



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

Influencia de las condiciones de trabajo en piezas generadas por 3D

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Pedro Jesús Caravaca Peñalver

Director: Ramón Francisco Pamies Porras

Codirector: Sebastian Bialaz

Cartagena, septiembre 2019



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE ACRONIMOS	7
Introducción.....	8
Contexto	10
Bases de la impresión 3D	15
Tecnologías de impresión 3D	17
Deposición fundida (FDM)	17
Impresión tridimensional (3DP)	20
Estereolitografía (SLA)	21
Sinterización por láser selectiva (SLS).....	22
Procesamiento digital por luz (DLP).....	24
Impresoras 3D	25
Impresora FDM	25
Impresora 3DP.....	27
Impresoras SLA.....	28
Impresora SLS	29
Impresora DLP	31
Materiales más populares en impresión 3D.....	32
Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).....	32
Ácido Poliláctico (PLA)	34
Policarbonato (PC)	36
Poliestireno de alto impacto (HIPS)	38
Tereftalato de polietileno (PET).....	38
Acetato de Polivinilo (PVA)	40
Nylon	40
Laybrick.....	41
Laywood.....	43
Objetivos.....	45
Metodología.....	46
Descripción de los programas.....	46
Descripción de los equipos experimentales.....	47
Equipo ZPrinter 450	47

Equipo Omni 3D.....	48
Equipo Zbuilder Ultra.....	49
Equipo Zwick Z010.....	50
Resultados.....	52
Obtención y caracterización de las probetas de tracción.....	56
Comparación de tecnología utilizada y método de impresión.....	64
Efecto del grado de relleno y radio de curvatura.....	66
Conclusiones.....	72
Bibliografía y Referencias.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de la disposición de los triángulos.....	8
Figura 2. Texto en formato ASCII	9
Figura 3. Descripción de los triángulos en formato binario	9
Figura 4. Diferentes casos del plano de corte. La superficie es paralela a la base, no es necesario calcular la intersección de los puntos (Caso I). La superficie toca el plano de corte con sus dos vértices y estos dos puntos son las ubicaciones de la intersección (Caso II). Uno de los vértices toca el plano de corte. La otra intersección se calcula utilizando una ecuación lineal (Caso III). Ninguna de los vértices del triángulo toca el plano de corte, pero uno de los vértices está al otro lado del plano (Caso IV).La superficie toca el plano en un solo punto el cual es redundante para el resto del código (Caso V).....	9
Figura 5. Ejemplos de dulces realizados en 3D (a) chocolate blanco y negro, (b) dulces coloridos, (c) estructuras de azúcar, (d) rosa de chocolate	11
Figura 6. Esquema de fabricación de alimentos mediante impresión 3D	12
Figura 7. Modelo de un sistema ventricular 3D	13
Figura 8. Modelo de un árbol Bronquial en 3D.....	13
Figura 9. Ejemplo de figura triangulada con el formato STL	15
Figura 10. Esquema del funcionamiento de una impresora con tecnología FDM	17
Figura 11. Esquema impresión FDM con dos extrusoras.....	18
Figura 12. Impresora Mendel	19
Figura 13. Impresora Wallace	19
Figura 14. Pasos a realizar para la impresión de un modelo en 3DP	21
Figura 15. Partes para la realización de un modelo mediante estereolitografía.	22
Figura 16. Partes necesarias para realizar una pieza mediante SLS	23
Figura 17. Fases para la realización de un modelo en SLS: (a) Fabricación de la pieza. (b) Limpieza. (c) y (d) Procesos de acabado	23
Figura 18. Esquema de fabricación mediante DLP	24
Figura 19. Comparación de muestras entre DLP y SLA	25
Figura 20. Impresora de uso personal, con una sencilla estructura	26
Figura 21. Impresora profesional Anet 8.....	26
Figura 22. Partes de una impresora FDM: 1. Mesa de trabajo 2. Cabezal 3. Tambor con material 4,5. Guías de cabezales de mesa 7. Controlador de impresora 8. Vigas estructurales 9. Fuente de alimentación.....	27
Figura 23. Modelo para una impresora que utiliza tecnología 3DP.	27
Figura 24. Elementos de una impresora 3DP: 1. Área de impresión 2. Plataforma 3. Bandeja de polvo 4. Plataforma 5. Rodillos de polvo 6. Cabezal de impresión 7. Cartucho de tinta 8. Cartucho de aglutinante 9. Elementos calefactores 10. Guías 11. Alojamiento 12 Panel de control 13. Fuente de alimentación.	28
Figura 25. Diseño de una impresora STL. Modelo: 3DCPI-SLA01	28
Figura 26. Modelo de una impresora que utiliza STL. Modelo Industrial informatizado.	29
Figura 27. Esquema STL. 1. Plataforma 2. Rascador 3. Refrigeración líquida 4. Cámara de trabajo 5. Espejo 6. Lentes 7. Láser 8. Guía de la plataforma 9. Carcasa 10. Fuente de alimentación.....	29

Figura 28. Impresora que utiliza la tecnología SLS	30
Figura 29. Esquema de una impresora que utiliza SLS 1. Área de impresión 2. Plataforma de construcción 3. Depósito de polvo 4. Plataforma de polvo 5. Rodillo 6. Lente láser 7. Sistema óptico 8. Láser CO ₂ 9. Guías 10. Carcasa 11. Panel de control 12. Fuente de alimentación.....	30
Figura 30. Ejemplo de impresora que utiliza DLP. Modelo: ProJet-1500 FTI.....	31
Figura 31. Sección de una impresora que utiliza la tecnología de impresión DLP. 1. Lámpara UV 2. Baño con resina fotosensible 3. Espejo 4. Mesa de trabajo 5,6. Guías 7. Controladores de imagen 8. Carcasa	31
Figura 32. Estructura química del ABS.....	32
Figura 33. Esquema de la obtención de ABS mediante emulsión.....	33
Figura 34. Esquema de la polimerización en masa del ABS.....	33
Figura 35. Bloques Lego realizados con ABS.....	34
Figura 36. Estructura química de los diferentes grados comerciales del PLA: D(-) y L (+)	35
Figura 38. Formación de PLA alto peso molecular.....	36
Figura 39. Bolsa de plástico biodegradable realizada con PLA.....	36
Figura 40. Componentes que forman el policarbonato.....	37
Figura 41. Síntesis del Policarbonato, donde el Bisfenol se junta con el fosgeno para dar policarbonato.	37
Figura 42. Ejemplo de objeto realizado con PC	37
Figura 43. El rodamiento es uno de los ejemplos más típicos del uso de HIPS.....	38
Figura 44. Polimerización del etilglicol	39
Figura 45. Estructura química del PET	39
Figura 46. Los envases de agua son ejemplos de PET	39
Figura 47. Estructura química del PVA: (a) Parcialmente hidrolizada, (b) Totalmente hidrolizada	40
Figura 48. Pastilla del lavavajillas como ejemplo PVA	40
Figura 49. Estructura de Nylon 6.....	41
Figura 50. Estructura de Nylon 6,6.....	41
Figura 51. Ejemplo de impresión con Laybrick	42
Figura 53. Filamento 1.75 mm Laywood	43
Figura 54. Rollo de papel higiénico es uno de los ejemplo de uso para Laywood.....	43
Figura 55. Ejemplo de objeto realizado con Bendlay con aspecto brillante.....	44
Figura 56. Interfaz del software TestXpert II.....	46
Figura 57. Impresora 3DP ZPrinter 450 perteneciente a Politécnica Lubelska.....	47
Figura 58. Impresora Omni 3D para impresión FDM.....	48
Figura 59. Propiedades mecánicas del filamento PLA.....	49
Figura 60. Impresora 3DP Zbuilder Ultra para impresión DLP	49
Figura 61. Propiedades mecánicas de la resina S1500	50
Figura 62. Máquina de ensayo a tracción Zwick Z010	51
Figura 63. Plano de la probeta realizada en programa CAD.....	52
Figura 64. Control de especificaciones de las muestras.	52
Figura 65. Tipos de impresión en función de la dirección de crecimiento de la capa: a) Horizontal- transversal (SUP). b) Vertical (Z) c) Horizontal- longitudinal (N).....	53

Figura 66. Muestras impresas según crecimiento de las capas a) Horizontal transversal (SUP) b) Impresión vertical (Z) c) Horizontal longitudinal (N)	54
Figura 67. Diseño de muestra en programa CAD	56
Figura 68. Caracterización de la muestra en formato STL.....	56
Figura 69. Conversión de muestra a formato STL	57
Figura 70. Generación de las distintas capas de la muestra.....	57
Figura 71. Código G.Code con las instrucciones necesarias para que nuestro equipo realice la impresión 3D.....	58
Figura 72. Ensayo a tracción de una muestra en el equipo Zwick Z010.....	58
Figura 73. Muestra realizada mediante 3DP	59
Figura 74. Gráfica de resistencia media para tecnología 3DP.....	60
Figura 75. Muestra realizada mediante la impresión FDM	60
Figura 76. Gráfica de resistencia media para tecnología FDM	61
Figura 77. Limpieza de los soportes de la impresión Horizontal-transversal	62
Figura 78. Gráfica de resistencia media para tecnología DLP	63
Figura 79. Gráfica tensión (N) - Deformación para diferentes tecnologías y sus respectivos materiales. (a) FDM (PLA). (b) DLP (Resina acrílica). (c) 3DP (Polvo compuesto).	64
Figura 80. Gráfica general de la resistencia media ofrecida según la tecnología, material utilizado y crecimiento de las capas.	65
Figura 81. Muestras R04 y R08 para diferentes grados de relleno.....	66
Figura 82. Gráfico de resistencia de la muestra de radio 0.4 al 20% de relleno	67
Figura 83. Gráfico de resistencia de la muestra de radio 0.4 al 40% de relleno	67
Figura 84. Muestras con diferentes grados de relleno: 20% (a). 60% (b). 80% (c). 100% (d)	68
Figura 85. Gráfica de tensión (N) - deformación (%) de muestras de radio 0.4 mm para diferentes grados de relleno: 20% (a). 60% (b). 80% (c). 100% (d).	69
Figura 86. Gráfico de resistencia de las muestras de radio 0.4 mm para todos los niveles de compactación	69
Figura 87. Gráfica de tensión-deformación de muestras de radio 0.8 mm para diferentes grados de relleno: 20% (a). 60% (b). 80% (c). 100% (d).	70

ÍNDICE DE ACRONIMOS

3

3DP
Impresión tridimensional · 20, 21, 27, 28, 29, 47,
49, 59, 60, 65, 74

A

ABS
Acrilonitrilo butadieno estireno · 23, 32, 33, 34,
38, 40, 42, 44

ASCII
Código estándar americano · 9

C

CAD
Diseño asistido por computadora · 8, 12, 13, 15

D

DLP
Procesamiento digital por luz · 24, 25, 62, 75

F

FDM
Modelado por deposición fundida · 11, 17, 18, 25,
27, 37, 45, 60, 61, 65, 66, 74

H

HIPS
Poliestireno de alto impacto · 38, 42

P

PA
Poliamida · 23

PC
Policarbonato · 23, 36, 37, 42, 75

PET
Tereftalato de polietileno · 38, 39, 42

PLA
Ácido poli láctico · 34, 35, 36, 40, 42, 44, 49, 62

PVA
Acetato de polivinilo · 40

PVC
Policloruro de vinilo · 23

R

RMN
Resonancia magnética · 12

S

SFF
Factor de forma pequeño · 11

SLC
Slice (Formato CAD) · 8

SLS
Sinterización selectiva por láser · 8, 10, 22, 23, 29,
30, 74

STL
Estereolitografía · 8, 9, 10, 15, 21, 22, 28, 29

T

TCMD
Tomografía computarizada multidetector · 12

Introducción

La impresión 3D es un conjunto de tecnologías de fabricación aditiva en las que el modelo a construir se genera por deposición de capas sucesivas a partir de un modelo virtual en tres dimensiones. En función de la tecnología utilizada, las impresoras 3D utilizan distintos procesos de funcionamiento. Entre ellos, procesos en los que se deposita el material después de su calentamiento como en el modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés), el que se lleva a cabo acumulando capas de polvo de diversos metales o plásticos, o fundidas entre sí mediante un láser (SLS, por sus siglas en inglés).

El formato Standard Triangle Language (STL, por sus siglas en inglés), fue desarrollado por 3D Systems y publicado en 1988 para convertir diseños asistidos por ordenador (CAD, por sus siglas en inglés), en 3D para uso en la estereolitografía. Sin embargo, pasó a ser la base de entrada de datos para la impresión 3D. El formato utiliza un proceso de triangulación para generar los elementos. Los triángulos se describen en el sistema de coordenadas: X, Y, Z. Se escogen las coordenadas de cada uno de los tres vértices del triángulo generado y el vector normal a la superficie creada. Escribir un modelo en formato STL está asociado a cometer imprecisiones que pueden ser corregidas mediante software especializado. Además de STL, se utilizan otros formatos alternativos: Slice (SLC, por sus siglas en inglés), o SEC.

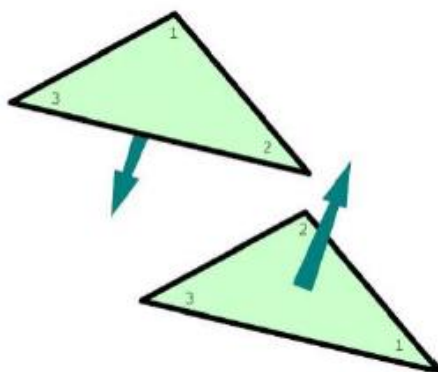


Figura 1. Ejemplo de la disposición de los triángulos

El formato STL, puede aparecer en el código estándar americano (ASCII), o de forma binaria cuyo código es hasta seis veces más pequeño.

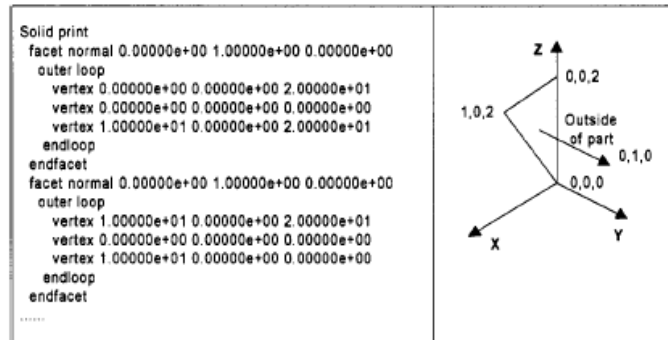


Figura 2. Texto en formato ASCII

```

<BINARY STL file format> ::= <STL file entity name> <facet number N> <facet info>
<STL file entity name> ::= <80 bytes entity name, spaces are used to fill the blank>
<facet number N> ::= <4 bytes long integer>
<facet info> ::= <facet normal> <facet vertices> <2bytes spaces> <facet normal>
                <facet vertices> <2bytes spaces> ... ..
<facet normal> ::= <1x,1y,1z,float,12bytes>
<fact vertex coordinate> ::= <x1,y1,z1,x2,y2,z2,x3,y3,z3,float 36 bytes>

```

Figura 3. Descripción de los triángulos en formato binario

En código ASCII, se puede observar la lista de triángulos individuales que definen la superficie del modelo espacial. Cada triángulo se describe mediante el vector normal y los vértices de los triángulos definidos mediante las componentes XYZ. La descripción del triángulo acaba con la palabra “endfacet” y los vértices con la palabra “endloop”

Cuando se utiliza el formato STL, debemos tener en cuenta los errores derivados del método de obtención de la superficie mediante la triangulación. Estos errores se pueden dividir en 4 grupos [1]:



Figura 4. Diferentes casos del plano de corte. La superficie es paralela a la base, no es necesario calcular la intersección de los puntos (Caso I). La superficie toca el plano de corte con sus dos vértices y estos dos puntos son las ubicaciones de la intersección (Caso II). Uno de los vértices toca el plano de corte. La otra intersección se calcula utilizando una ecuación lineal (Caso III). Ninguna de los vértices del triángulo toca el plano de corte, pero uno de los vértices está al otro lado del plano (Caso IV). La superficie toca el plano en un solo punto el cual es redundante para el resto del código (Caso V).

Contexto

En 1981, Hideo Kodama, del instituto municipal de Investigaciones Industriales de Nagoya (Japón), publicó sobre: *functional rapid-prototyping system using photopolymers*. Se construyó un modelo sólido, impreso en capas, cada una de ellas correspondía a una sección transversal del modelo. Aunque la primera impresión 3D fue asignada en 1984 a Chuck Hull al inventar la estereolitografía. Esta tecnología permitía crear modelos 3D utilizando datos digitales, que luego podían usarse para crear un objeto. En 1992 la compañía de Chuck Hull creó la primera impresora 3D funcionando con STL, permitió construir piezas complejas capa por capa. En este mismo año se introdujo la primera máquina del mundo de SLS, consistía en disparar un láser a un polvo en lugar de a un líquido.

Estas tecnologías estaban en su etapa de desarrollo y no eran perfectas, había deformaciones en el material a medida que se endurecía, y las máquinas eran realmente caras para dichos inventores. Décadas más tarde hasta día de hoy la impresión 3D ha demostrado que su potencial está aún en desarrollo.

1999 fue uno de los años más significativos para esta tecnología, ya que se imprimió e implantó el primer órgano 3D. Los científicos del Instituto de Medicina Regenerativa *Wake Forest* imprimieron la estructura sintética de una vejiga humana y después la recubrieron con las células de pacientes humanos. El tejido recién generado se implantó con poca posibilidad de rechazo, ya que el tejido estaba formado por sus propias células.

Durante la siguiente década, científicos de diferentes institutos fabricaron un riñón en miniatura funcional, así como, una pierna protésica con componentes complejos que se imprimieron dentro de la propia estructura e imprimieron los primeros vasos sanguíneos utilizando solo células humanas.

En torno a 2005, el proyecto *RepRap* del Dr. Adrian Bowyer lanzó un código abierto para crear una impresora 3D que podía imprimir la mayoría de sus piezas por sí misma.[2][3]

Hoy en día el precio de las impresoras 3D ha disminuido a la misma vez que ha mejorado la calidad y velocidad. Actualmente los diseñadores ya no se limitan a las

impresiones con plástico, si no que pueden utilizarse una gran multitud de materiales: oro, plata, chocolate...

Con los esfuerzos realizados por los investigadores, esta tecnología de impresión también se ha experimentado en varios tipos de sistemas alimentarios, utilizando los ingredientes adecuados se pueden mezclar y luego procesar pudiendo obtener formas más complejas y estructuras que son imposibles de fabricar o que no son económicas de producir mediante los métodos tradicionales. Esta nueva forma de obtener alimentos nos abre un abanico de posibilidades con nuevas texturas, sabores...

Durante la impresión se puede mezclar automáticamente una amplia variedad de ingredientes sobre algunas recetas con ausencia de un operador mediante la correcta configuración de los parámetros de la impresora.

La impresión de estos alimentos sigue el principio forma libre sólida (SFF). Incluyendo el método FDM aplicado a materiales fundidos en estado líquidos como: (*chocolate, gelatina, azúcares...*) todos ellos depositados directamente sin ningún agregado.



Figura 5. Ejemplos de dulces realizados en 3D (a) chocolate blanco y negro, (b) dulces coloridos, (c) estructuras de azúcar, (d) rosa de chocolate

Los ingredientes son extruidos en la plataforma mediante un motor eléctrico, la impresora es de doble alimentación se empujan dos materiales con diferentes colores de

la boquilla. Este tipo de impresora fue desarrollada por un fabricante holandés llamado *Builder*.

Una persona puede descargar un alimento en formato CAD y ajustarlo a sus propios gustos para más tarde imprimirlo [4].

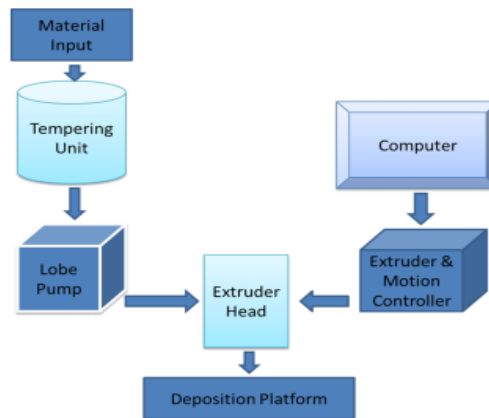


Figura 6. Esquema de fabricación de alimentos mediante impresión 3D

Por otra parte, cabe destacar la evolución en el ámbito de la medicina, como las imágenes han ido evolucionando en las últimas décadas. Con la evolución de la tomografía computarizada multidetector (TCMD) y la resonancia magnética (RMN), el diagnóstico radiológico se ha vuelto menos informativo. Los datos de las imágenes tridimensionales de alta resolución tienen un papel determinante en el diagnóstico ya que la visualización 3D nos ayuda a que la radiología sea fundamental para muchas disciplinas clínicas. El proceso de obtener la imagen 3D consta de tres pasos: Adquisición de imágenes, Post procesamiento de imágenes e Impresión 3D.

La adquisición de imágenes es una etapa de gran relevancia en la generación de imágenes 3D, la calidad final de la imagen dependerá de la calidad de los datos obtenidos. Actualmente, la adquisición de estas imágenes se puede hacer a una resolución de (400-600 micrones) con un buen contraste.

En segundo lugar, la etapa de post procesamiento se trata de estaciones de trabajo de alto rendimiento equipadas con las herramientas de segmentación basadas en el crecimiento de regiones, así como en herramientas de visualización y representación de superficie/volumen, proyección de intensidad máxima/mínima y la reforma multiplicar. Una amplia área de aplicación se encuentra en el campo quirúrgico, cirugía vascular, cirugía vascular, cirugía pediátrica. Además, se proponen algoritmos avanzados para las

imágenes de baja resolución. Esta segunda etapa consiste en coger los contornos de una región de interés para transformar computacionalmente en una malla de triángulo 3D, estos datos pueden procesarse aún mediante el uso de un software CAD, después de esta computación los datos se envían a la máquina de impresión 3D.

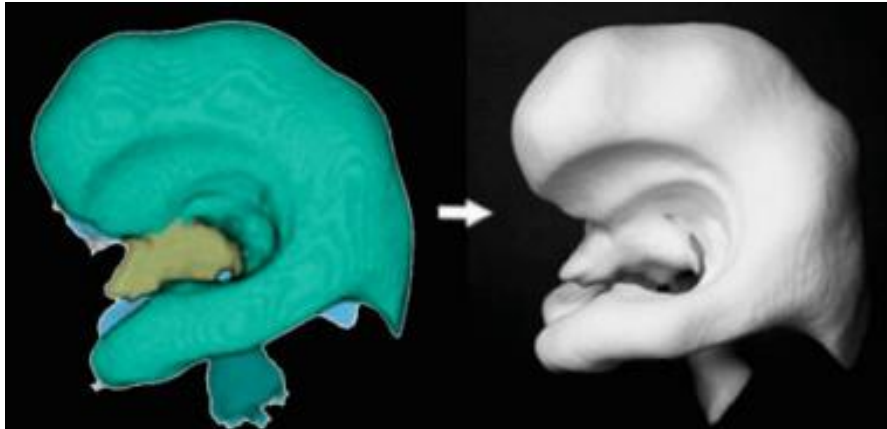


Figura 7. Modelo de un sistema ventricular 3D

Finalmente, la etapa de impresión 3D, basada en utilizar modelos diseñados en 3D para la reconstrucción de un modelo físico mediante la adición de capas de material. Con la fabricación aditiva, la impresora lee los datos de un dibujo CAD y establece sucesivas capas de líquido, polvo dependiendo de la tecnología utilizada

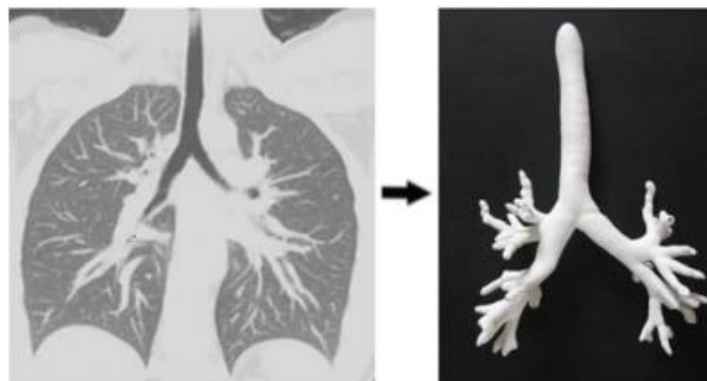


Figura 8. Modelo de un árbol Bronquial en 3D

Más allá de las joyas y los aviones, la impresión 3D se está utilizando ahora desde la fabricación de viviendas pasando por brazos robóticos, reemplazos de huesos hasta la impresión de partículas de pocos átomos de espesor para el uso de aparatos electrónicos y baterías [5].

Desde otro punto de vista esta tecnología ha sufrido un proceso de evolución marcado por tres distintas fases. En la primera fase, acentuada por arquitectos, artistas y diseñadores de nuevos productos que utilizaron la tecnología 3D para realizar prototipos de nuevos diseños. Hoy en día se siguen utilizando dicha tecnología para el mismo fin.

Según el diseñador de FutureFactories: «Cuesta lo mismo producir dos variantes diferentes que dos idénticas. El coeficiente de economías de escala de producción en serie no se aplica».

La segunda fase de evolución implica el uso de la impresión 3D en la creación de productos terminados. Esta etapa es denominada: «fabricación digital directa». Una aplicación de esta segunda fase es la gran producción que abarca la fabricación de puentes y productos para ser utilizados como productos de prueba, dichos productos se realizan con diferentes tamaños, estilos y colores. Según Terry Wohlers, gerente una firma de investigación de mercado especializada en impresión 3D: *“Más del 20% de la producción de impresoras 3D está ahora destinada a la realización de productos finales a diferencia de los prototipos”*.

En la tercera fase, las impresoras 3D serán propiedad y serán utilizadas por los consumidores finales, al igual que las actuales impresoras láser de escritorio. El cofundador de la empresa que fabricó la impresora 3D *Cupcake CNC* dijo: «Mi esperanza es que la gente, en lugar de ir a la tienda, se conecte *online* y descargue e imprima lo que necesite»

Las aplicaciones de arte y manualidades, así como de piezas de repuesto son aspectos importantes en esta fase. La tecnología de fabricación en 3D, se puede utilizar para producir figuras de diferentes colores y tamaños como piezas de ajedrez e incluso repuestos para las bocas de gas.

Según un exprofesor de tecnología e ingeniería: «En un futuro próximo tendremos una impresora 3D en nuestro escritorio capaz de producir piezas para nuestros coches, partes de nuestro ordenador e incluso partes de nuestra tostadora» [1, 6].

Bases de la impresión 3D

El proceso tecnológico de la impresión 3D se puede presentar en varias etapas comunes, dependiendo de la máquina utilizada.

La primera parte del proceso es preparar la geometría del producto. Esta comienza con el modelado en el software CAD. El modelo se define mediante superficies y sólidos determinando la geometría. Para que el proceso de impresión se lleve a cabo correctamente, los datos generados deben ser precisos; otra forma es importar la geometría del modelo utilizando un escáner óptico 3D. La imagen se crea en forma de un conjunto de puntos en el espacio, el resultado obtenido no es de gran utilidad por lo que, debemos de digitalizarla en un programa CAD, encargado de estructurar los puntos. Además, al diseñar un modelado debemos de poner atención en las curvas o superficies sin terminar ya que, obtendremos un producto con errores. Para eliminar estos errores debemos recurrir a simulaciones por ordenador del proceso de producción.

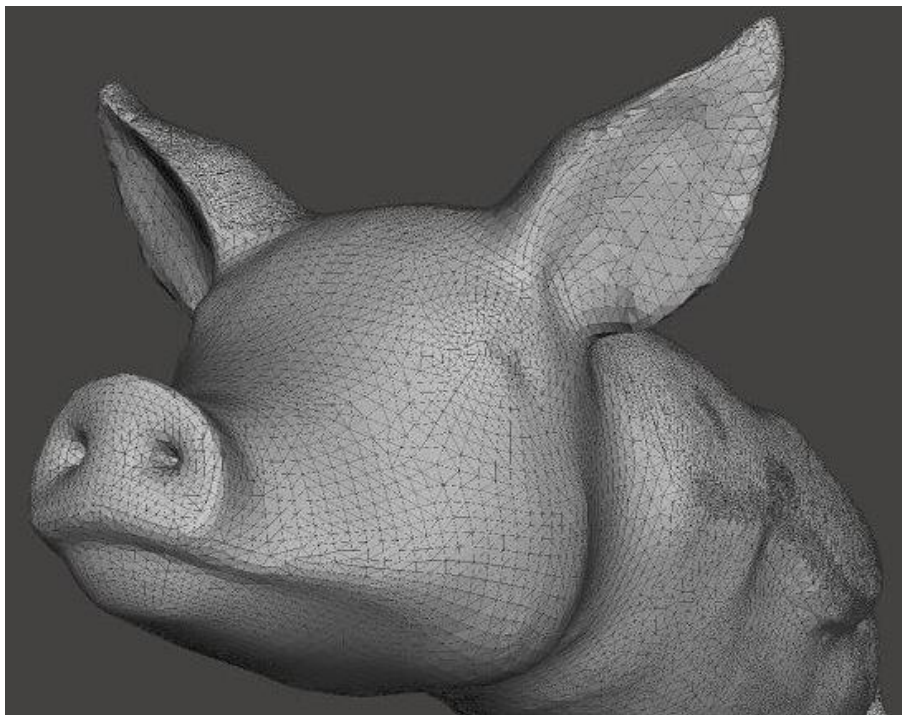


Figura 9. Ejemplo de figura triangulada con el formato STL

A continuación, se realizará la réplica del modelo en formato STL (ver figura 9) y su posterior obtención del código G mediante el uso de cualquier software dedicado, por ejemplo, Slic3r.

En este punto, el modelo está dividido en diferentes capas y con las instrucciones necesarias para que la impresora realice la impresión del modelo.

Una vez finalizada la impresión, se eliminan los excesos de material innecesario y se le da un acabado, etapa que se realiza para mejorar las condiciones del producto, el objeto es sometido a: impregnación, encerado, pintura entre otros, dependiendo de los requisitos solicitados. [7]

Factores

Los tres factores principales en las impresiones 3D son: calidad de la superficie requerida, durabilidad del producto y el tiempo de impresión. La forma en que se organiza el modelo en el espacio de trabajo afecta a todos estos factores. Además, en grandes inclinaciones de las paredes, aparecen las llamadas "escaleras" que son visibles en la superficie del producto. La dirección del crecimiento de la capa afecta a la rugosidad de la superficie, generalmente en menor medida en la superficie superior que en la superficie inferior y a la resistencia del producto terminado. La menor resistencia del producto se obtiene en la dirección perpendicular a la dirección de construcción de la capa.

El tiempo de construcción del elemento tiene un impacto en el costo del producto terminado. Actualmente, en la tecnología de impresión 3D, donde las características de la condición de la superficie son más importantes que los requisitos de resistencia, el elemento fabricado se coloca de manera que reduce su tiempo de ejecución al colocar la dimensión más pequeña del objeto a lo largo de la dirección del eje Z. Esto se debe a que el factor dominante en el tiempo de producción es el número de capas, por lo que cuanto menor sea la dimensión en el eje Z, menos capas. Otro problema al elegir la ubicación del producto es utilizar el menor número de soportes posibles. El posicionamiento correcto del objeto y el número mínimo de soportes tienen un impacto en la reducción del tiempo de producción y reduce el tiempo necesario para limpiar la pieza de trabajo, desgaste del material y proporcionar mejores condiciones de resistencia. El último problema son las dimensiones del producto terminado, que pueden limitar el espacio de trabajo por lo que, hay que asegurarse de que el objeto esté configurado de tal manera que ninguna dimensión se extienda más allá del área de trabajo.

Tecnologías de impresión 3D

Deposición fundida (FDM)

Es un proceso de extrusión de material fundido mediante la aplicación de un cabezal extrusor llamado boquilla que recibe el filamento de una bobina. Estas boquillas son reemplazables y tienen dos funciones principales: plastificar el material y aplicarlo al producto impreso. La particularidad de este método es que el material comienza con forma de fibra enrollada en el tambor, se extiende y se introduce en la cabeza donde se plastifican y finalmente se solidifica formando la base para posteriores capas. Por regla general, los cabezales de impresión se mueven en los ejes X-Y, mientras que la plataforma donde se construye el producto únicamente en el eje Z

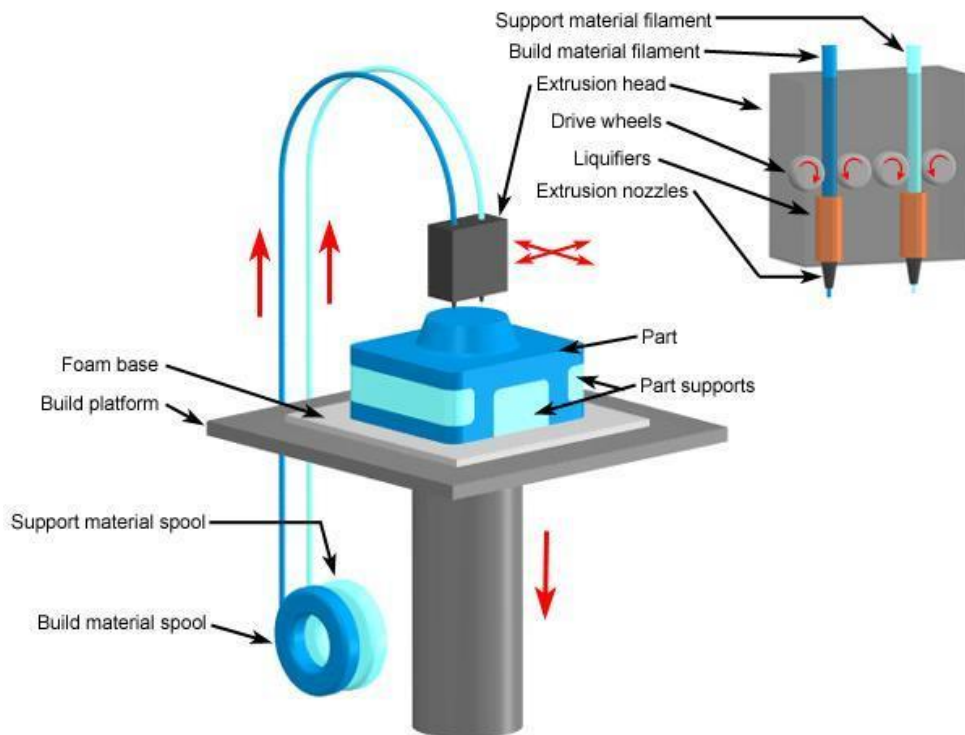


Figura 10. Esquema del funcionamiento de una impresora con tecnología FDM

Esta tecnología también incluye un segundo extrusor y boquilla para depositar el material de soporte requerido para la fabricación de mejores acabados superficiales y geometrías complejas. Se utilizan impresoras de doble tambor, donde se utiliza el material de destino para la parte impresa, mientras que el material destinado para los soportes de la impresión con propiedades que permiten la eliminación de material innecesario después del proceso de impresión

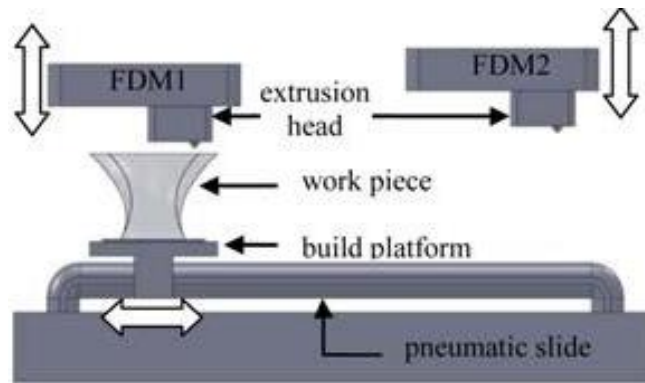


Figura 11. Esquema impresión FDM con dos extrusoras.

Actualmente, se conocen impresoras FDM que permiten imprimir con varios materiales al mismo tiempo. Se utilizan materiales poliméricos y derivados en función de las necesidades de producción.

Las principales ventajas de esta tecnología son: variedad de materiales, cambio fácil de material, bajo precio tanto de la impresora como de los propios materiales, bajas tolerancias y no necesita supervisión.

Sin embargo, como desventajas cabe destacar: la baja velocidad de impresión cuando se desean obtener modelos macizos y de gran tamaño, necesidad de crear soportes o estructuras de apoyo en las caras inclinadas (voladizo) y la baja resistencia de las piezas impresas en el eje Z. [8, 9]

La impresión 3D con fuentes libres, es una alternativa para estudiantes, arquitectos o diseñadores que desean invertir una pequeña cantidad en una impresora 3D de modelo por deposición fundida. A través, de herramientas como *Maker* se pueden encontrar variedad de diseños: piezas, componentes normalizados, herramientas, etc.

El precio de estas impresoras oscila entre 600-2000 euros, en función del tipo de impresora y tus intereses. Algunos de los modelos actuales son: *Mendel*, *Darwin* y *Wallace*.

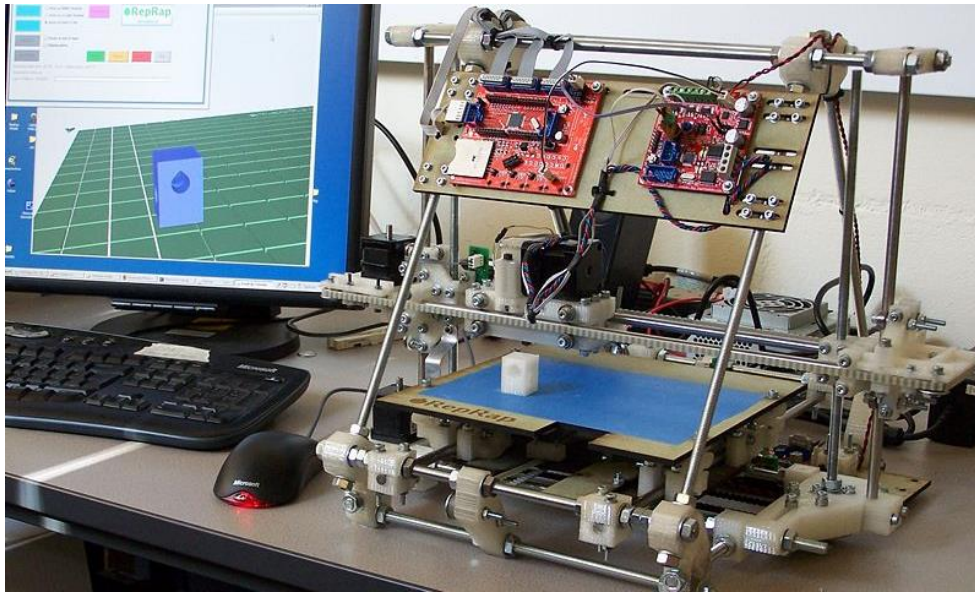


Figura 12. Impresora Mendel

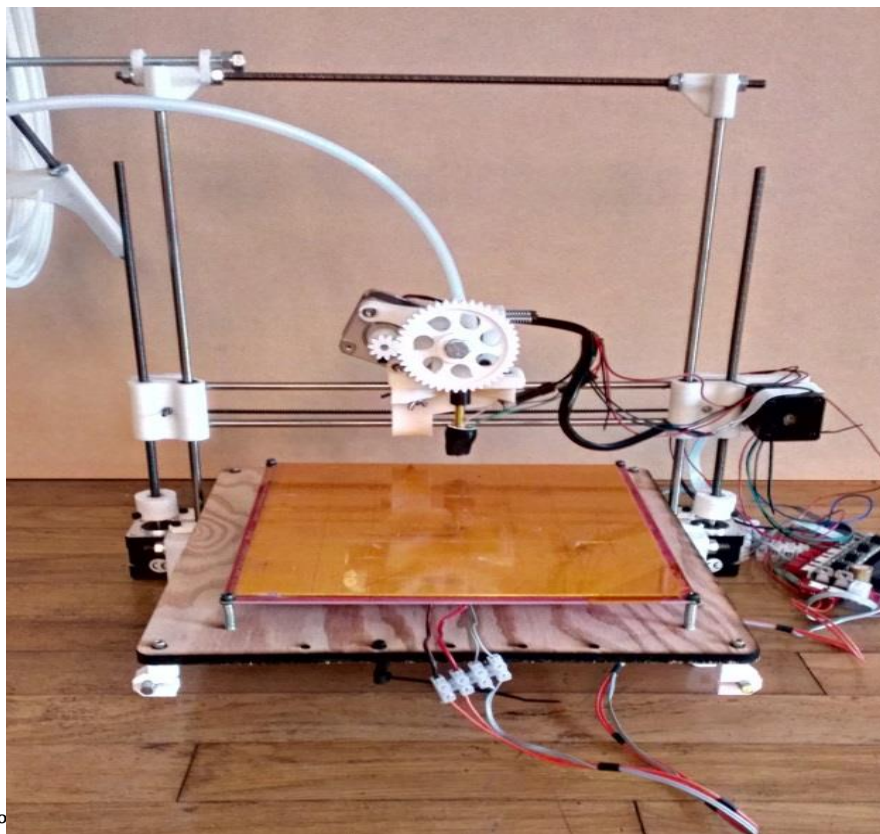


Figura 13. Impresora Wallace

Una vez seleccionada la impresora, se pueden descargar las piezas de la impresora en otra impresora (auto replicación) u optar por comprar un kit con todos los componentes.

El montaje, no suele ser complejo y además junto al kit se incluye un plano de montaje fácil de interpretar. [10, 11]

Impresión tridimensional (3DP)

Es un proceso aditivo de fabricación, en el que un plástico en polvo se distribuye sobre un rodillo de giro, mediante la impresión por chorro de tinta de un cabezal que contiene una serie de chorros de líquido aglomerante, arrastra la capa de polvo y deposita las gotas de aglomerante en los lugares definidos por el corte 2D.

Al terminar la capa, la plataforma de impresión desciende una distancia igual al espesor de esta hasta acabar la pieza. Generalmente, el grosor de las capas está dentro del rango $0.01 - 0.2 \text{ mm}$, dependiendo del grado de precisión de la reproducción y la complejidad del detalle impreso. Sin embargo, las estructuras impresas no son lo suficiente fuertes para ser utilizadas directamente y deben sinterizarse para compactar la matriz. Además, esta tecnología permite utilizar una gran variedad de materiales: cerámica, metales y polímeros con gran variedad de geometrías. Sin embargo, aún se necesita perfeccionar esta tecnología, así como, estudiar los tamaños mínimos e integridad de las estructuras afectadas por múltiples factores relacionados con: impresora, polvo, aglomerante, etc.

El proceso de impresión 3DP se puede dividir en una primer etapa aplicando una capa de polvo de la bandeja a la superficie de la plataforma y añadir el adhesivo a la sección transversal de la primera capa del producto. El polvo restante se utilizará en capas posteriores.

Posteriormente, bajamos lentamente la plataforma una distancia igual al grosor de la capa de producto que se esté construyendo.

Finalmente, se eleva la plataforma que contiene el producto y se retira el polvo excedente. El producto obtenido puede utilizarse como base y mezclarse con otros materiales para aumentar la resistencia o flexibilidad.

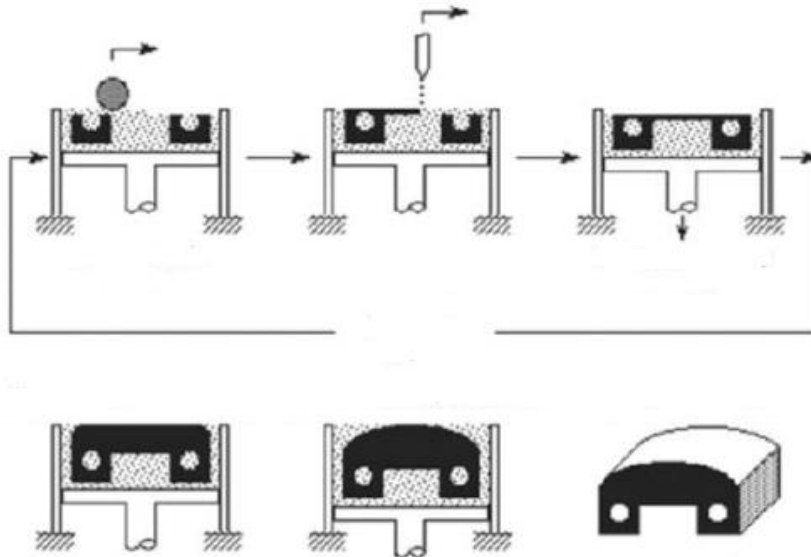


Figura 14. Pasos a realizar para la impresión de un modelo en 3DP

Las principales ventajas son la alta velocidad de impresión y posibilidad de imprimir en varios colores. Como inconvenientes cabe mencionar la poca precisión, baja calidad superficial, necesidad de postcurado y en algunos casos de soportes. [12]

Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía es un proceso de fabricación de aditivos basado en el endurecimiento local de un material líquido mediante la irradiación con un rayo láser ultravioleta. El producto sumergido en el polímero líquido se mueve progresivamente hacia abajo en el eje Z, y cada capa endurecida se combina con la anterior produciendo un modelo compacto. Una vez finalizado, el objeto se retira del polímero líquido, se lava y se vuelve a realizar un postcurado en un horno.

Debido al entorno líquido, si el objeto es extenso o tiene formas irregulares será necesario construir soportes especiales para endurecer la estructura, generados automáticamente por el programa que controla el proceso de creación de prototipos. Al retirar el producto, los apoyos debemos retirarlos manualmente.

Es importante utilizar la potencia máxima del láser para reducir el tiempo de impresión. Aunque, la potencia va disminuyendo con el tiempo, por lo que es importante reemplazar el láser cada cierto periodo de tiempo.

En comparación con otras tecnologías utilizadas en el mercado, esta tecnología proporciona una gran precisión dimensional y un gran acabado superficial que puede

mejorarse con el uso de resinas. Además de ofrecer ventajas en cuanto a la facilidad de acceso a la cámara de fabricación, óptica flexible y uso de una gran variedad de materiales de construcción.

Desafortunadamente, el uso de resinas termoestables está desaconsejado debido a su toxicidad y precio, además la necesidad de un postcurado es un método muy costoso, exclusivamente a disposición de grandes empresas [13].

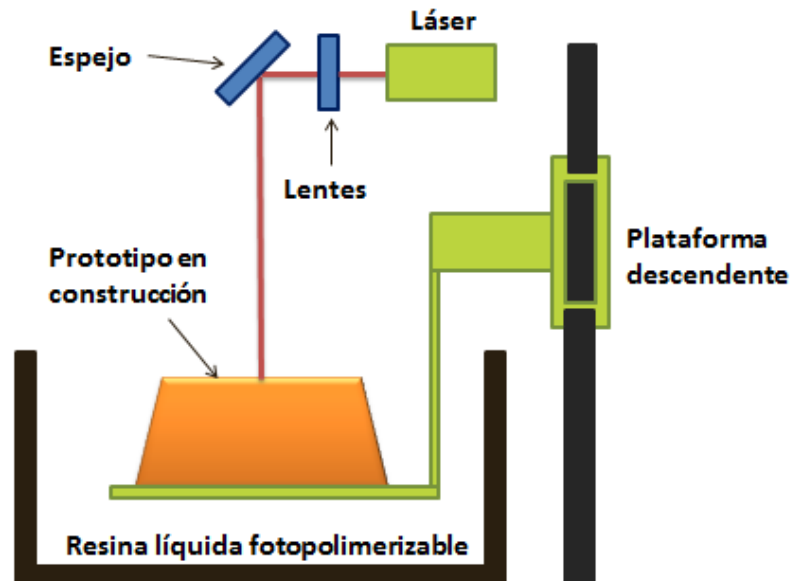


Figura 15. Partes para la realización de un modelo mediante estereolitografía.

Sinterización por láser selectiva (SLS)

Se trata de un proceso de fabricación aditivo que utiliza un láser CO_2 como fuente de energía para sinterizar el material en polvo. La sinterización es un proceso de fabricación de piezas sólidas basado en calentar una pieza durante un tiempo determinado a una temperatura inferior al punto de fusión del metal base. La elevada temperatura provoca la soldadura de las partículas de polvo y la difusión de los elementos aleantes. El láser recorre las secciones de cada una de las capas a solidificar y calienta el polvo por encima de su temperatura de sinterización generando una estructura compacta. Después de cada etapa de sinterización, el material se baja junto la plataforma de soporte, una distancia igual al grosor de la capa. El rayo láser sinteriza el área designada de la capa de polvo, al mismo tiempo que la capa anterior se funde

obteniendo un producto uniforme. Además, las regiones que el láser no recorre dejan polvo suelto, que puede desprenderse fácilmente y ser utilizado como elemento de soporte para la sinterización de capas posteriores.

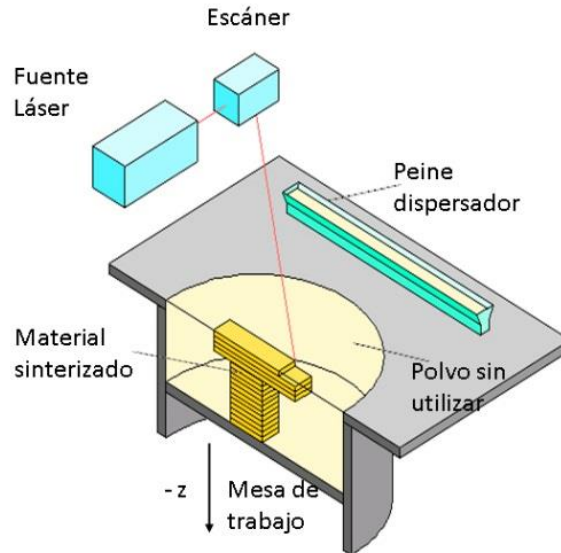


Figura 16. Partes necesarias para realizar una pieza mediante SLS

Este método presenta la ventaja de poder utilizar una gran cantidad de materiales: polímeros (PC, PA, PVC, ABS), cerámica y metal; destacar la ausencia de una plataforma de soporte y que el producto obtenido no necesita tratamientos de endurecimiento ya que, las piezas obtenidas presentan buenas propiedades mecánicas.

Como desventaja es que presenta una baja calidad superficial y alta porosidad por ello, existen ciertos límites, para evitar, grosores en la pared, huecos, agujeros, alfileres. [14, 15]

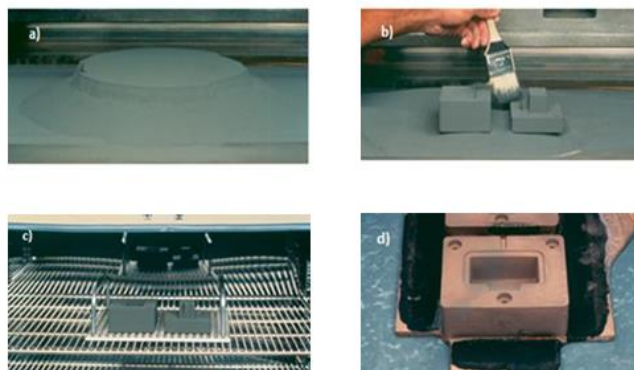


Figura 17. Fases para la realización de un modelo en SLS: (a) Fabricación de la pieza. (b) Limpieza. (c) y (d) Procesos de acabado

Procesamiento digital por luz (DLP)

Esta tecnología utiliza una resina de fotopolímero que es capaz de solidificar bajo una fuente de luz. Se trata de una tecnología de luz digital con polimerización en cuba.

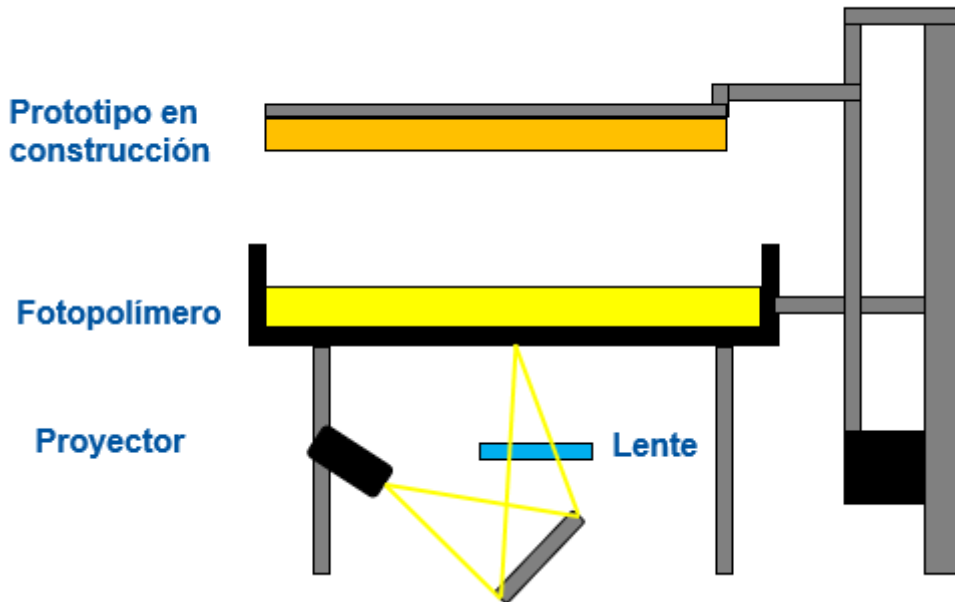


Figura 18. Esquema de fabricación mediante DLP

Al igual que en SLA, utiliza una resina y una fuente de luz para producir las distintas partes del objeto final, la principal diferencia es el tipo de fuente de luz que se utiliza para tratar la resina.

En DLP la fuente de luz es una pantalla de proyector de luz digital. Gracias a esta pantalla, se consigue una mayor rapidez que en SLA debido a:

- Con SLA, el láser tiene que curar la resina utilizando una técnica punto a punto mientras que, la pantalla de un proyector DLP muestra la imagen de la capa, pudiendo curar (exposición a la luz ultravioleta) todos los puntos de forma simultánea.
- Debido a que una impresora 3D DLP usa una pantalla de proyector digital, es difícil imprimir grandes piezas detalladas con su volumen completo. Para conseguir grandes detalles, el tamaño de la imagen del proyector debe ser suficientemente pequeño para que no se puedan ver los *pixeles* individuales.

Otra de las limitaciones es el acabado superficial cuadrado, ya que, los *voxels* (píxeles en 3D), son rectangulares, las secciones curvas no tienen muy buen acabado si lo comparamos con STL, aunque se puede resolver lijando la pieza tras la impresión. [16]



Figura 19. Comparación de muestras entre DLP y SLA

Impresoras 3D

Independientemente de la tecnología utilizada durante la impresión, toda impresión 3D consta básicamente de dos elementos: una impresora y unidad control. Además, consta de las siguientes subelementos: cabezal de impresión, mesa o cámara de trabajo, sistema de alimentación, carcasa, disposición de las guías de impresión, sensores de temperatura, motoras paso a paso y controladores de ejes.

En función del método de impresión utilizada, los elementos de la impresora variaran. A continuación, se describirá los componentes y una representación gráfica en función de la tecnología utilizada.

Impresora FDM

Este tipo de impresoras son las más simples en cuanto a su estructura y más extendidas en la industria de impresión 3D. Generalmente se utilizan como impresoras personales, aunque, también puede ofrecer una construcción más compleja a muy bajo coste.



Figura 20. Impresora de uso personal, con una sencilla estructura



Figura 21. Impresora profesional Anet 8

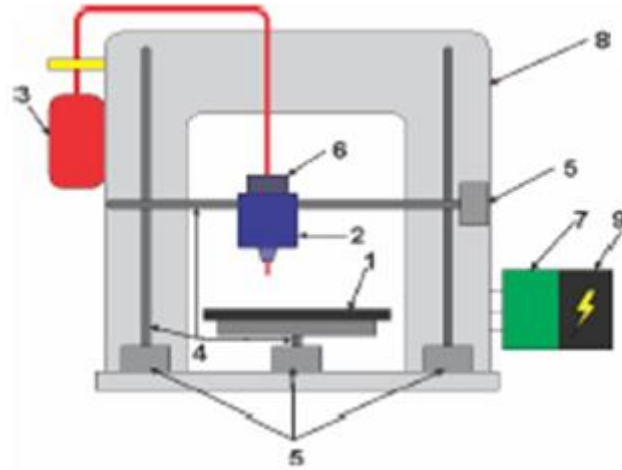


Figura 22. Partes de una impresora FDM: 1. Mesa de trabajo 2. Cabezal 3. Tambor con material 4,5. Guías de cabezales de mesa 7. Controlador de impresora 8. Vigas estructurales 9. Fuente de alimentación

Impresora 3DP

La construcción de este tipo de impresoras es más complicada debido al uso de varios materiales para imprimir simultáneamente, tales como: polvo, aglutinante y fijador. Las impresoras más modernas son capaces de realizar todo el proceso de impresión en una sola máquina, mientras que los modelos más antiguos era necesario contar con más de un dispositivo para poder realizar impresión.



Figura 23. Modelo para una impresora que utiliza tecnología 3DP.

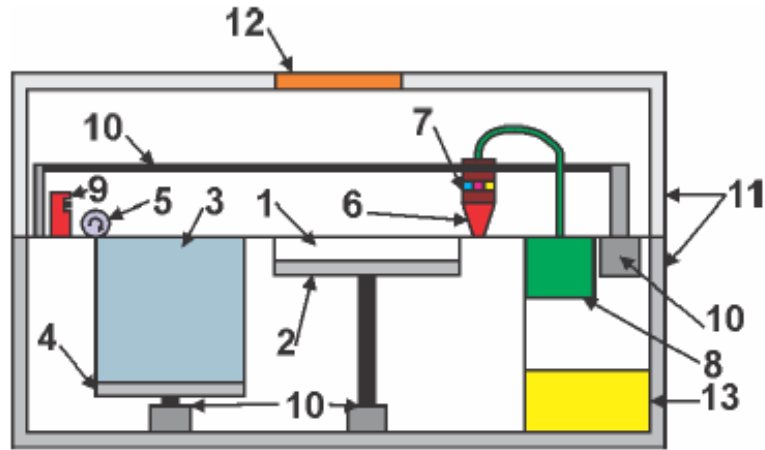


Figura 24. Elementos de una impresora 3DP: 1. Área de impresión 2. Plataforma 3. Bandeja de polvo 4. Plataforma 5. Rodillos de polvo 6. Cabezal de impresión 7. Cartucho de tinta 8. Cartucho de aglutinante 9. Elementos calefactores 10. Guías 11. Alojamiento 12. Panel de control 13. Fuente de alimentación.

Impresoras SLA

Este tipo de impresoras están diseñadas para permitir recrear desde un prototipo hasta la fabricación tradicional, como mecanizado o moldeo por inyección. Son fáciles de limpiar y postprocesar. La resina es fácil de eliminar de los canales internos de la impresora, lo que permite diseños con cavidades, lo que no sería posible con otro tipo de impresiones 3D.

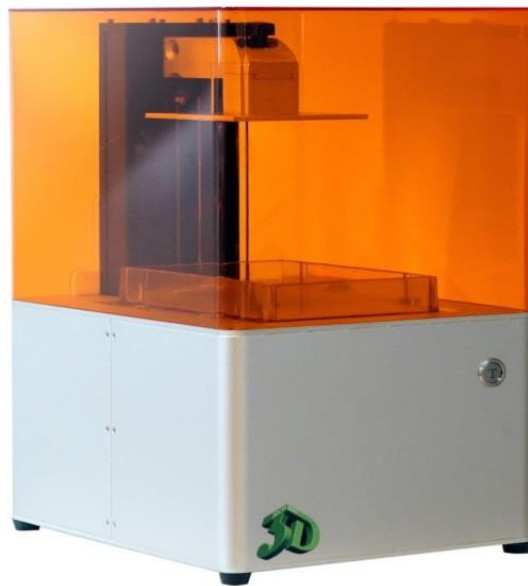


Figura 25. Diseño de una impresora STL. Modelo: 3DCPI-SLA01



Figura 26. Modelo de una impresora que utiliza STL. Modelo Industrial informatizado.

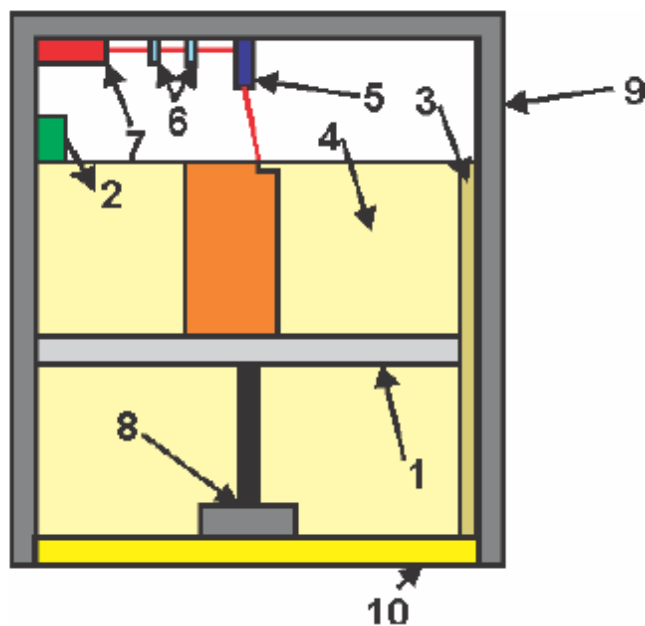


Figura 27. Esquema STL. 1. Plataforma 2. Rascador 3. Refrigeración líquida 4. Cámara de trabajo 5. Espejo 6. Lentes 7. Láser 8. Guía de la plataforma 9. Carcasa 10. Fuente de alimentación.

Impresora SLS

Debido a las similitudes con la tecnología 3DP la impresora tiene una construcción similar. Sin embargo, se utiliza la luz láser en lugar del sistema de impresión de plástico líquido. Este tipo de impresora se utiliza únicamente para fines industriales debido a su alto costo y tamaño.



Figura 28. Impresora que utiliza la tecnología SLS

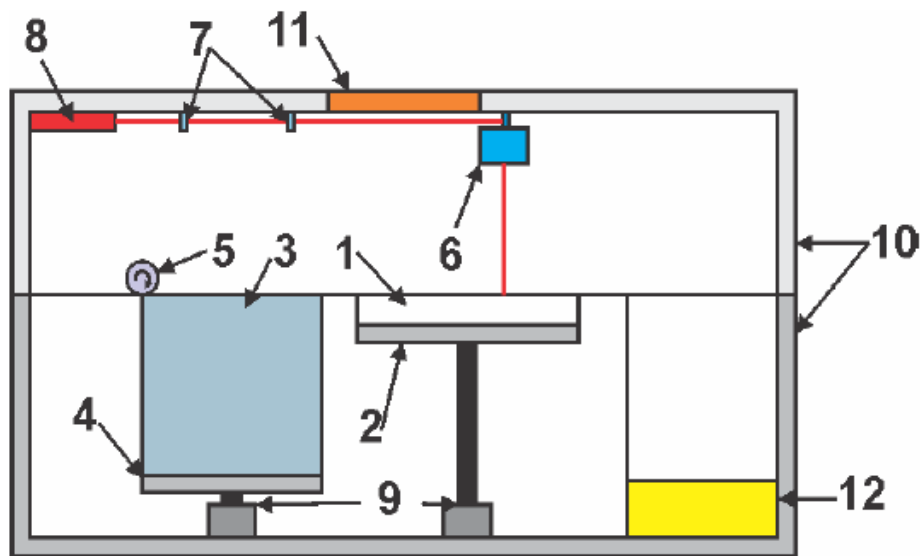


Figura 29. Esquema de una impresora que utiliza SLS 1. Área de impresión 2. Plataforma de construcción 3. Depósito de polvo 4. Plataforma de polvo 5. Rodillo 6. Lente láser 7. Sistema óptico 8. Láser CO₂ 9. Guías 10. Carcasa 11. Panel de control 12. Fuente de alimentación

Impresora DLP

En esta impresora, a diferencia de las demás, la impresión se realiza de arriba hacia abajo. Generalmente suelen ser impresoras personales de pequeñas dimensiones



Figura 30. Ejemplo de impresora que utiliza DLP. Modelo: ProJet-1500 FTI

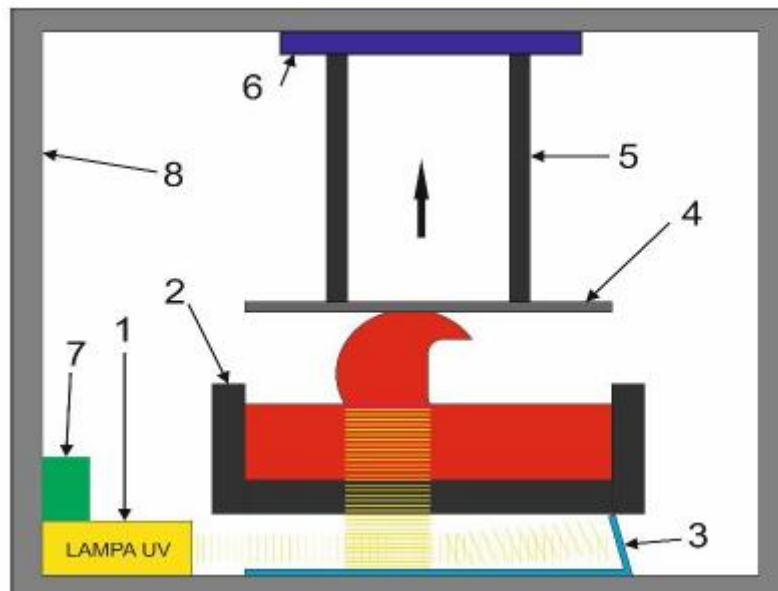


Figura 31. Sección de una impresora que utiliza la tecnología de impresión DLP. 1. Lámpara UV 2. Baño con resina fotosensible 3. Espejo 4. Mesa de trabajo 5,6. Guías 7. Controladores de imagen 8. Carcasa

Materiales más populares en impresión 3D

Los filamentos que se utilizan en la impresión 3D se venden en bobinas donde se especifica: tipo de polímero, temperatura de trabajo, temperatura de la cama, plataforma calefactada y su diámetro 1,75 o 3 mm. Actualmente el filamento de 3 mm es el más utilizado, aunque, el de 1,75 cada vez está siendo más utilizado debido a su facilidad de arrastre. Todas estas especificaciones son necesarias para configurar la temperatura de la base donde se va a realizar la impresión. Es muy importante regular la temperatura para el pegado de las capas y así evitar el desplazamiento y las deformaciones.

Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

El ABS es un termoplástico formado por tres monómeros: Acrilonitrilo (15-35%): en presencia de polibutadieno otorga resistencia térmica y química, Butadieno (5-30%) : monómero elastomérico causante de la ductilidad, resistencia al impacto, ofrecer una mayor maquinabilidad y abaratar el costo de la pieza, y Estireno (40-60%).

En general, es un material que muestra buenas propiedades como aislante, así como, resistencia al impacto y a bajas temperaturas.

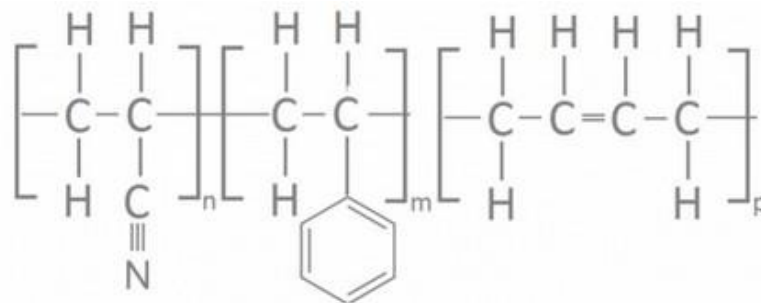


Figura 32. Estructura química del ABS

El ABS se puede obtener mediante tres procesos: emulsión, en masa, o en masa-suspensión. Generalmente se utiliza el proceso de emulsión para materiales de alta resistencia al impacto, mientras que el proceso de masa para materiales de menor resistencia al impacto.

El proceso de polimerización en emulsión está dividido en dos pasos. En primer lugar, se produce un látex de caucho y luego se polimeriza el estireno y el acrilonitrilino en presencia de caucho para producir un látex de ABS.

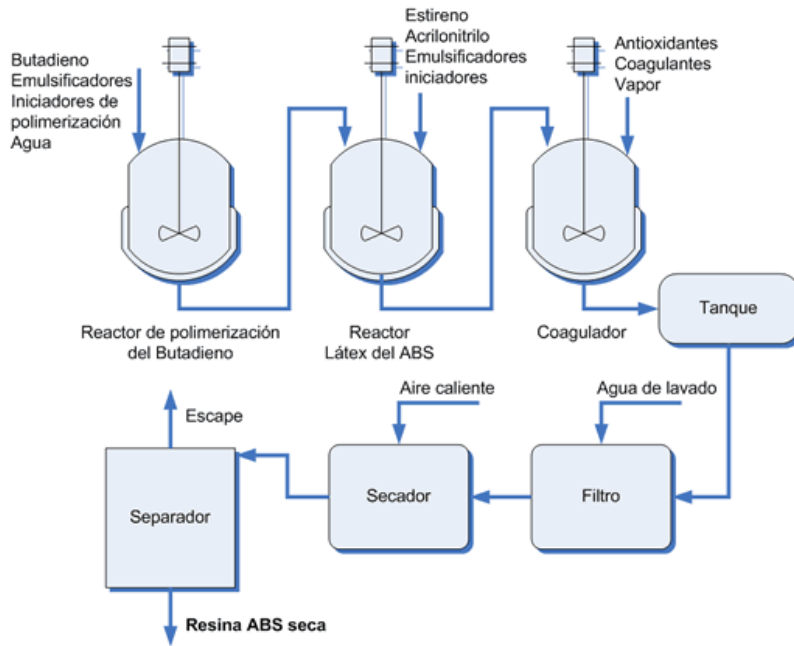


Figura 33. Esquema de la obtención de ABS mediante emulsión

Para el proceso de polimerización en masa, son necesarios unos reactores continuos donde el caucho es una solución polimerizada de polibutadieno lineal, aunque en este proceso de polimerización en masa, también se utiliza una emulsión polimerizada de ABS con alto contenido de caucho.

La mezcla de monómeros de acrilonitrilo y estireno en presencia del polibutadieno es polimerizada mediante un cambio de fase.

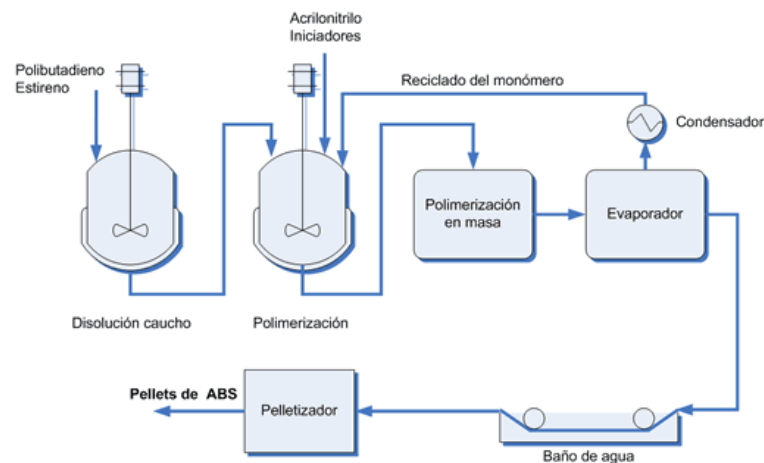


Figura 34. Esquema de la polimerización en masa del ABS

Finalmente, para el proceso de polimerización en masa-suspensión se utiliza una reacción en masa para producir una mezcla en la que hay material parcialmente convertido en polímero y monómeros y luego se emplea una técnica de reacción en suspensión para completar la polimerización.

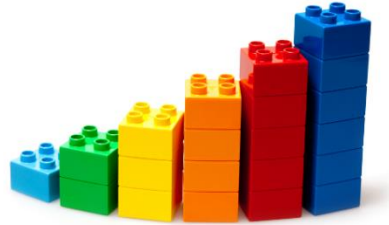


Figura 35. Bloques Lego realizados con ABS

Como características generales del ABS cabe destacar:

Tiene una temperatura de procesamiento comprendida entre 190-260 °C siendo recomendable la impresión en torno a los 230 °C, la densidad es $1050 \frac{kg}{m^3}$ y la temperatura de la plataforma calefactada debe estar entre 90 y 115 °C.

La ventaja del ABS frente el PLA es una mayor resistencia, menos fragilidad y una mayor resistencia a temperaturas altas. Por otra parte, entre sus desventajas cabe destacar que no es un material biodegradable, se debe degradar con radiación ultravioleta, por lo que no es adecuado para fabricar piezas de exterior.

Se utiliza principalmente para la producción de bloques de niños, pero su aplicación se puede encontrar en la industria, en la fabricación de electrodomésticos, aparatos electrónicos, componentes de muebles... [17, 18]

Ácido Poliláctico (PLA)

Se trata de un poliéster termoplástico biodegradable obtenido a partir de la fermentación del almidón, yuca o la caña de azúcar. Aunque mecánicamente no es tan resistente como el ABS, se utiliza en modelos que vayan a estar en contacto con alimentos.

Su composición es aproximadamente 92% L- láctico y 8% meso-láctico. Obtenido mediante la polimerización de ácido láctico, se trata de un compuesto versátil utilizado: industrias químicas, farmacéuticas, de alimentos y del plástico. Dicho ácido está

compuesto por un carbono asimétrico dando lugar a actividad óptica (capacidad de una sustancia quiral para rotar el plano de la luz polarizada). Existen dos isómeros ópticos, D (-) láctico (dextrógiro) y L (+) láctico (levógiro) que originan distintos grados comerciales de PLA, tales como: PLLA (*L-lactic acid*), PDLLA (*D, L-lactid acid*) con propiedades similares al caucho y un tiempo de biodegradación mucho más corto.

PLLA tiene un grado de cristalinidad del 35% y un largo periodo de biodegradación de hasta 2 años, mientras que PDLLA tiene unas propiedades mecánicas similares al caucho y un tiempo de biodegradación mucho más corto.

Como características generales, caben destacar: la temperatura de procesamiento oscila entre 170-250 °C, no emite gases peligrosos por lo que no requiere precauciones especiales durante su procesamiento y que en función de la relación L/ D, variaremos la temperatura de fusión y el grado de cristalinidad.

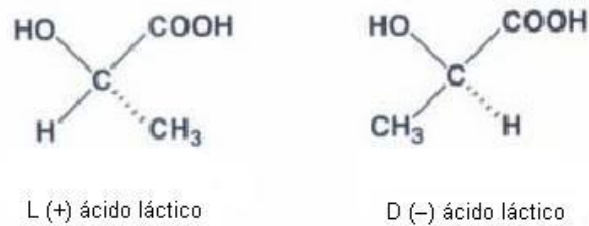


Figura 36. Estructura química de los diferentes grados comerciales del PLA: D(-) y L (+)

El ácido láctico no puede ser directamente polimerizado para ser utilizado como producto útil ya que, cada reacción genera una molécula de agua, dificultando la formación de la cadena polimérica obteniendo pesos moleculares muy bajos.

Debemos realizar una despolimerización para obtener un grupo llamado lactida (éster de dilactato), realizamos una polimerización por apertura de anillo utilizando cloruro de estaño como catalizador y consiguiendo un PLA de alto peso molecular

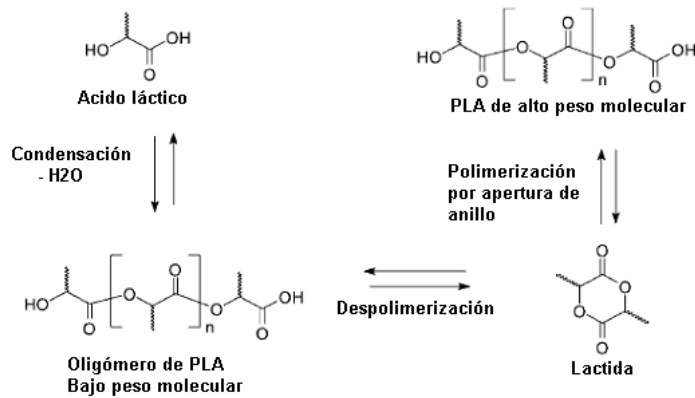


Figura 37. Formación de PLA alto peso molecular

Gracias a las propiedades mecánicas semejantes al poliestireno, el PLA podría sustituir a los polímeros convencionales pese a la baja deformación y precio elevado, su uso queda aún limitado, es por ello por lo que se combina con aditivos para mejorar el rendimiento. Se le añaden polisacáridos como almidón (reduciendo el precio y aumentando el tiempo de descomposición) y celulosa (aumenta la rigidez y resistencia a la temperatura); también se pueden combinar con rellenos inorgánicos como el vidrio, aunque no se consigue resistencia a altas temperaturas. [19, 20]



Figura 38. Bolsa de plástico biodegradable realizada con PLA.

Policarbonato (PC)

El policarbonato es un termoplástico perteneciente al grupo de poliésteres con alta resistencia al impacto, al calor, muy duradero, fácil de trabajar, transparencia óptica y una temperatura de procesamiento de 270-300 °C. Se puede reciclar, pero no es biodegradable.

El policarbonato, proviene de la reacción del *bisfenol A* (BPA) con *fosgeno* (COCl_2) [21, 22]

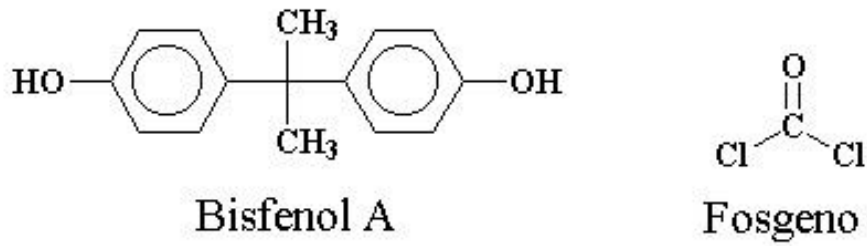


Figura 39. Componentes que forman el policarbonato

Estos dos compuestos se sintetizan de la siguiente forma:

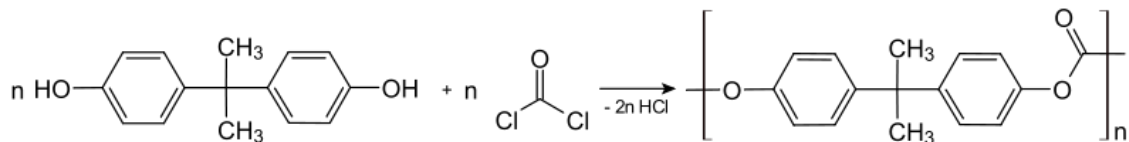


Figura 40. Síntesis del Policarbonato, donde el Bisfenol se junta con el fosgeno para dar policarbonato.

La comercialización del PC como filamento en FDM es escasa y las bobinas son muy caras en torno 70 euros el kilogramo.



Figura 41. Ejemplo de objeto realizado con PC

Poliestireno de alto impacto (HIPS)

Se trata de un polímero termoplástico de adición conformado obtenido mediante la adición de polibutadieno y acrilonitrilo, causantes de mejorar la resistencia al impacto y darle un color opaco.

Se caracteriza principalmente por una gran resistencia al impacto, buena procesabilidad mediante métodos de conformado (moldeo por inyección y extrusión) y su completo reciclaje mediante métodos mecánicos o químicos. Se disuelve con D-limoneno, por lo que se puede utilizar como elemento de soporte junto con el ABS.

Su temperatura de extrusión es cerca de los 235 °C mientras que la temperatura de la base calefactora de ser unos 115 °C.

Es muy utilizado como elemento de soporte junto con el ABS en impresoras de doble extrusor debido a la insolubilidad del ABS en limoneno. Además, en la industria de la automoción, componentes informáticos y actualmente en la industria de la impresión 3D. [23]



Figura 42. El rodamiento es uno de los ejemplos más típicos del uso de HIPS

Tereftalato de polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno o PET pertenece al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres, que se caracteriza por crear piezas resistentes, fáciles de extruir y elevada resistencia a la corrosión.

Para la obtención del PET es necesario obtener dimetilbenceno conocido comúnmente como xileno. Éste se puede encontrar en los gases de coque, en los gases de la destilación de la madera y en algunos petróleos.

Otro de los materiales necesarios para la síntesis del PET es el etileno, obtenido de la refinación del petróleo crudo. El etileno con oxígeno en presencia de plata utilizada como catalizador produce óxido de etileno, a su vez, reacciona con el agua en presencia de un ácido produciendo el etilenglicol; monómero necesario para la obtención del PET [21]

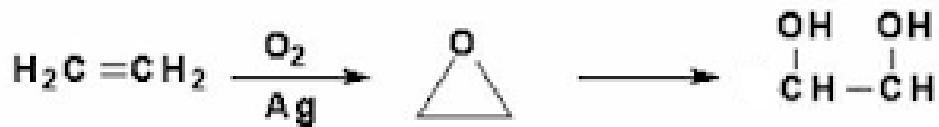


Figura 43. Polimerización del etilglicol

El xileno es oxidado para producir el ácido tereftálico, posteriormente esterificado (proceso por el cual se sintetiza un éster) a tereftalato de dimetilo (DMT).

Finalmente, haciendo reaccionar por esterificación el ácido tereftálico o dimetiltereftalato con glicol etilénico se obtiene el monómero bis-(2-hidroxietyl) tereftalato y mediante una policondensación, se polimeriza en PET.

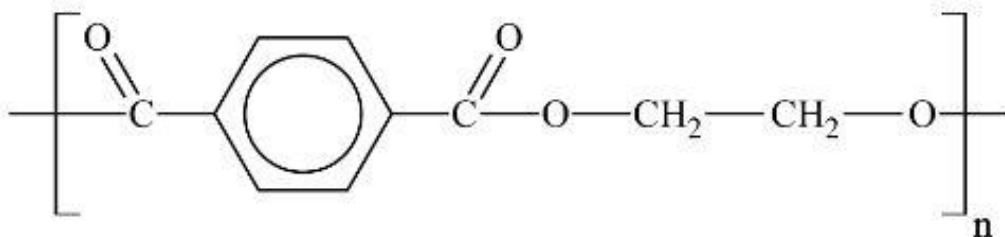


Figura 44. Estructura química del PET



Figura 45. Los envases de agua son ejemplos de PET

Acetato de Polivinilo (PVA)

El acetato de polivinilo es un polímero soluble en agua y con buena estabilidad térmica. Se emplea en la creación de estructuras de soporte para PLA y ABS en impresoras con doble extrusor. En la industria se utiliza, por ejemplo, para la fabricación de pastillas de lavavajillas.

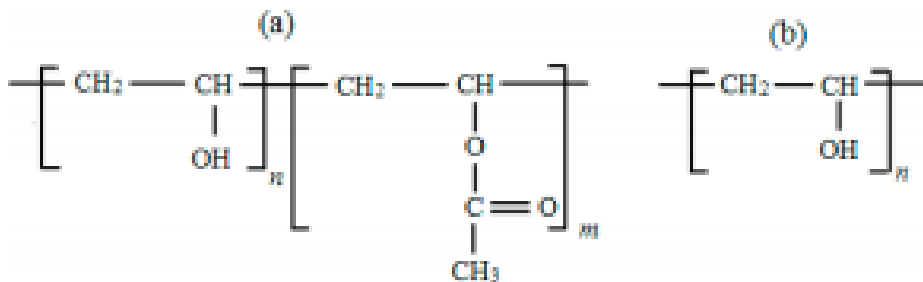


Figura 46. Estructura química del PVA: (a) Parcialmente hidrolizada, (b) Totalmente hidrolizada

El PVA se obtiene a partir de acetileno o etileno mediante la reacción con ácido acético en presencia de un catalizador como el acetato de zinc que me polimeriza en metanol. El polímero obtenido se somete a metanólisis con hidróxido de sodio, donde el PVA precipita de solución con el metanol. [21]



Figura 47. Pastilla del lavavajillas como ejemplo PVA

Nylon

Se trata de un polímero sintético perteneciente al grupo de las poliamidas patentado por los Laboratorios DuPont en 1938 y comercializada como una fibra con alta resistencia a la tracción y fácil de teñir.

Actualmente, se utiliza para la producción de tejidos cuerdas y gracias a sus buenas propiedades mecánicas, cada vez más en la impresión 3D. Existen diferentes variedades de Nylon en función de la estructura del polímero [24]

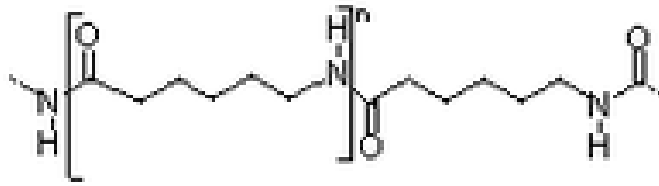


Figura 48. Estructura de Nylon 6

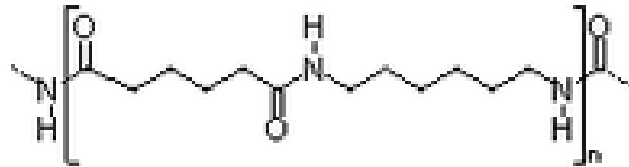


Figura 49. Estructura de Nylon 6,6

Haciendo referencia a la impresión 3D, el Nylon deja un acabado suave y sedoso, la adherencia de la capa es excelente produciendo una impresión sin fallos, además de una gran reproducción de pequeños detalles. Cuando se trata de piezas gruesas, produce una pieza con alta resistencia a impactos, sin embargo, al imprimirse piezas delgadas se vuelven flexibles evitando que se quiebren. Otra de las características a destacar es el bajo coeficiente de fricción ideal para generar piezas móviles tales como: ejes, engranajes...

Laybrick

Se trata de un filamento fabricado a partir de componentes de yeso y plástico parecido a la arenisca. Se utiliza para realizar impresiones con texturas de piedra con distintos acabados superficiales en la impresión de maquetas. Es un material que endurece con el tiempo, consiguiendo durezas muy elevadas.

Se recomienda imprimir a temperaturas mayores de 180 °C, no es necesario tener una base calefactada con laca es suficiente para realizar la adhesión. [21]



Figura 50. Ejemplo de impresión con Laybrick

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los principales materiales de impresión 3D

Filamento	Temperatura de impresión	Temperatura de base	Ventajas	Desventajas
ABS	185-235	90-110	Resistente impacto, dureza, rigidez y tenacidad	Susceptible a la deformación
PLA	195-220	20-60	Biodegradable, excelente calidad superficial	Baja resistencia al impacto
HIPS	220-235	115	Resistencia mecánica y térmica, reciclable y estabilidad térmica	Susceptible a la deformación
PET	210-220	20-65	Resistencia mecánica, desgaste y corrosión	No es biodegradable, Levemente tóxico
PC	280-305	85-95	Resistencia al impacto, rigidez y a la deformación térmica	Baja resistencia a productos químicos y sensible a la hidrólisis
Nylon	225-240	-	Resistencia mecánica, desgaste y a productos químicos	Baja resistencia a la humedad

Laywood

Se trata de un Filamento formado por la mezcla de: polímero aportando flexibilidad y fibras de madera que le dan color y aspecto de madera. La temperatura de impresión de este material está comprendida entre 180 y 220 °C mientras que la plataforma calefactada entre 40 y 50 °C. El acabado superficial al igual que en Laybrick dependerá de la temperatura utilizada. [21]



Figura 51. Filamento 1.75 mm Laywood



Figura 52. Rollo de papel higiénico es uno de los ejemplo de uso para Laywood

Bendlay

Filamento fabricado a partir del butadieno con propiedades similares ABS. Posee una gran resistencia, dureza y flexibilidad. La temperatura de impresión está comprendida entre 215-240 °C. Cuanto mayor es la temperatura, mejor será la adhesión de las capas.

El filamento tiene un aspecto transparente y brillante, semejante al PLA. Las bobinas se distribuyen en 1.75 y 3 mm. [21]



Figura 53. Ejemplo de objeto realizado con Bendlay con aspecto brillante

Objetivos

- Establecer criterios de trabajo para la impresión de piezas de alta precisión mediante la tecnología FDM.
- Evaluación del impacto de los diferentes criterios establecidos en la calidad y propiedades de las piezas obtenidas.

Metodología

Descripción de los programas

Para anotar los resultados se ha utilizado un software encargado de almacenar los datos de cada experimento. El software utilizado ha sido *testXpertII*.

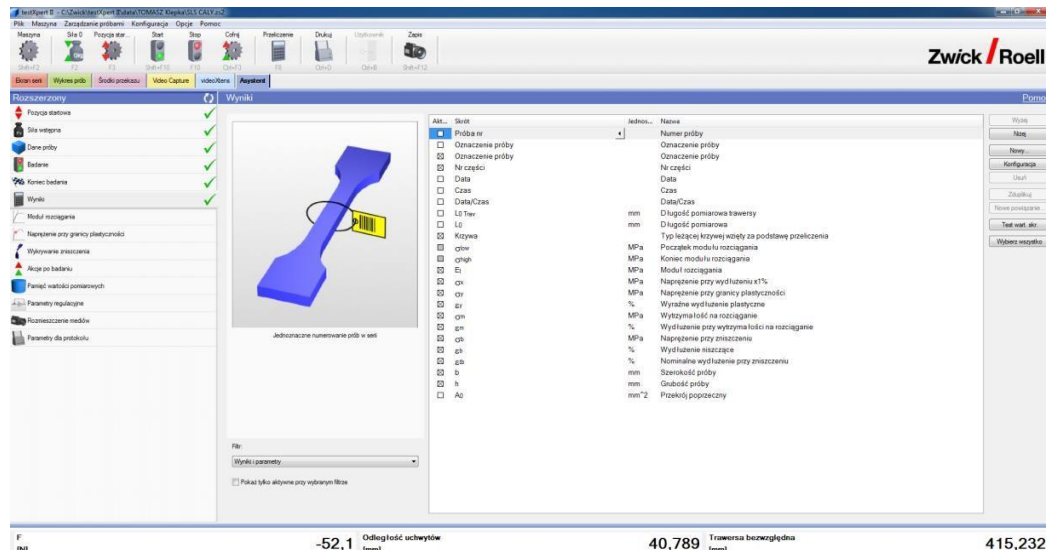


Figura 54. Interfaz del software TestXpert II

El software está basado en la plataforma más actual de Microsoft Windows y ha sido desarrollado con las tecnologías de programación más modernas. Se trata de un software de ensayos compatible para todas las máquinas y equipos de ensayo.

Para nuestro estudio hemos escogido la función que nos presenta los resultados en forma de tabla y gráfica: Fuerza (N) dependiendo del Alargamiento (l).

Descripción de los equipos experimentales

Equipo ZPrinter 450

ZPrinter 450 es la impresora 3D que permite imprimir en color a bajo costo, es posible obtener modelos de colores brillantes con un nivel de automatización que permite disminuir los tiempos de impresión. Es una máquina ideal para imprimir en una amplia variedad de aplicaciones, desde diseño de prototipos y modelos arquitectónicos hasta aplicaciones médicas y artísticas.

El equipo cuenta con dos cabezales de impresión, con capacidad de crear prototipos a una velocidad de dos a cuatro capas por minuto. Se consiguen piezas de hasta $20 \times 25 \times 20 \text{ cm}$

Actualmente, este tipo de máquinas sigue la normativa ISO 3167:2014 referente a los plásticos, probetas de usos múltiples y especifica los requisitos para materiales plásticos moldeables empleados en el proceso de moldeo por inyección o compresión.



Figura 55. Impresora 3DP ZPrinter 450 perteneciente a Politécnica Lubelska.

A continuación, se muestra una tabla con las propiedades mecánicas del polvo compuesto utilizado para realizar la impresión 3DP [26]:

Tabla 2. Propiedades mecánicas Z-Bond

Mechanical Properties				
Properties	ASTM Procedure	Water Cure	Z-Bond 90	Z-Max 90
Tensile Strength, MPa	D-636	-	14.2	26.4
Elongation at Break, %	D-636	-	0.23	0.21
Modulus of Elasticity, MPa	D-636	-	9,450	12,560
Flexural Strength, MPa	D-790	13.1	31.1	44.1
Flexural Modulus, MPa	D-790	6,355	7,163	10,680

Equipo Omni 3D

Se trata de la impresora industrial FDM de mayor tamaño que permite imprimir piezas hasta $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}$ y una precisión de 0.2 mm. Cuenta con doble extrusor, paneles superiores de apertura para facilitar el acceso, auto calibrado, cama calefactada, pantalla LCD que le da un aspecto ergonómico.

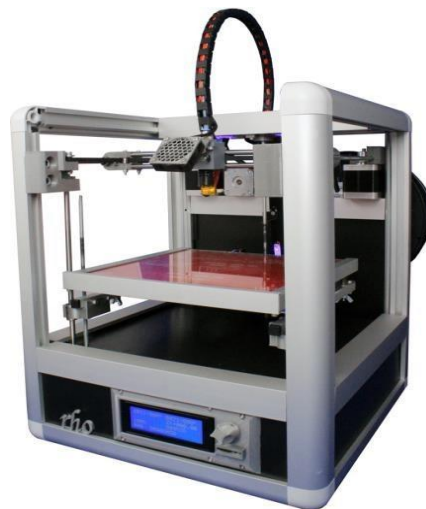


Figura 56. Impresora Omni 3D para impresión FDM

Se pueden utilizar multitud de materiales, en nuestro caso utilizaremos PLA como material de impresión.

<u>Propiedades mecánicas (*)</u>	<u>Moldeo por inyección</u>		<u>Impresión 3D</u>	
	Valor típico	Método de ensayo	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	-	-	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	-	-	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	-	-	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	-	-	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	-	-	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	-	-	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	-	-	3150,0 MPa	ISO 178

Figura 57. Propiedades mecánicas del filamento PLA

Equipo Zbuilder Ultra

La impresora ZBuilder Ultra es una máquina de impresión rápida de Zcorp que utiliza plásticos con características similares al ABS. Gracias a su tecnología DLP, endurece el fotopolímero, consiguiendo modelos con el doble de velocidad que el resto de las impresoras del mercado. Este equipo sigue normativa ISO 3167:2014 referente a los plásticos al igual que todas las impresoras 3D. Se consiguen piezas con un tamaño de impresión de hasta 26 x 16 x 19 cm y una precisión de +/- 0,2 mm



Figura 58. Impresora 3DP Zbuilder Ultra para impresión DLP

Como material de impresión se ha utilizado una resina acrílica designada S1500 por el fabricante (ver figura 59).

Resina S1500		
Viscosidad	230	Cps
Dureza	77	Escala D
Resistencia a la tracción	43	Mpa
Módulo de tracción	2060	Mpa
Elongación a la rotura	4	%
Densidad	1.19	g/cm ³
Temperatura de desviación del calor	60	°C

Figura 59. Propiedades mecánicas de la resina S1500

Una vez realizada la impresión de las muestras mediante los distintos equipos de impresión, pasaremos a realizar el ensayo de tracción para cada una de las muestras para ello hemos utilizado el siguiente equipo:

Equipo Zwick Z010

El equipo Zwick Z10 está acreditado por el laboratorio alemán de acreditación *DAkks*, según la norma ISO/IEC 17025. Además, sigue la norma ISO 9001 perteneciente al sistema de gestión de calidad y medioambiente, garantizando las exigencias en los ámbitos de calidad, protección medioambiental y seguridad laboral.

El equipo cuenta con un manejo ergonómico que se ajustan perfectamente a las necesidades del usuario, preparado para realizar tanto ensayos a tracción como a compresión. El ensayo puede realizarse mediante control remoto sin necesidad de ordenador. Los datos que se obtienen en el ensayo se van mostrando por la pantalla, asimismo cuenta con un interruptor basculante con rueda giratoria integrada que permite a la máquina posicionarse de forma rápida y precisa.



Figura 60. Máquina de ensayo a tracción Zwick Z10

Resultados

En primer lugar, se realizará el diseño de las piezas siguiendo una serie de factores:

- Fijos: Tamaño de la pieza y selección de muestras.
- Variables: Tecnología y dirección de crecimiento de la capa, radio de curvatura y grado de relleno.

El diseño de la pieza se realizó utilizando un programa CAD: SolidWorks, siguiendo las especificaciones que aparecen en la Figura 61.

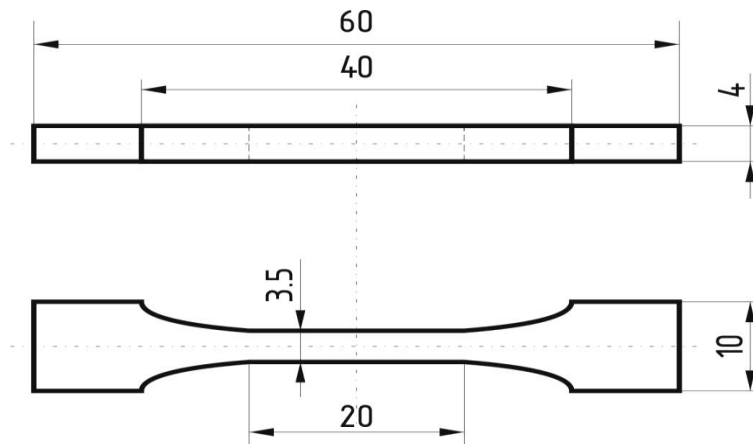


Figura 61. Plano de la probeta realizada en programa CAD.

Además, se realizó una selección de muestras, descartando aquellas que no cumplieran las especificaciones mostradas en la figura 61.



Figura 62. Control de especificaciones de las muestras.

En primer lugar, se realiza el diseño de las piezas para la investigación del efecto de la dirección de crecimiento de la capa y la tecnología utilizada. Se realizaron los tres tipos de muestras que se esquematizan en la figura 63. Como se puede observar en esta figura, tenemos crecimiento de tipo horizontal-transversal (*SUP*, por sus siglas en inglés), Vertical (*Z*) y Horizontal-longitudinal (*N*). En la figura 64 se presentan las probetas una vez impresas.

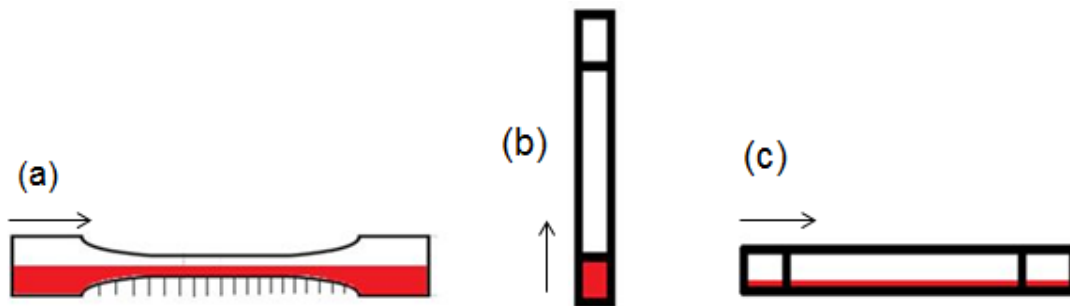


Figura 63. Tipos de impresión en función de la dirección de crecimiento de la capa: a) Horizontal- transversal (*SUP*). b) Vertical (*Z*) c) Horizontal- longitudinal (*N*)

Una vez realizado el diseño de las piezas y descrito los factores fijos, comenzaremos realizando el estudio de la tecnología de impresión utilizada con sus respectivos materiales (ver tabla 3) frente la dirección de crecimiento de la capa.

Tabla 3. Materiales utilizados según tecnología de impresión

TECNOLOGÍA	MATERIAL
FDM	PLA
3DP	Polvo compuesto
DLP	Resina acrílica

Como sabemos la impresión 3D es una tecnología basada en la superposición de capas, por lo tanto, las direcciones de crecimiento de las capas pueden presentar una gran influencia en las propiedades mecánicas del producto final. Según el artículo: *Fracture Surface Analysis of 3D- Printed Tensile Specimens* “La resistencia mecánica en piezas fabricadas en la dirección ZXY es más que las fabricadas en XYZ ” podemos plantear la hipótesis que las piezas impresas en la dirección Z, obtendrán la menor resistencia a la tracción, debido a la disposición perpendicular de las capas de material con la

dirección de carga de rotura mientras que las piezas obtenidas en la dirección paralela a la carga de rotura obtendrán una mayor resistencia a la rotura. [25]

Una vez realizada la obtención y preparación de las muestras (ver Figura 64), determinaremos en el siguiente apartado la resistencia para las diferentes direcciones de crecimiento de las capas mediante una prueba de tracción para cada una de las tecnologías con sus respectivos materiales comprobaremos la hipótesis planteada.

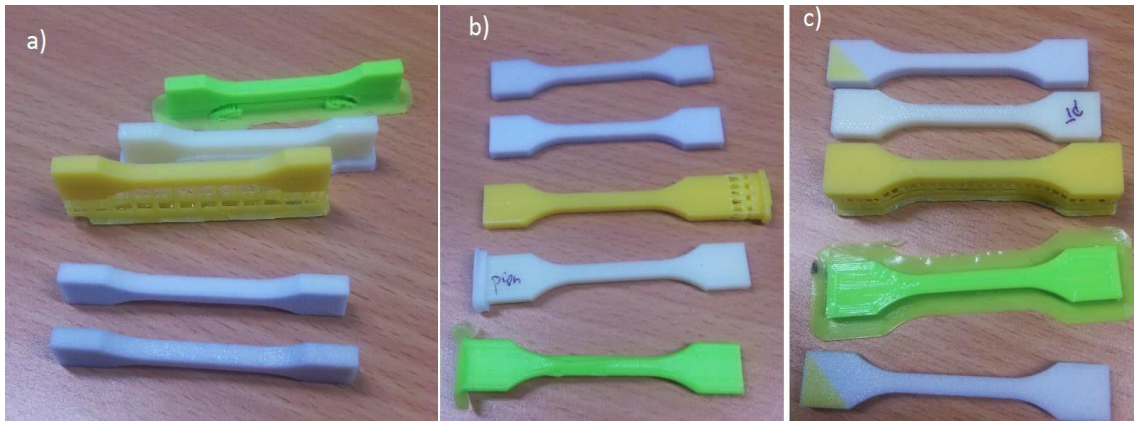


Figura 64. Muestras impresas según crecimiento de las capas a) Horizontal transversal (SUP) b) Impresión vertical (Z) c) Horizontal longitudinal (N)

En vista del estudio de la dirección de crecimiento y la tecnología de impresión, utilizaremos los resultados como base a la investigación del grado de relleno y radio de curvatura.

En primer lugar, hemos realizado dos tipos de piezas variando el factor de radio de curvatura, según la figura 65.



Figura 65. Diseño de las piezas R04 y R08 para el estudio del radio de curvatura y grado de relleno

Además, para cada uno de estos radios de curvatura, se han realizado cinco muestras variando el grado de curvatura. Hemos comenzado por 20% (valor por defecto de la impresora), 40%, 60%, 80% y 100%.

Para el estudio de estos factores, se han utilizado las siguientes características basadas en los resultados del estudio anterior:

Parámetro	Característica
Dirección de crecimiento	Horizontal-longitudinal (N)
Material	PLA
Tecnología de impresión	FDM
Grados de relleno	20, 40, 60, 80 y 100%
Radios de curvatura	0.4, 0.8

Una vez asignados los diseños y especificaciones de cada uno de los estudios que vamos a realizar, someteremos cada de una de las muestras a un ensayo de tracción mediante el equipo Zwick Z010 y obtendremos los resultados mediante el software testXpert II.

Obtención y caracterización de las probetas de tracción

Para realizar la obtención de las muestras, seguimos las instrucciones correspondientes para realizar una impresión 3D. Primeramente, realizamos el diseño de las piezas en un programa CAD (ver Figura 66) para cada uno de los criterios a estudiar.

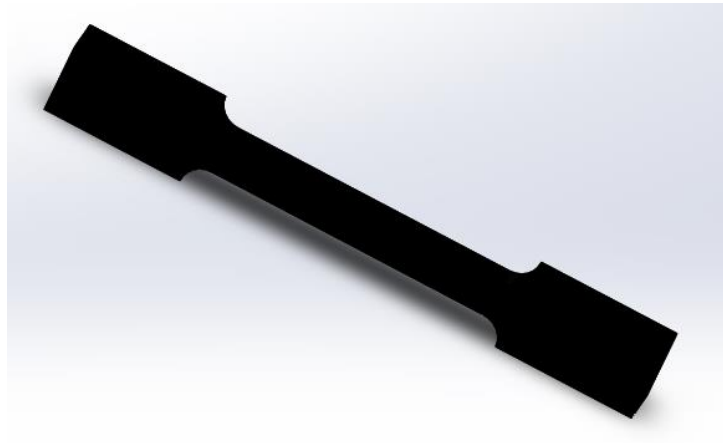


Figura 66. Diseño de muestra en programa CAD

A continuación, realizamos la conversión de cada uno de los diseños a formato STL (ver Figura 67) con una malla de resolución media.

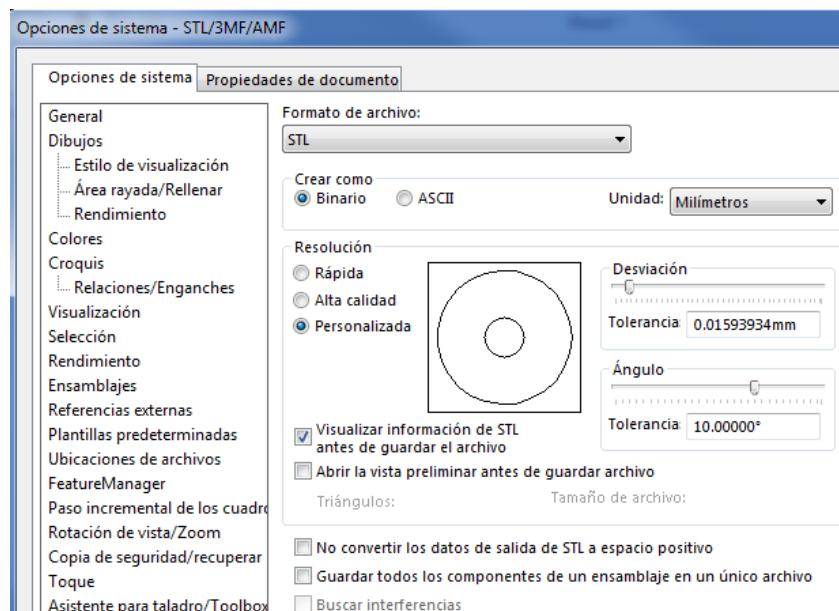


Figura 67. Caracterización de la muestra en formato STL

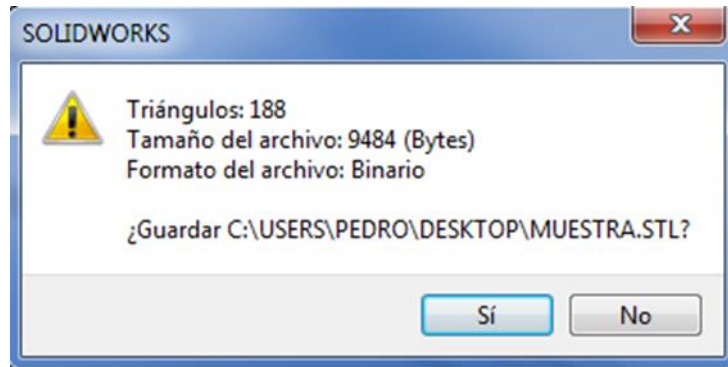


Figura 68. Conversión de muestra a formato STL

Una vez en este punto, generamos el formato G.Code con la ayuda de la plataforma gratuita Slic3r (ver Figura 69 y 70) realizará las instrucciones necesarias para que nuestra impresora imprima nuestras muestras.

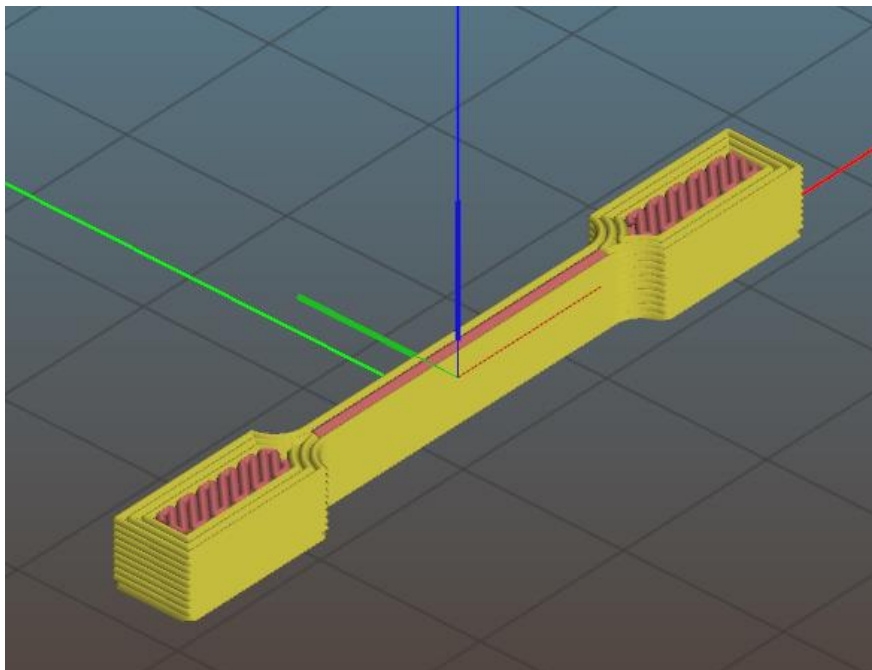


Figura 69. Generación de las distintas capas de la muestra

```
N19 X26.2712 Y66.2109
N20 X26.5378 Y66.9863
N21 X26.9661 Y67.8032
N22 X27.5197 Y68.3751
N23 X28.1237 Y68.7967
N24 X28.7783 Y69.0682
N25 X29.4717 Y69.1984
N26 X30.2183 Y69.1579
N27 X31.0153 Y68.9672
```

Figura 70. Código G.Code con las instrucciones necesarias para que nuestro equipo realice la impresión 3D

Una vez realizada la impresión , realizaremos la caracterización y el ensayo a tracción (ver Figura 71) para cada una de las muestras.

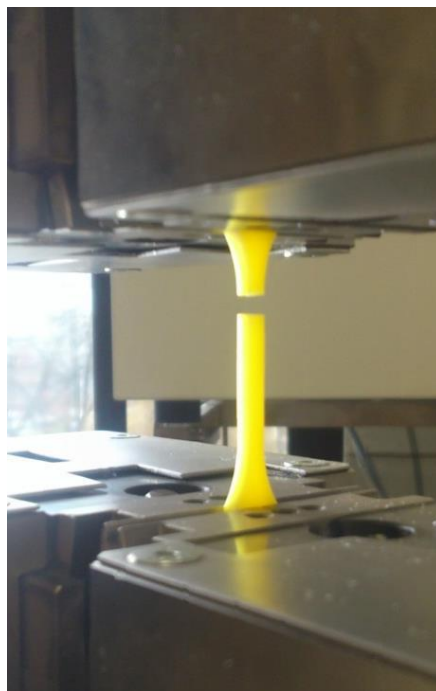


Figura 71. Ensayo a tracción de una muestra en el equipo Zwick Z010

En primer lugar, se prepararon las probetas realizadas por impresión 3DP y polvo compuesto pegado con cianoacrilato. Fueron unas muestras que presentaron una apariencia homogénea, con difícil distinción a simple vista de la dirección de crecimiento utilizada.

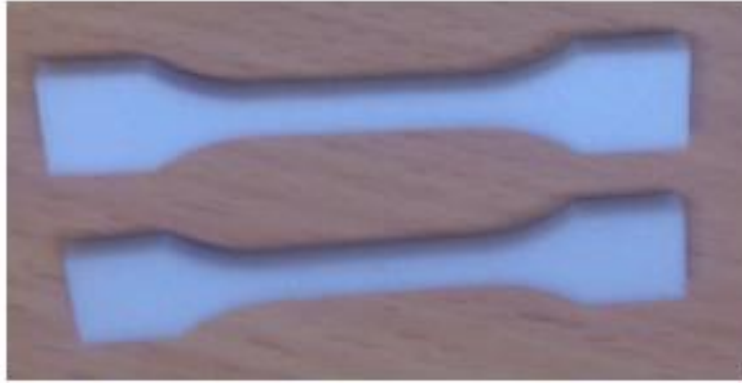


Figura 72 .Muestra realizada mediante 3DP

Realizamos tres muestras para cada dirección de crecimiento de la capa, los resultados muestran (ver tabla 4) la resistencia mecánica a tracción en MPa y el alargamiento de cada de una de las muestras en *mm*.

Tabla 1..Resultados de las muestras realizadas por 3DP

Crecimiento de la capa	Nº Probeta	σ_m	ϵ_m
Z-3DP	1	0,99	0,048
Z-3DP	2	1,07	0,052
Z-3DP	3	1,66	0,092
SUP-3DP	1	8,66	0,17
SUP-3DP	2	8,48	0,17
SUP-3DP	3	8,7	0,2
N-3DP	1	9,9	0,16
N-3DP	2	8,72	0,16
N-3DP	3	7,64	0,18

Con los resultados obtenidos, hemos realizamos una gráfica de la resistencia a tracción frente la dirección de crecimiento de la capa.

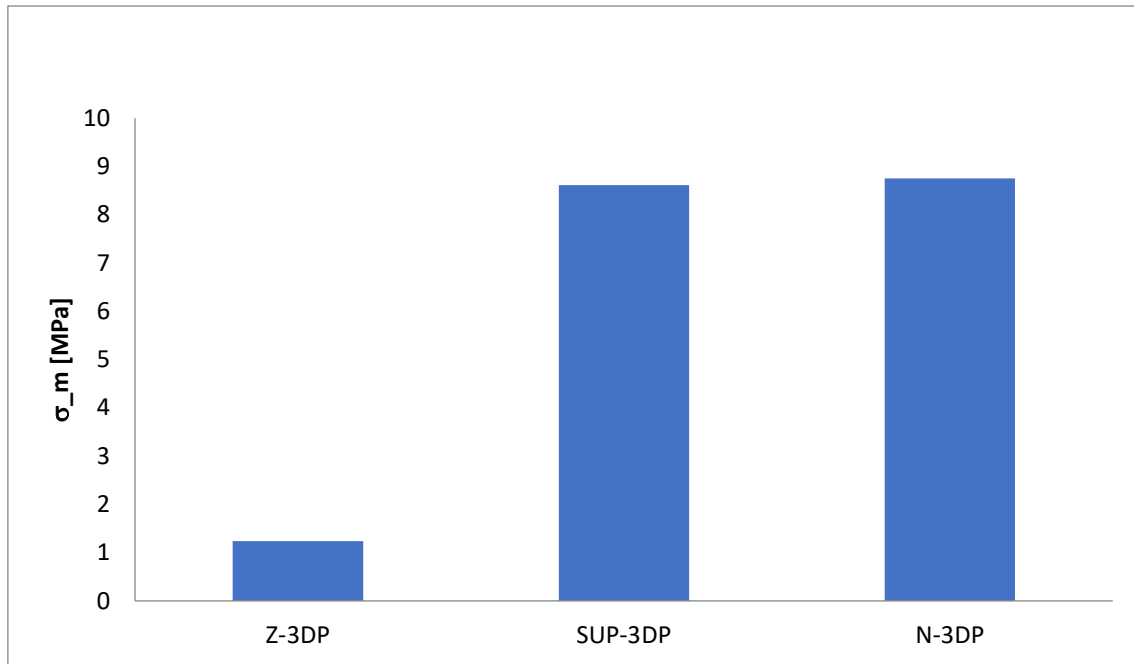


Figura 73. Gráfica de resistencia media para tecnología 3DP

Con los resultados que se representan en la figura 73, se confirma nuestra hipótesis inicial y se verifica que la mayor resistencia mecánica se obtiene en las direcciones de crecimiento horizontales, mientras que la menor resistencia de forma contundente es en la dirección vertical.

Por lo tanto, se puede afirmar que el método 3DP, es un método de impresión inadecuado si queremos realizar una impresión vertical. Por otro lado, si elegimos la dirección horizontal de crecimiento de la capa, encontramos prácticamente la misma resistencia.

En segundo lugar, hemos realizado la impresión FDM con PLA, fueron unas muestras que se caracterizaron por no obtener una superficie homogénea.



Figura 74. Muestra realizada mediante la impresión FDM

La operación de acabado en la dirección de crecimiento horizontal consistió en limpiar el material de exceso, eliminar los soportes mientras que, para la impresión vertical, aplicamos refrigeración por aire en el cabezal de impresión.

Tabla 2. Resultados de las muestras realizadas por FDM

Crecimiento de la capa	Nº Probeta	σ_m	ϵ_m
N-FDM	1	56,9	2,7
N-FDM	2	49,9	2,4
Z-FDM	1	37,8	2
Z-FDM	2	37,8	2,2
SUP-FDM	1	44,1	2,7
SUP-FDM	2	51	2,5

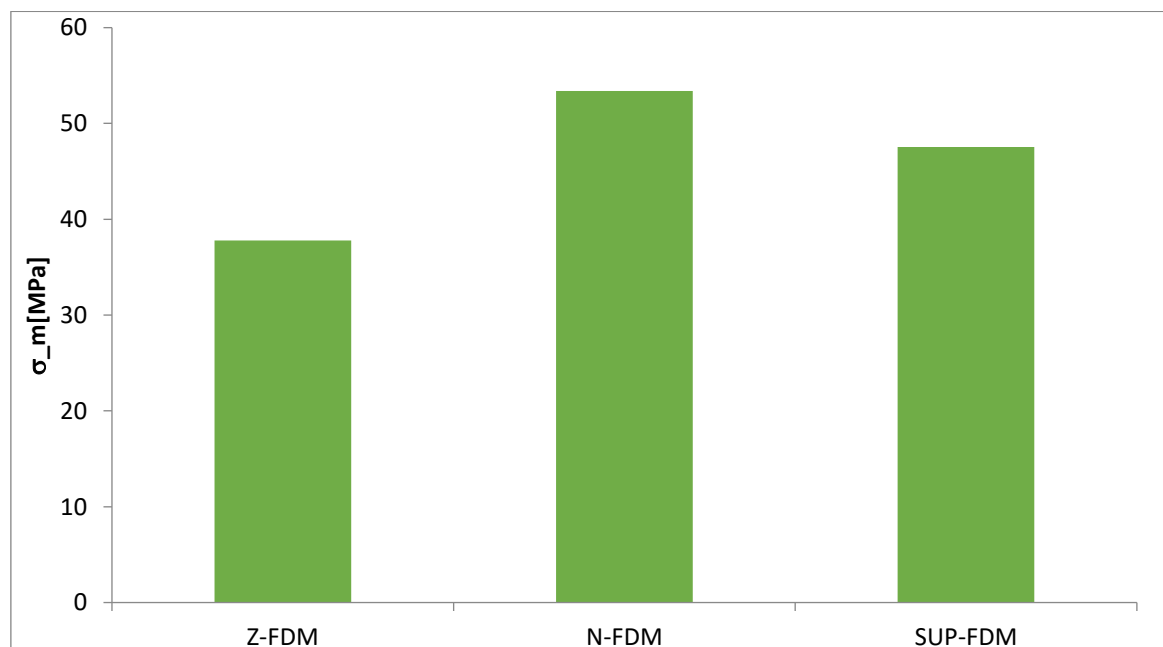


Figura 75 Gráfica de resistencia media para tecnología FDM

Se vuelve a verificar la hipótesis y la dirección de crecimiento horizontal longitudinal es la que ofrece una mayor resistencia a la tracción mientras que la dirección perpendicular a la dirección de crecimiento presenta la menor resistencia. Además, cabe destacar el incremento significativo de resistencia frente a la tecnología DLP.

Finalmente, se realizaron los ensayos sobre las muestras realizadas con resina acrílica mediante DLP. Para la impresión horizontal transversal fue necesario utilizar columnas que soportasen la parte central de la impresión. Estas columnas o soportes se imprimen con el mismo material que las piezas y posteriormente deben ser quitadas.



Figura 76. Limpieza de los soportes de la impresión Horizontal-transversal

Las operaciones de acabado final se realizaron con un cúter para suprimir los soportes y posteriormente no se aplicó ningún barniz, lijado o proceso de acabado.

Tabla 3. Resultados de las muestras realizadas por DLP

Crecimiento de la capa	Nº Probeta	σ_m	ϵ_m
Z-DLP	1	26,9	14
Z-DLP	2	23,4	7,4
Z-DLP	3	22,1	8,4
N-DLP	1	25,9	8,4
N-DLP	2	25,2	9,3
N-DLP	3	27,9	9,7
SUP-DLP	1	27,2	11
SUP-DLP	2	24,4	6,6
SUP-DLP	3	23,7	7,9

Una vez obtenida la tabla, se realizó una gráfica comparativa de σ_m con los crecimientos de las sucesivas capas

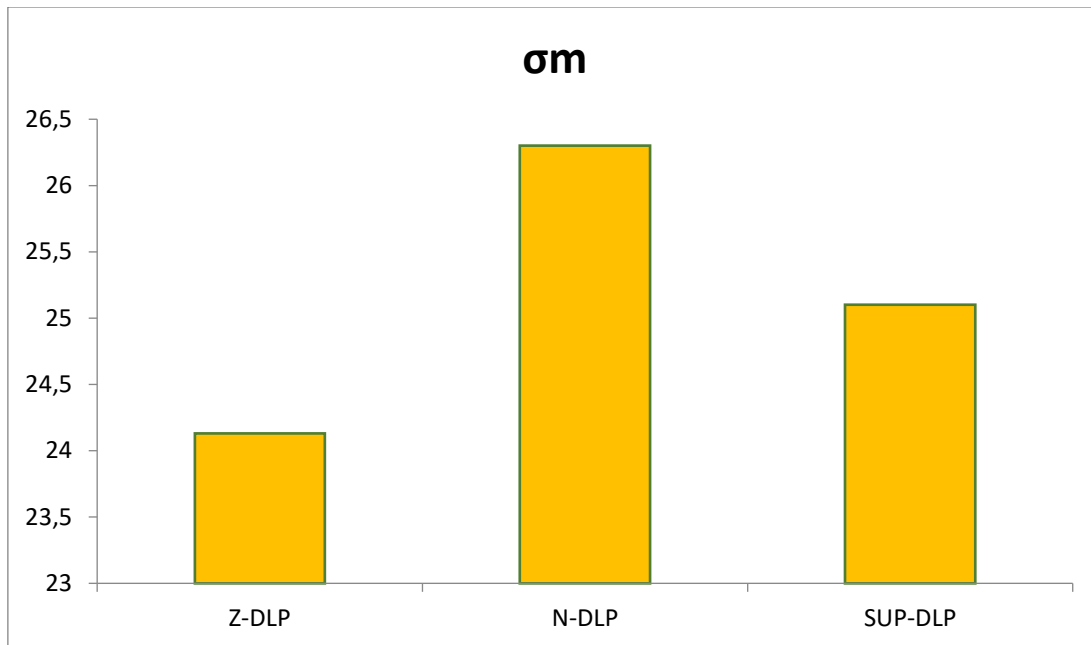


Figura 77. Gráfica de resistencia media para tecnología DLP

Comparación de tecnología utilizada y método de impresión

En primer lugar, se realizó una comparativa de las gráficas Tensión-Deformación (ver Figura 78) para cada de una de las tecnologías con el correspondiente material utilizado.

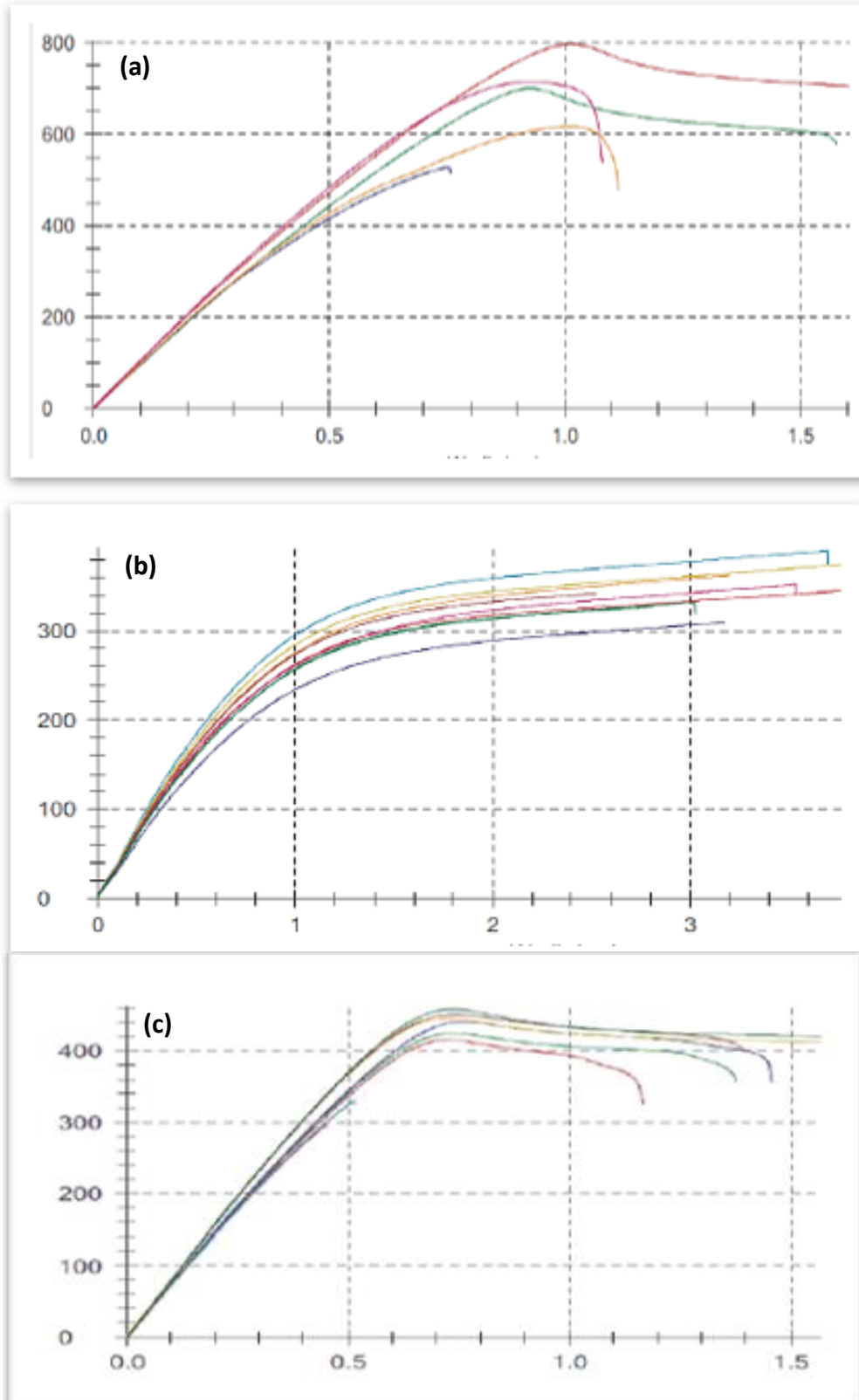


Figura 78. Gráfica tensión (N) - Deformación para diferentes tecnologías y sus respectivos materiales. (a) FDM (PLA). (b) DLP (Resina acrílica). (c) 3DP (Polvo compuesto).

Como se observa en la Figura 78, el material PLA mediante el uso de la tecnología FDM nos ofrece la mayor tensión alcanzando 800 N consiguiendo hasta un 1% de deformación, por el contrario, la resina acrílica fotopolimérica presenta la menor tensión de 360N a pesar de tener la mayor deformación hasta valores del 9% antes de su deformación.

Finalmente, se presenta en la figura 79 , a modo de resumen, los resultados obtenidos por las diferentes tecnologías con sus materiales en función de la forma de impresión y se analizan los resultados.

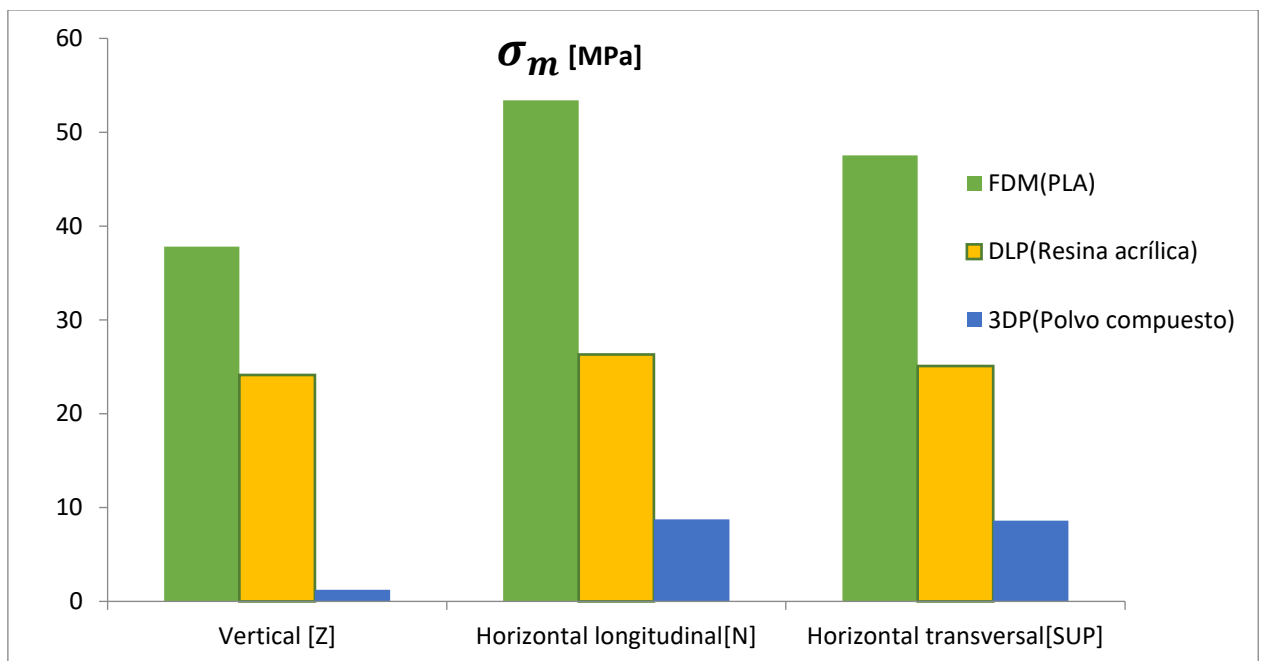


Figura 79. Gráfica general de la resistencia media ofrecida según la tecnología, material utilizado y crecimiento de las capas.

Como se puede observar en la figura 79, el material PLA utilizado en la impresión FDM con crecimiento horizontal-longitudinal presenta la mayor resistencia a la tracción, por el contrario, las muestras realizadas mediante el polvo compuesto y con la tecnología 3DP muestran la menor resistencia y el mayor efecto en cuanto a la dirección de impresión, la impresión Horizontal presenta hasta 8 veces más resistencia que la vertical.

Por otra parte, la resina acrílica presenta poco efecto ante el crecimiento de las sucesivas capas, manteniéndose estable en todas sus formas de impresión. Cabe destacar

la importancia de forma de impresión en la tecnología FDM, siendo significativa la diferencia entre la impresión vertical y la horizontal longitudinal.

Podemos decir que nuestras hipótesis planteadas eran ciertas y si queremos obtener la mayor resistencia debemos de utilizar una impresión Horizontal-longitudinal utilizando PLA e imprimiendo utilizando la tecnología FDM.

Efecto del grado de relleno y radio de curvatura

Una vez realizado el estudio de la dirección de crecimiento de la capa realizaremos el estudio del efecto del grado de relleno y radio de curvatura en la resistencia a tracción de las muestras (ver Figura 80) diseñadas en el apartado anterior.

Según el artículo *Influence of infill parameter on the mechanical resistance in 3D printing* “Se comprueba que la máxima resistencia a la tracción se puede obtener en los elementos fabricados con FDM con 100% de relleno” [26]

Por lo que, debemos esperar que a mayor grado de relleno las muestras obtendrán mejores propiedades mecánicas.



Figura 80. Muestras R04 y R08 para diferentes grados de relleno

Los resultados los hemos presentado en función del radio de curvatura y el grado de relleno, comenzando por las muestras de R04 y a continuación las de R08.

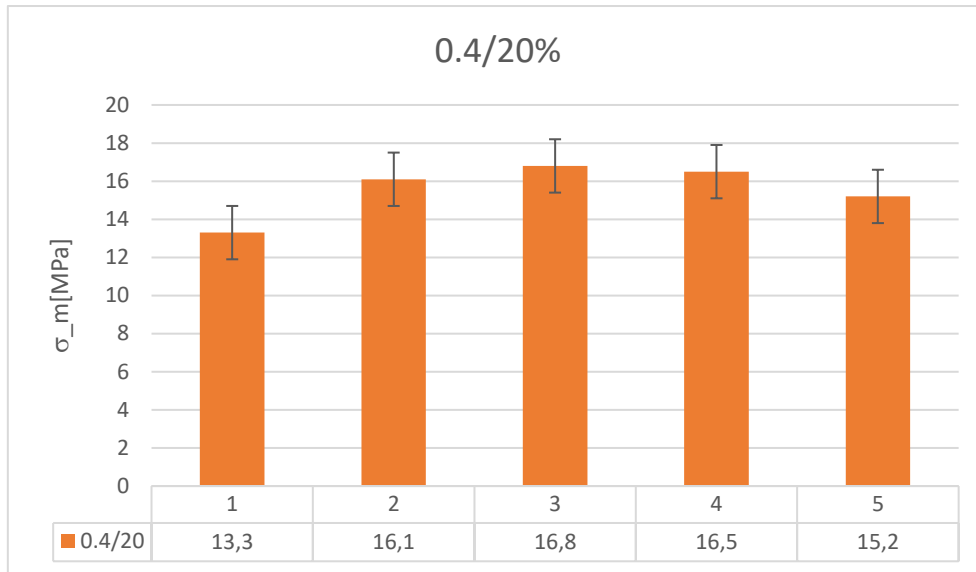


Figura 81. Gráfico de resistencia de la muestra de radio 0.4 al 20% de relleno

Para un grado bajo de relleno, se determinó la resistencia mecánica de cinco muestras y se obtuvo un valor máximo de $16,8 \pm 1,4$ MPa, tal y como se refleja en la figura 81. Este valor es algo menor a lo esperado, lo cual se puede explicar por la cantidad de orificios que estas probetas presentan entre sus capas (ver figura 83). La presencia de estos orificios o huecos implica una baja cohesión del material que provoca la fácil propagación de la rotura entre sus capas, lo que tiene como consecuencia final una disminución de las propiedades mecánicas.

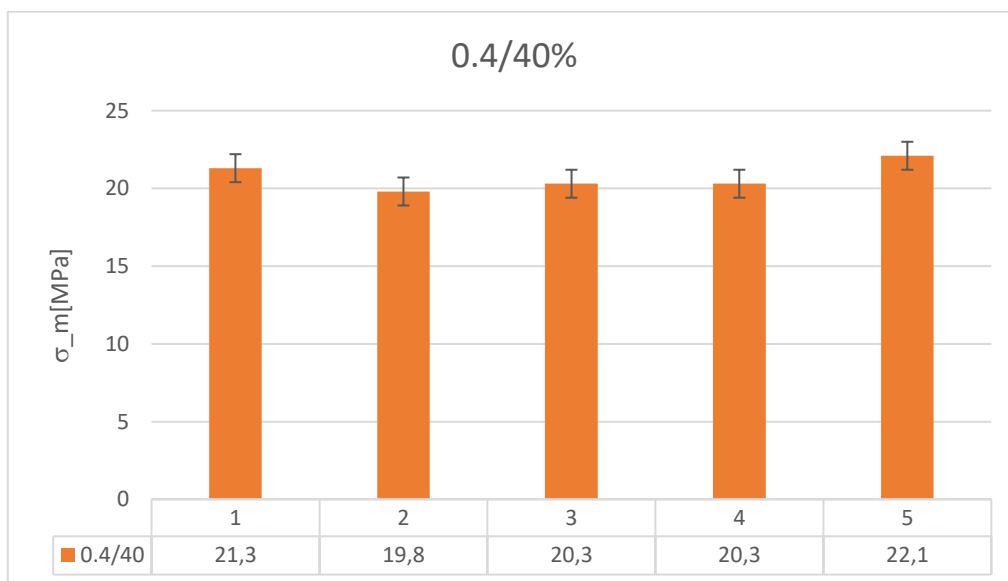


Figura 82. Gráfico de resistencia de la muestra de radio 0.4 al 40% de relleno

Para un grado de relleno del 40 %, obtenemos mejores propiedades mecánicas hasta $22,1 \pm 0,9$ MPa como consecuencia de que las muestras presentaban menos orificios entre sus capas, como se puede observar en la figura 83. En esta ocasión, existe una mayor compactación y cohesión entre cada capa, dificultando la propagación de la rotura durante el ensayo de tracción y presentando una mayor resistencia a la rotura y en general, mejores propiedades mecánicas.

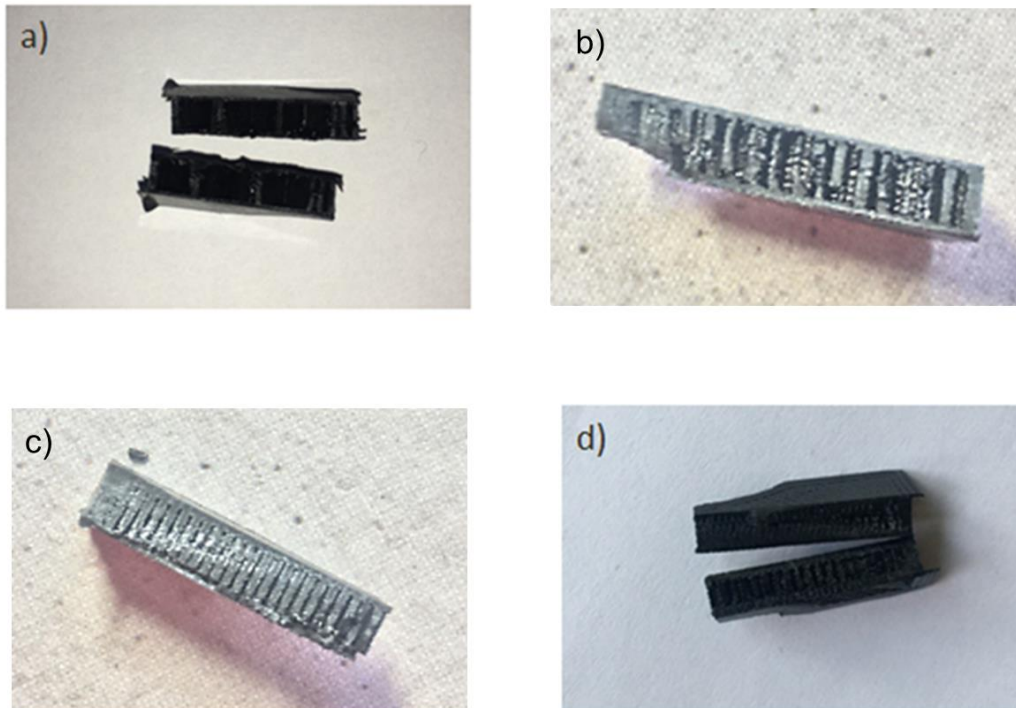


Figura 83. Muestras con diferentes grados de relleno: 20% (a). 60% (b). 80% (c). 100% (d)

De forma análoga, obtenemos muestras cada vez con menos orificios entre sus capas según aumentamos la cantidad de material de relleno, lo que desencadena en un incremento de las propiedades mecánicas, tal y como se observa en la figura 84.

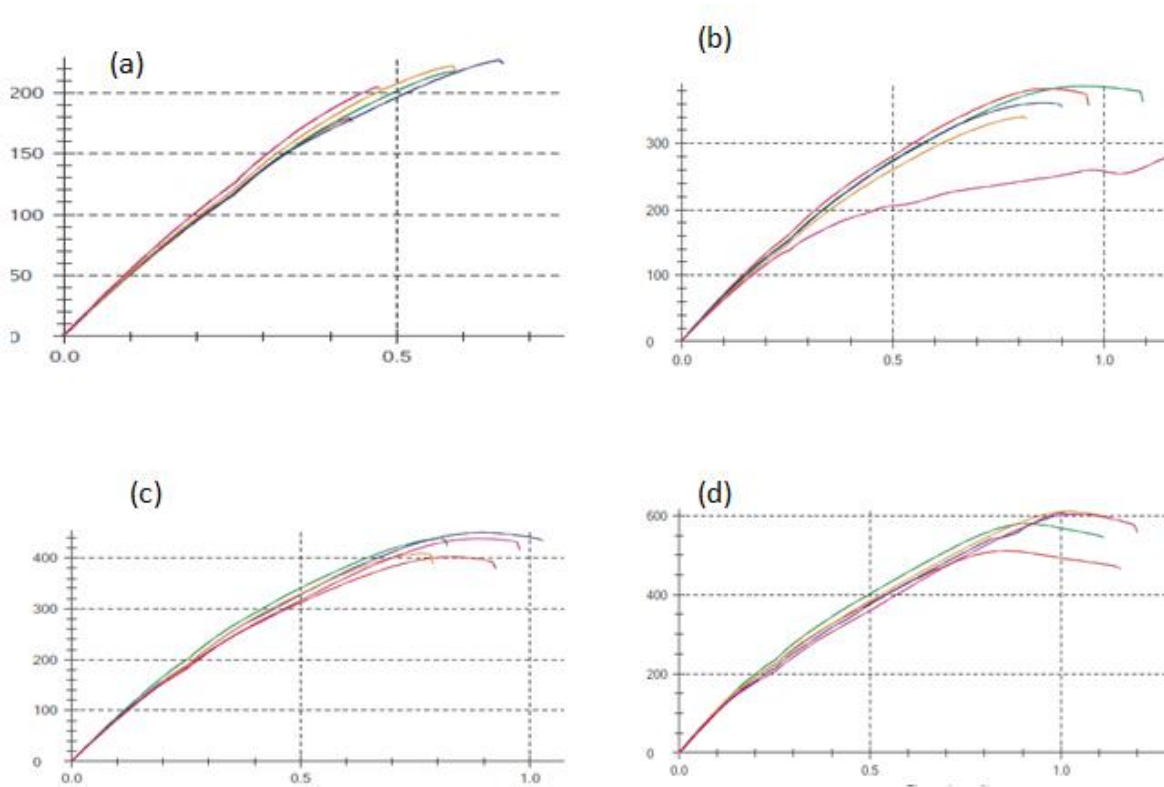


Figura 84. Gráfica de tensión (N) - deformación (%) de muestras de radio 0.4 mm para diferentes grados de relleno: 20% (a). 60% (b). 80% (c). 100% (d).

Según la figura 84, conforme vamos aumentando el grado de relleno, la muestra ofrece una mayor tensión frente al ensayo de tracción y una mayor deformación antes de su ruptura. Comenzando con una tensión de 200 N para un grado de relleno del 20% y obteniendo hasta 600 N para un grado del 100 %.

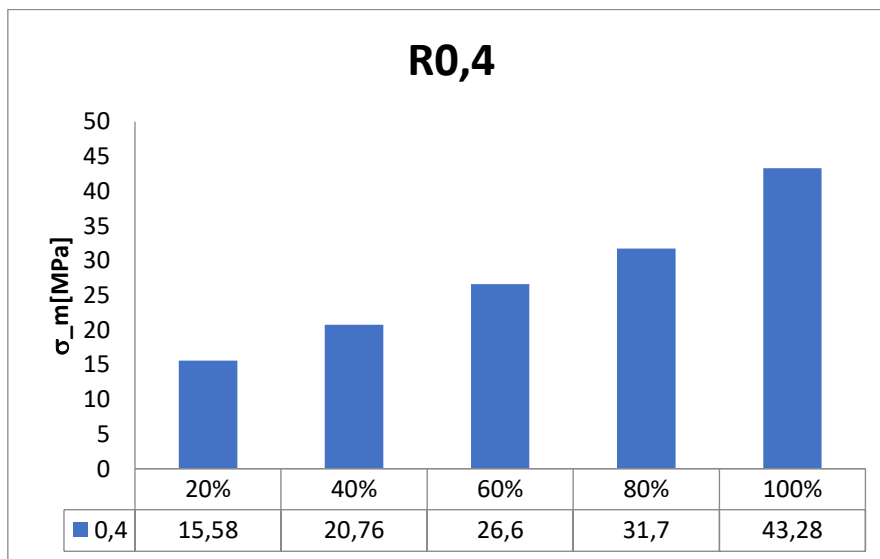


Figura 85. Gráfico de resistencia de las muestras de radio 0.4 mm para todos los niveles de compactación

Como se puede observar en la figura 85 y 86 , un incremento en el grado de relleno incrementa las propiedades mecánicas de las muestras, por lo que se puede concluir que con esta geometría el grado de relleno de la probeta es un factor de gran relevancia

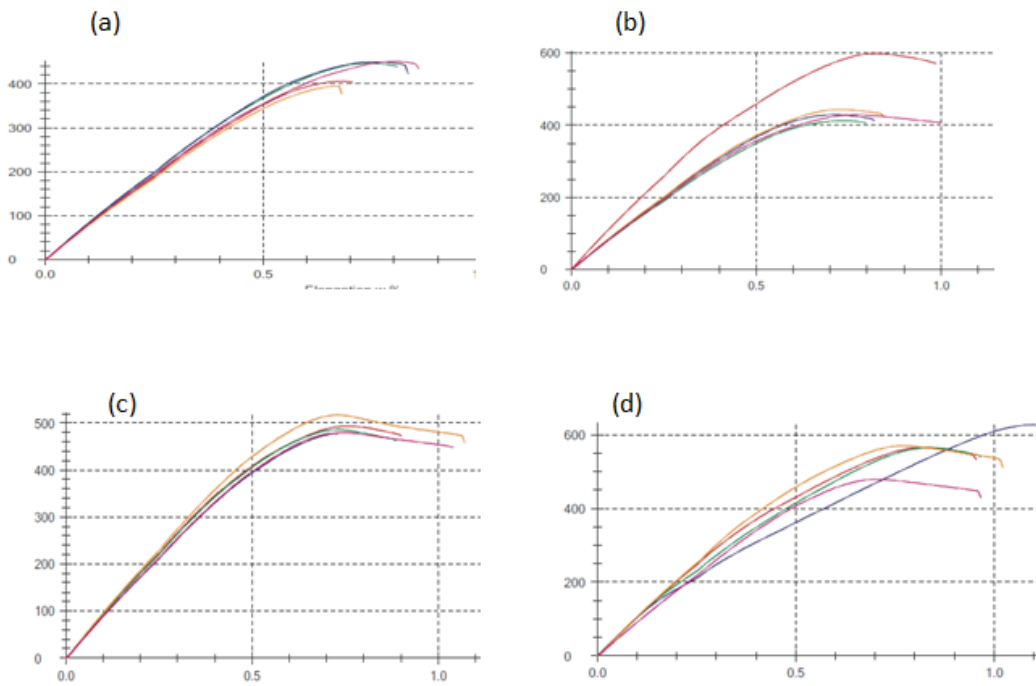


Figura 86. Gráfica de tensión-deformación de muestras de radio 0.8 mm para diferentes grados de relleno: 20% (a). 60% (b). 80% (c). 100% (d).

En cambio, para las muestras estudiadas en la figura 86, se puede contemplar que para todos los grados de relleno, la resistencia a la rotura es similar. Esta podría ser una de las razones por las que la resistencia a la tracción para muestras de radio de curvatura 0.8 mm sea similar.

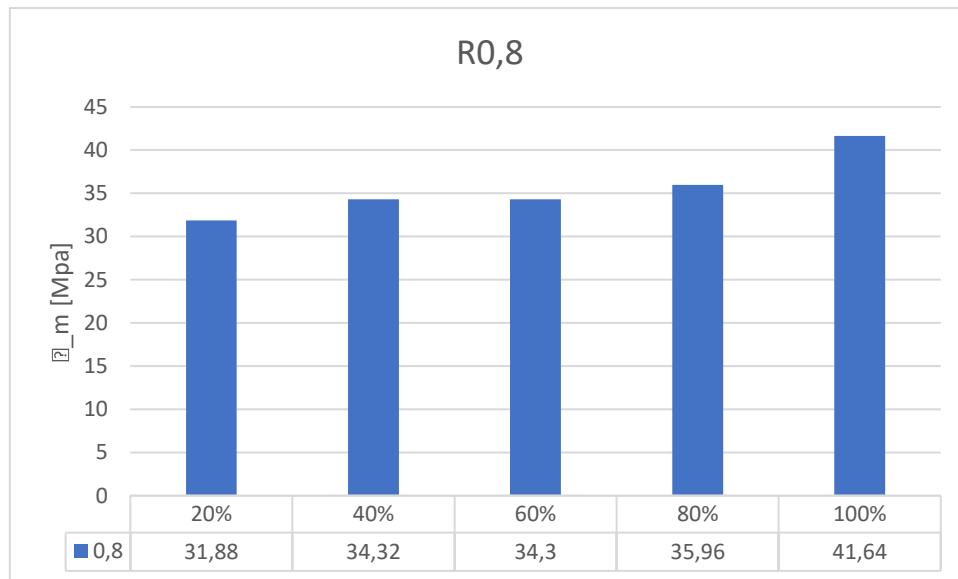


Figura 87. Gráfico de resistencia de las muestras de radio 0.8 mm para todos los niveles de compactación

En la figura 87 se representa el estudio análogo al anterior, pero en este caso el radio de curvatura es de 0.8 mm. Lo primero que podemos observar es que obtenemos valores muy similares de propiedades mecánicas para los diferentes grados de relleno de las probetas. Por lo tanto, este factor influye de una manera menos obvia en las propiedades mecánicas del producto final. Por otro lado, también podemos ver que las probetas con alto grado de curvatura tienen mejores propiedades mecánicas que las de 0.4 mm. Esto puede ser debido a que en esta geometría con menor radio de curvatura haya una mayor concentración de esfuerzos, lo que provocaría que las propiedades mecánicas fueran menores.

Por último, es interesante ver que la resistencia mecánica obtenida para el 100 % de relleno es muy similar para ambos radios de curvatura. De esta forma, se puede afirmar que el radio de curvatura es un factor determinante en el diseño de la pieza siempre que se utilicen grados de relleno inferiores al 100 %, ya que en este caso deja de ser un factor determinante.

Conclusiones

Tras la realización de la parte práctica del trabajo en la que hemos ido desarrollando en función de los objetivos presentados. A continuación, vamos a presentar las conclusiones alcanzadas en cada uno de ellos.

- El efecto del crecimiento de las sucesivas capas en la impresión 3D presenta un gran efecto en la tecnología 3DP utilizando polvo compuesto, siendo hasta 8 veces mayor la resistencia en la impresión horizontal.
- Por otra parte, en la impresión DLP y uso de resina acrílica, el efecto del crecimiento de las capas de impresión tiene escasa influencia en las propiedades mecánicas del producto final.
- Ante las mismas condiciones y parámetros de trabajo la tecnología FDM con el uso de PLA es el método que ofrece mejores propiedades mecánicas en todas sus configuraciones de impresión. Además, la impresión Horizontal longitudinal para la impresión FDM es la configuración que nos permite obtener las mejores propiedades mecánicas en nuestra pieza. Obteniendo el doble de resistencia frente DLP y hasta seis veces más que 3DP.
- Las piezas obtenidas mediante 3DP presentan las peores propiedades mecánicas, además el efecto del modo de impresión es un factor determinante, ya que, la impresión vertical presenta 8 veces menos resistencia que la impresión horizontal.
- El efecto del grado de relleno en las piezas de radio de curvatura 0.4 mm es evidente, ya que, a mayor grado de relleno obteníamos mejores propiedades mecánicas de forma lineal.
- Acorde al aumento del porcentaje de relleno de las piezas de radio 0.4 mm , tenemos un aumento del 130% en las propiedades mecánicas.
- Por otro lado, en las piezas de radio 0.8 mm , el efecto del grado de relleno es poco notable, para todos los porcentajes de relleno se obtiene prácticamente las mismas propiedades mecánicas a excepción de las piezas fabricadas con el 100% donde la resistencia aumenta considerablemente.
- Además, para las mismas condiciones de trabajo las muestras de radio 0.4 mm para el 100% de relleno presentaron mejores propiedades mecánicas que las muestras fabricadas con 0.8 mm de radio.

A modo de resumen, podemos decir que con los criterios estudiados, la tecnología FDM mediante el uso de PLA es la forma de impresión y material que ofrece las mejores propiedades mecánicas en su dirección de crecimiento Horizontal-longitudinal. Además, nos damos cuenta de que el grado de relleno en piezas de radio 0.8 mm no es un factor determinante en las propiedades mecánicas del producto final, gracias a ello, podemos ahorrar material tiempo de impresión y por consiguiente un ahorro de dinero imprimiendo a grados del 60-80% en lugar del 100%.

Queda para futuros trabajos realizar una investigación de criterios como: el ángulo de inclinación de la impresión, velocidad de impresión, estudio comparativo de otras tecnologías de impresión, así como el uso de otros materiales.

Bibliografía y Referencias

- [1] Topçu o., Taşcioglu Y., Ünver H. Ö.; A method for slicing CAD Models in binary STL format, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011
- [2] Dana Goldberg, “*History of 3D Printing: It’s Older Than You Are*”,
- [3] B. Berman, “*Business horizons*”, 2012
- [4] Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., Wang, Y., *3D printing: Printing precision and application in food sector, Trends in Food Science & Technology* (2017)
- [5] Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Koblighk, H. et al. *Int J CARS* (2010) 5: 335.
- [6] Frank G. Zarb School of Business, Hofstra University, 222
- [7] Amit Joe Lopes, Eric MacDonald, Ryan B. Wicker, "Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication", (2012)
- [8] David Espalin, Jorge Alberto Ramirez, Francisco Medina, Ryan Wicker, (2014) "Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20 Issue: 3, pp.236-244
- [9] Ismail Durgun Rukiye Ertan , (2014), "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20 Iss 3 pp. 228 – 235
- [10] <https://reprap.org/wiki/RepRap/es>
- [11] <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/>
- [12] Lu, K., & Reynolds, W. T. (2008). *3DP process for fine mesh structure printing. Powder Technology*, 187(1), 11–18.
- [13] Amit Joe Lopes, Eric MacDonald, Ryan B. Wicker, "Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication", (2012)
- [14] Lou, Alex and Grosvenor, Carol "Selective Laser Sintering, Birth of an Industry", *The University of Texas*, December 07, 2012. Retrieved on March 22, 2013
- [15] "Design Guide: Selective Laser Sintering (SLS)

- [16] Leo Greguric, “*What is a DLP 3D Printer? – Simply Explained*”
- [17] <http://designinsite.dk/htmsider/m0007>
- [18] <https://www.textoscientificos.com>
- [19] Martin, O., & Avérous, L. (2001). Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. *Polymer*, 42(14), 6209–6219. doi:10.1016/s0032-3861(01)00086-6
- [20] L. Serna Cock / A. Rodríguez de Stouvenel, “Produccion biotecnológica de ácido láctico”, vol. 5, número 001, pp.54-65 (2005)
- [21] Sergio Gómez González, Marcombo, “Impresión 3D”.
- [22] "Polycarbonate (PC)". UL Prospector. Retrieved 5 May 2014.
- [23] <https://www.aristegui.info/poliestireno-de-alto-impacto-un-antes-y-un-despues/>
- [24] <https://www.impresoras3d.com/filamento-nylon/>
- [25] Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 343–353. doi:10.1007/s11668-014-9803-9
- [26] Kenny L. Alvarez C, Rodrigo F. Lagos C, Miguel Aizpun “Influence of infill parameter on the mechanical resistance in 3D printing”