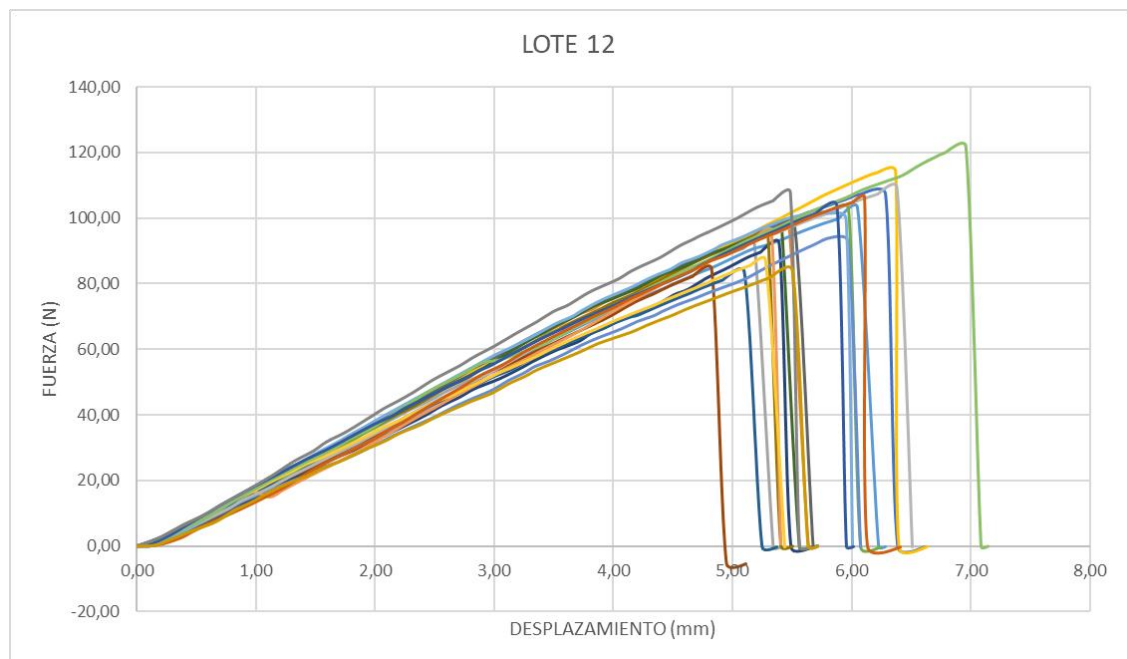
Tabla 21: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 10 del lote 8.



ANEXO 7 – DATOS RECOPIADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN: LOTES 11 Y 12



Gráfica 12: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 11.



Gráfica 13: Fuerza Vs Desplazamiento; Lote 12.



Probeta 3			
Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Sigma (Mpa)	Epsilon(%)
0,00	0,00	0,00	0,00
1,52	0,14	0,70	0,10
4,55	0,32	2,09	0,22
7,34	0,45	3,38	0,31
11,03	0,62	5,07	0,43
14,87	0,82	6,84	0,57
18,26	0,98	8,40	0,68
21,73	1,15	9,99	0,80
24,26	1,29	11,15	0,90
27,68	1,47	12,73	1,02
31,02	1,65	14,26	1,14
33,82	1,78	15,55	1,23
35,99	1,90	16,55	1,32
38,53	2,03	17,72	1,41
41,21	2,16	18,95	1,50
44,37	2,34	20,40	1,62
47,29	2,47	21,75	1,72
49,73	2,61	22,87	1,81
54,37	2,84	25,00	1,97
57,72	3,01	26,55	2,08
59,99	3,15	27,59	2,18
62,55	3,27	28,77	2,27
65,23	3,41	30,00	2,37
68,58	3,57	31,54	2,48
71,40	3,72	32,84	2,58
74,64	3,89	34,33	2,70
79,30	4,11	36,47	2,85
82,74	4,27	38,05	2,96
85,06	4,39	39,12	3,05
87,21	4,50	40,11	3,12
88,72	4,60	40,80	3,19
90,35	4,67	41,55	3,24
93,31	4,83	42,91	3,35
96,04	4,98	44,17	3,45
99,37	5,15	45,70	3,57
102,28	5,32	47,04	3,69
105,21	5,50	48,38	3,81
107,32	5,63	49,36	3,91
108,69	5,75	49,98	3,99
110,62	5,88	50,87	4,08
112,53	5,99	51,75	4,15

Tabla 22: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 3 del lote 11.



Probeta 18			
Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)	Sigma (Mpa)	Epsilon(%)
0,00	0,00	0,00	0,00
1,51	0,18	0,75	0,12
5,03	0,38	2,49	0,25
7,84	0,54	3,89	0,36
10,30	0,66	5,11	0,44
13,20	0,79	6,55	0,52
17,18	0,98	8,53	0,65
20,99	1,17	10,42	0,78
24,38	1,35	12,10	0,90
26,98	1,50	13,40	1,00
29,61	1,64	14,70	1,09
32,63	1,79	16,20	1,19
35,09	1,93	17,42	1,28
36,93	2,01	18,33	1,34
40,87	2,18	20,29	1,45
45,63	2,38	22,65	1,58
48,37	2,51	24,01	1,67
50,54	2,63	25,09	1,75
53,41	2,78	26,51	1,85
55,90	2,90	27,75	1,93
56,74	3,04	28,17	2,03
58,81	3,21	29,19	2,14
60,67	3,36	30,12	2,24
62,81	3,48	31,18	2,32
66,64	3,68	33,08	2,45
69,30	3,82	34,40	2,55
71,52	3,94	35,51	2,62
75,40	4,14	37,43	2,76
77,71	4,25	38,58	2,83
80,30	4,39	39,86	2,93
83,86	4,59	41,63	3,06
86,56	4,76	42,97	3,17
89,93	4,95	44,65	3,29
92,65	5,09	46,00	3,39
95,17	5,25	47,24	3,49
97,49	5,40	48,40	3,60
101,20	5,61	50,24	3,74
103,85	5,78	51,56	3,85
106,35	5,96	52,80	3,97
108,66	6,09	53,94	4,06
111,36	6,30	55,28	4,20
113,07	6,43	56,13	4,28
116,33	6,58	57,75	4,38
120,09	6,79	59,62	4,52
121,80	6,96	60,47	4,64

Tabla 23: Datos obtenidos del ensayo a flexión de la probeta 18 del lote 12.