

Características y limitantes de la impresión 3D como método de fabricación digital

FABRICIO LEYTON

Formado en Diseño Industrial (EUCD) y en Artes Plásticas (IenBA). Exdocente EUCD del área tecnológica Procesos Productivos y Fabricación Digital. Investigador en áreas de Fabricación Digital y Accesibilidad. Responsable académico de proyectos de investigación ANII. Cocreador del espacio de Investigación y Extensión HackLab EUCD y encargado de diversos proyectos de extensión. Profesional en diseño, orientado a Fabricación digital y Desarrollo sustentable.

Este artículo está basado en una investigación, realizada en el marco del llamado interno a Proyectos de Iniciación a la Investigación de FADU en 2014, titulada *Estudio y caracterización de las variables que afectan a la impresión 3D en la generación de objetos manipulables*. El objetivo general de la misma fue analizar y detallar las variables técnicas que afectan a la impresión 3D en plástico por deposición de filamento como método de fabricación digital.

Por tratarse de una tecnología relativamente nueva resulta importante hacer un inciso especial para contextualizar lo que comúnmente se conoce como «fabricación digital» y lo que realmente engloba el término.

Dentro del término «fabricación digital» se reúnen distintas técnicas industriales que tienen como denominador común el hecho de que la herramienta que produce el proceso es manejada por motores y un comando Computer Aided Manufacturing [CAM] y no por un operario. Dentro de este enorme paraguas tenemos dos grandes categorías: la fabricación sustractiva [FS] —técnica que se basa en restar material a una pieza inicial a través de distintos procesos como perforado, fresado, corte, etc.— como puede ser el sistema de corte Control Numérico Computarizado [CNC] y la fabricación aditiva [FA] —basa su funcionamiento en la adición de material para conformar una nueva pieza— como es la impresión 3D.

Dentro del campo de la impresión 3D tenemos, a su vez, múltiples métodos, pero en nuestro país, actualmente, solo se cuenta con cuatro o cinco. Internacionalmente superan la veintena.

Por otro lado, es importante también destacar cómo, según la etapa de maduración de la técnica, esta es usada en los distintos estadios del ciclo de vida de un producto.

Lo que permitió que la cerámica dejara de ser una tecnología histórica, rústica y sencilla para ser parte de los componentes de alta tecnología que mandamos al espacio es simplemente la evolución de las técnicas y métodos asociados a la misma.

Toda tecnología requiere de un tiempo para madurar y en ese lapso temporal los campos de aplicación van cambiando y evolucionando. Por lo general se pasa de espacios tecnológicos accesibles a muchas personas y aplicaciones poco demandantes de especialización a espacios cada vez más complejos y menos accesibles, donde los conocimientos y métodos aplicados son manejados por personas con alta especialización.

Es así que el camino evolutivo de las tecnologías de fabricación digital sigue un derrotero similar al de las distintas tecnologías de fabricación de objetos, aunque en este caso es particularmente acelerado y pasa de un uso muy básico como es la fabricación de maquetas a usos más elaborados como son los prototipos funcionales, accesorios de producción como moldes, hasta llegar a uno más complejo como es la realización de productos finales.

Esto último requiere un conocimiento técnico más específico, que permita planificar productos funcionales y técnicamente consistentes. En este marco es que surge la necesidad de llevar a cabo esta investigación.

Impresión 3D mediante extrusión de material

El proceso de impresión 3D mediante deposición de material extruido presenta características singulares que afectan directamente sus capacidades de generación de objetos, así como las características físicas y formales que estos pueden tomar.

Al mismo tiempo, es una tipología de procesos aplicable a un enorme espectro de industrias, cambiando escalas y materiales. La deposición de material extruido se puede aplicar a escala nano para la fabricación de baterías o a escala mega para la fabricación de casas, pasando por la impresión biológica de órganos o comida.

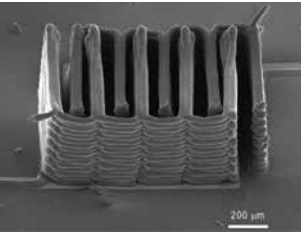


FIGURA 1. A RESEARCH TEAM FROM HARVARD UNIVERSITY AND THE UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN HAS DEMONSTRATED THE ABILITY TO 3D PRINT A BATTERY. THIS IMAGE SHOWS THE INTERLACED STACK OF ELECTRODES THAT WERE PRINTED LAYER BY LAYER TO CREATE THE WORKING ANODE AND CATHODE OF A MICROBATTERY (SEM IMAGE COURTESY OF JENNIFER A. LEWIS). FUENTE: *PRINTING TINY BATTERIES*, HARVARD UNIVERSITY, 2013, [HTTPS://WYSS.HARVARD.EDU/NEWS/PRINTING-TINY-BATTERIES/](https://wyss.harvard.edu/news/printing-tiny-batteries/)

En la actualidad, la manifestación más accesible de esta tipología la tenemos en la impresión 3D por deposición de filamento fundido [FDM] —o FFF por sus siglas—. Resultaba importante, entonces, relevar las características propias de esta técnica a fin de conocer cómo afecta a los productos impresos, cuáles son las propiedades que deben tener los objetos para poder ser producidos mediante esta modalidad y qué nuevos espacios de investigación se abren de cara al futuro. Para esto se definieron una serie de variables características del proceso y se diseñó una batería de pruebas y ensayos, de forma que fuese posible registrar y documentar los impactos de las variables principales de la impresión 3D en el objeto impreso resultante.

Dentro de las variables que afectan a los objetos impresos en 3D mediante plástico fundido podemos destacar:

- **CARACTERÍSTICAS DE LA IMPRESORA**
Rango de calor, tipo de cama, tipo de extrusor, sistema de fijación, estructura de la impresora: cerrada, semi-abierta, abierta.
- **SOFTWARE**
Tipos, parámetros generales, parámetros específicos, valores óptimos, valores forzados.
- **CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES**
Construcción de la pieza 3D, limitaciones geométricas, características según forma. Características mecánicas según grosor de paredes o ángulos de impresión. Densidad de la pieza final según tipo de estructura, entre otras.
- **MATERIALES DE IMPRESIÓN**
Tipos disponibles, colores, temperatura de fundición, características mecánicas y elásticas, resistencia a la rotura, entre otras.
- **DIMENSIONES DEL MODELO**
Alcances de la tecnología, problemas derivados de la escala, resoluciones de impresión, entre otras.
- **TERMINACIONES**
Superficiales según escala, según material, según planos de impresión, según velocidad, según temperatura. Post procesados mecánicos y químicos.
- **ESTRUCTURAS AUXILIARES**
Definición, características, opciones de estructura, alternativas.

Características relacionadas a la mecánica del proceso

En términos generales, la técnica de extrusión vertical de material y deposición en movimiento «XY» capa a capa tiene varias características que deben examinarse con detenimiento de forma de evaluar cómo repercuten en el objeto impreso.

La impresión 3D por deposición de filamento se basa en la extrusión vertical de material mediante una boquilla circular, con movimientos en «XY» libres



FIGURA 2. ILUSTRACIÓN DEL PROCESO DE IMPRESIÓN POR DEPOSICIÓN DE FILAMENTO. FUENTE: LAS 4 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D MÁS POPULARES DEL MERCADO DE ROBIN PÉREZ, 2015, [HTTP://TECNOIMPRES3D.COM/4-TECNOLOGIAS/](http://tecnoimpres3d.com/4-tecnologias/)

y movimientos en «Z» capa a capa. La extrusión se realiza calentando una boquilla y presionando material en forma de hilo semirígido sin fundir, obligándolo a pasar por la embocadura. En el pasaje se producirá la fundición, que será total justo antes de salir al exterior. La deposición del material se realiza sobre una superficie plana horizontal, paralela al plano «XY», que, según el tipo de material a imprimir, necesitará adquirir temperatura para ayudar a la adherencia de las primeras capas y evitar cualquier deformación de la pieza.

Características y limitantes que entran en juego en la impresión 3D por extrusión:

- RELATIVAS AL EXTRUSOR
Diámetro de la boquilla de extrusión como medida mínima de resolución «XY» y máxima de la dimensión «Z». El extrusor funciona depositando material de forma vertical y esto caracteriza la forma de funcionamiento de la técnica. En el caso de impresión de algunos materiales, como el material plástico —caso de este estudio—, el extrusor debe levantar temperatura para fundir el material a depositar.
- RELATIVAS AL MOVIMIENTOS «XY»
Límite o precisión dada por el método de transporte y la precisión de los motores paso a paso. Determina la dirección en la que se acumulan las distintas extrusiones de material, definiendo direcciones de mayor resistencia mecánica y resolución superficial.
- RELATIVAS AL MOVIMIENTO EN «Z»
Es el movimiento que permite ajustar una resolución menor a la del diámetro del extrusor. Hace posible, en combinación con la velocidad de movimiento «XY» y la velocidad de avance del material, distintos tipos de extrusiones y capas.
- RELATIVAS A LA SUPERFICIE DE IMPRESIÓN
El plano horizontal en el que se realiza la impresión tiene una influencia importante en la impresión de piezas. Determina la necesidad de generación de volúmenes accesorios como son los soportes o la cama de impresión. En muchas ocasiones, como en la impresión de material acrilonitrilo butadieno estireno [ABS], es necesario que la superficie sea calefaccionada, factor determinante a estudiar.
- RELATIVAS AL MATERIAL
Uno de los mayores atractivos de esta técnica es la posibilidad de ser utilizada con innumerable cantidad de materiales. El material define los rangos de velocidad,

resolución y temperatura que debe tener la impresión. En este caso se trabajó con los polímeros ABS y ácido poliláctico [PLA].

Principios generales

El extrusor es el rey, ya que la impresión 3D, a grandes rasgos, se basa en mover este dispositivo por tres dimensiones mientras va extruyendo material. La relevancia que tiene tanto en el proceso como en el resultado es total y por eso resulta determinante conocer el diámetro que se va a usar para imprimir el diseño con el que trabajaremos.

Un extrusor con una medida «x» de diámetro va a extruir material de igual medida (fig. 3) —hay un cierto porcentaje de dilatación del material una vez que sale de la boquilla, pero puede ser obviado—. En este caso hipotético, se imprime cada capa de material con una altura igual al diámetro del extrusor, lo que genera que las distintas capas de material apenas tengan contacto entre sí, imposibilitando su adherencia.

Si se define una altura de capa igual al 75 % del diámetro del extrusor, se fuerza al material a comprimirse sobre la capa anterior (fig. 4). Este cambio en la altura de la capa —o del eje «Z»— permite tener suficiente superficie de contacto como para lograr la adherencia de una con otra y no colapsar. La altura máxima de capa que se puede utilizar en extrusión de material se ubica entre el 75 % y el 80 % del diámetro del extrusor. Un porcentaje mayor implicaría capas sin posibilidad de adherencia.

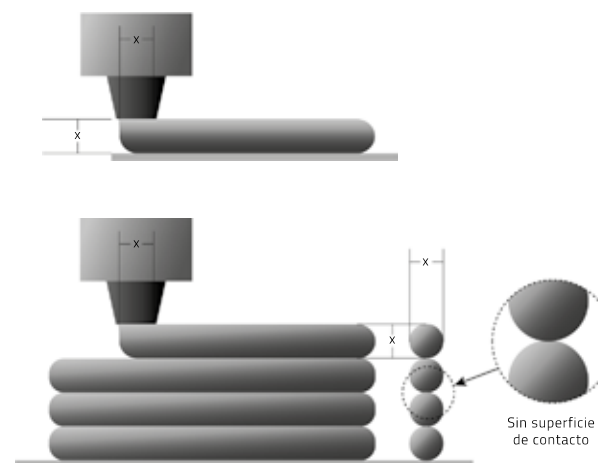


FIGURA 3. DIAGRAMA DE UN EXTRUSOR DEPOSITANDO MATERIAL CON UNA ALTURA DE CAPA IGUAL AL DIÁMETRO «X» DEL EXTRUSOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

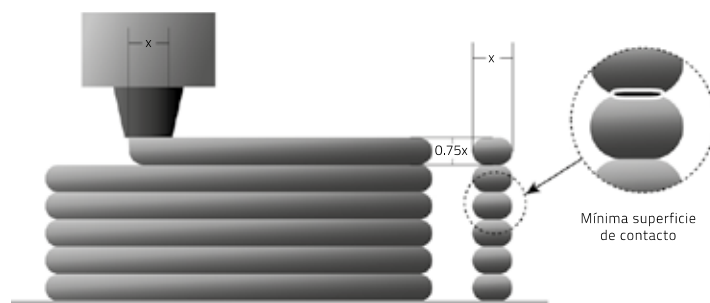


FIGURA 4. DIAGRAMA DE UN EXTRUSOR DEPOSITANDO MATERIAL CON UNA ALTURA DE CAPA IGUAL AL 75 % DEL DIÁMETRO «X» DEL EXTRUSOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

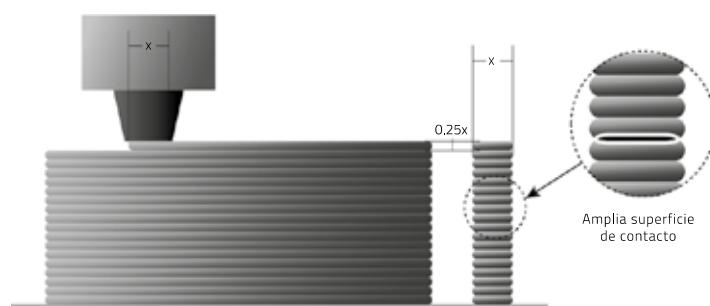


FIGURA 5. DIAGRAMA DE UN EXTRUSOR DEPOSITANDO MATERIAL CON UNA ALTURA DE CAPA IGUAL AL 25 % DEL DIÁMETRO «X» DEL EXTRUSOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para generar una amplia superficie de adherencia, provocando a la par un aumento de la resolución, la altura de capa se puede seguir disminuyendo hasta al menos un 25 % del diámetro del extrusor (fig. 5). Esta limitante se observa en las resoluciones por defecto que manejan la gran mayoría de impresoras del mercado. Con boquillas de 0,4 mm de diámetro, las resoluciones van de 0,3 mm a 0,1 mm, reproduciendo así el esquema de 75 % máximo y 25 % mínimo.

Algunos de los ensayos

RESOLUCIÓN «Z»

La resolución del eje «Z» es generalmente la resolución publicitada al momento de comparar o vender impresoras 3D FDM. En el caso de la impresión por extrusión, el valor de resolución de eje «Z» es el único que puede ser variado vía *software*, ya que el diámetro del extrusor es constante. Sus limitantes están dadas, en su extremo de mayor tamaño, por el diámetro del extrusor, y, en su extremo de menor tamaño, por la precisión de movimientos de motores y rodamientos verticales —características inherentes a la máquina—, así como por las propiedades físicas del material a extruir.

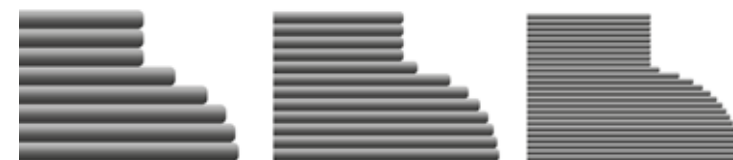


FIGURA 6. DIAGRAMA DE DEFINICIONES DE UNA MISMA GEOMETRÍA EN RESOLUCIONES DE 3X, 2X Y 1X. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

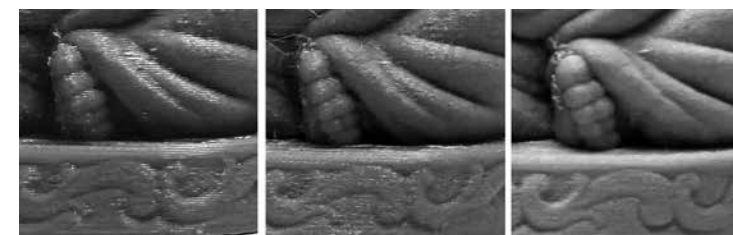


FIGURA 7. DETALLE DE IMÁGENES DE ENSAYOS IMPRIMIENDO UNA MISMA GEOMETRÍA CON DISTINTAS RESOLUCIONES «Z». FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para comparar las distintas resoluciones de la máquina y saber cómo afectan estas a la pieza final, se imprimió un objeto con una geometría compleja, usando, cada vez, una de las resoluciones *standard* según la máquina (fig. 7). Este tipo de ensayo permite obtener datos sobre calidad superficial, tiempos de impresión y gasto de material, siendo uno de los más comunes en lo que respecta a comparación de resoluciones.

La verificación se realizó mediante la observación, con generalidades y detalles de cada pieza, de manera de comparar visualmente cómo afecta la variación de la resolución «Z» a la terminación y construcción de las piezas.

Podemos observar como la resolución «Z» repercutió directamente en el detalle y calidad de la terminación superficial de la pieza: a mayor resolución, mayor detalle y menos textura superficial derivada del proceso de impresión. Por otro lado, a medida que aumentamos la resolución «Z» la cantidad de material utilizado se mantiene casi constante —cada capa deposita menos cantidad de material a medida que la resolución «Z» aumenta—, pero el tiempo requerido para la impresión crece significativamente.

RESOLUCIÓN «XY»

La resolución de impresión «XY» en este tipo de procesos está limitada por la dimensión del diámetro del extrusor o *nozzle*. Esto deriva en que las posibilidades de resolución de la pieza impresa están vinculadas de manera directa con una característica física de la máquina.

Se realizaron ensayos para contrastar la impresión de paredes con dimensiones iguales al diámetro del extrusor o sus múltiplos —por ejemplo: a un extrusor de 0,4 mm, paredes de 0,4 - 0,8 - 1,2— y fuera de esos patrones.

Para que fuese posible evidenciar las diferencias que arrojaba este ensayo, se trabajó con modelos de paredes de distintos espesores. Fueron impresos

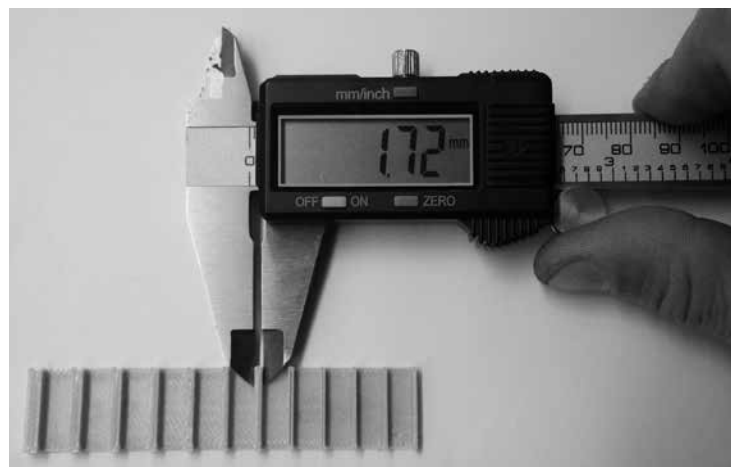


FIGURA 8. MEDICIÓN DE PAREDES PARA ENSAYO DE RESOLUCIÓN «XY».
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

cambiando la escala en pasos de 10%, a fin de ir comprobando cómo un mismo diseño, con el escalado, puede perder o ganar resolución al ver sus detalles comprendidos o no dentro de ese factor de dimensión del extrusor.

Luego de correr la batería de ensayos y tomar las medidas correspondientes (fig. 8), se observó cómo incidían el *software* y la máquina en las diferencias de resolución de los distintos espesores de pared.

Las paredes con espesores menores al diámetro del extrusor son resueltas con un espesor igual al diámetro del extrusor o no son resueltas. Por su lado, las paredes de espesores mayores al diámetro del extrusor son resueltas con paredes iguales o múltiplos de este, lo que genera saltos en los espesores que no respetan los valores del modelo original. Las paredes con valores múltiplos del diámetro del extrusor no presentaron problemas, mientras que las paredes con medidas fuera del rango 1x, 2x, 3x, etcétera, produjeron soluciones diversas. Incluso, paredes con un «alma» hueca.

En el caso de los modelos 3D escalados, se observa cómo paredes, que en su dimensión original se imprimen correctamente, una vez escaladas pueden caer en un rango de espesores en el que se generan «almas» huecas.

ÁNGULOS DE INCLINACIÓN

Como consecuencia de que la extrusión se realiza de forma vertical, en combinación con la restricción de resolución de la dimensión «XY», las piezas impresas adquieren distintas características dependiendo de si su geometría implica inclinaciones con respecto al plano «XY».

En este ensayo se prueban distintos planos inclinados con variaciones y se evalúan los resultados de cada uno de ellos, de forma de determinar los ángulos o rangos con mejor calidad superficial al momento de utilizar esta técnica.

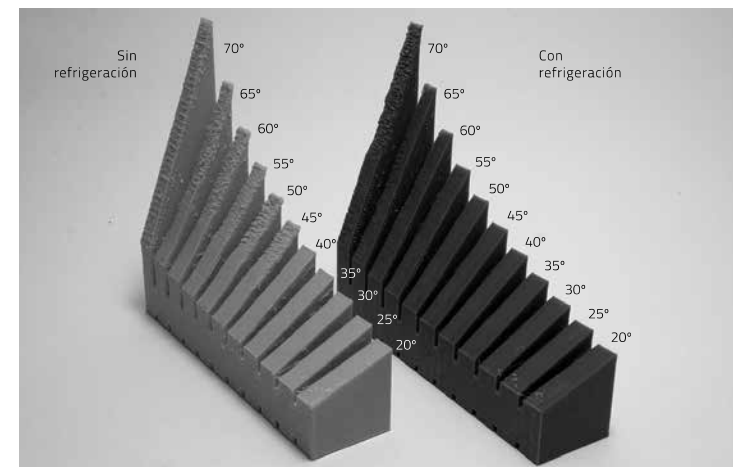


FIGURA 9. MODELOS CON PLANOS A DISTINTOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

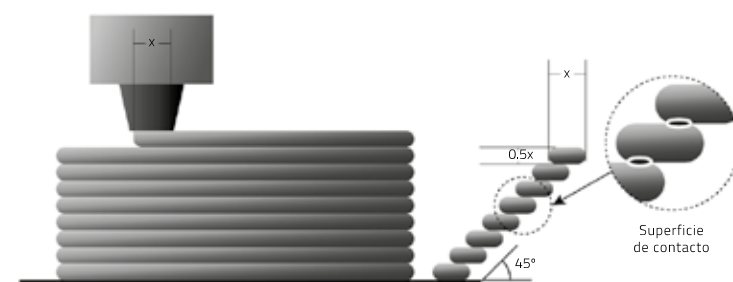


FIGURA 10. SUPERFICIE DE CONTACTO ENTRE CAPAS CON UN DESPLAZAMIENTO DE 45°. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para geometrías con ángulos menores a 45° es necesaria la generación de soportes o volúmenes auxiliares que realicen la función de base de las capas superiores que serán depositadas. Esto sucede por la forma en que cada deposición de material se adhiere a la capa anterior (fig. 10).

Tanto por la forma en que la impresión por deposición construye cada capa «una sobre otra» como por la manera en que el material es extrudido se verifica que existen límites físicos que limitan la fabricación de determinadas geometrías. El límite está dado por el ángulo de desplazamiento que existe entre capa y capa. Mediante ensayos se verifica que este debe mantenerse por encima de los 45° con respecto al plano de impresión «XY». Asimismo, puede disminuir en condiciones en las que el material extruido pueda solidificarse inmediatamente luego de ser depositado, dando más fortaleza a la cáscara —o *shell*— recién formada. En el caso de las impresoras de extrusión de plástico esto se logra con la incorporación de refrigeración puntual sobre la boquilla del extrusor.



FIGURA 11. MODELOS IMPRESOS, SOMETIDOS A ESFUERZOS DURANTE LOS ENSAYOS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

ORIENTACIÓN DE PIEZA (RESISTENCIA MECÁNICA)

Dadas las características en que los objetos son producidos por FDM, este ensayo busca revelar qué tanto influye la orientación de la pieza al momento de ser fabricada en su resistencia mecánica de uso.

Los objetos impresos por extrusión de material son conformados capa por capa y de abajo arriba, lo que les confiere una terminación «a rayas» característica. Esas líneas le indican a cualquier observador la orientación que tenía la pieza en el momento de su impresión y el sentido en el que es más resistente. En el caso de las impresiones en plástico, la consistencia del material una vez fundido en el extrusor es constante y genera una unidad a lo largo de la extrusión, a diferencia de lo que pasa con la extrusión que se deposita sobre otra capa, que ya tiene varios segundos de enfriamiento y exposición a temperatura ambiente. Es así que en el sentido de la impresión podemos hablar de continuidad de material y en el de la suma de capas debemos hablar de adherencia. El vínculo por adherencia entre materiales es estructuralmente más débil que la continuidad de un material fundido y es por eso que la pieza es más débil en la dirección del eje «Z» que en la dirección del plano «XY», sentido en el que se realiza la extrusión. Este ensayo consistió en la impresión de varias copias del mismo objeto, cambiando el ángulo de orientación de la pieza al momento de la impresión, de forma de tener varias copias de una misma forma, pero con orientaciones de extrusión distintas.

Posteriormente se realizaron pruebas de flexión, en el Instituto de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UdelAR, con el fin de estimar qué ángulos o sentidos de extrusión resisten de mejor forma las distintas fuerzas aplicadas. Los ensayos se realizaron basados en la norma ISO 178 —Plastics Determination of flexural properties—, que establece los ensayos aplicables a los plásticos no isótropos como los que se usan en impresión FDM.

El objetivo final fue establecer los ángulos más convenientes para impresión de piezas que deben resistir algún tipo de esfuerzo en su estructura.



FIGURA 12. PIEZAS DE ENSAYO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

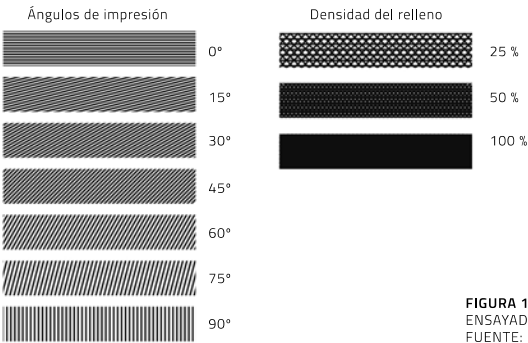


FIGURA 13. DIAGRAMA DE VARIABLES ENSAYADAS —ÁNGULOS Y DENSIDAD—. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

A fin de mantener las piezas a ensayar dentro de cantidades viables de ser realizadas y sin perder efectividad de las pruebas, se definieron 2 variables de las probetas: ángulo de fabricación y densidad —infill—. El ángulo se definió en saltos de 15°, de 0° a 90°, totalizando 7 variantes. La densidad —infill— se estableció en 3 variantes: 25%, 50% y 100%. De cada una de las combinaciones de variantes —ángulos y densidad— se realizaron 5 piezas idénticas, tal como exige la norma.

Como se puede apreciar en la siguiente gráfica (fig. 14), la resistencia a la presión está directamente relacionada con el porcentaje de relleno o infill de la pieza, por lo que las probetas con densidad 25% resisten menos que las probetas con densidad 50% y estas menos que las probetas con densidad 100%. Esta relación se cumple cuando el ángulo de acción del esfuerzo es de 90° con respecto al sentido de fabricación de la pieza y solo se mantiene para distintos ángulos de acción en las piezas con 100% de relleno. En el caso de las probetas con rellenos parciales, de 25% y 50%, la resistencia cae a medida que nos acercamos a los 45° de ángulo entre el esfuerzo y el sentido de impresión de la pieza. Esa resistencia luego se mantiene constante para ambos porcentajes de relleno a medida que se acerca al ángulo de acción del esfuerzo igual a 0° con respecto al sentido de impresión de la pieza.

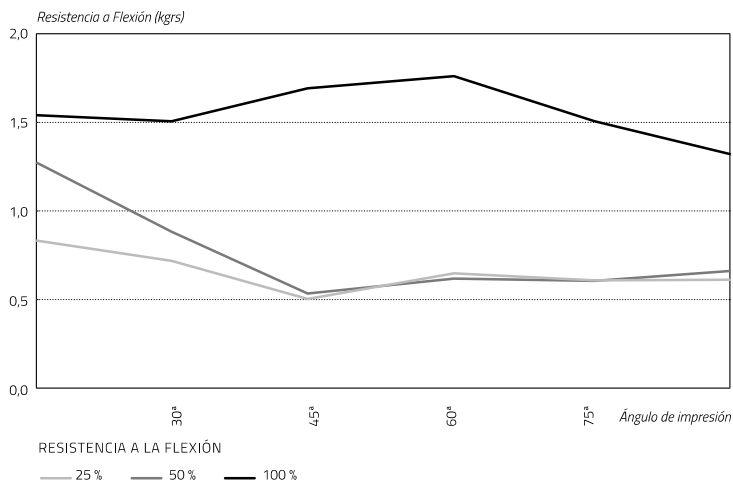


FIGURA 14. GRÁFICA DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ÁNGULOS DE IMPRESIÓN / RESISTENCIA A LA FLEXIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Podemos concluir, entonces, que para piezas que requieran soportar esfuerzos conviene que estas sean impresas perpendiculares al sentido del esfuerzo al que van a ser sometidas. Cabe agregar que en escenarios de menor control, solo en ángulos superiores a 45° y densidades de pieza del 100% de relleno.

Otro dato significativo que arroja este ensayo es que las piezas plásticas impresas en PLA se mantienen dentro del rango típico de resistencia en PLA inyectado —entre 1310 a 16100 psi— solo en su configuración de densidad del 100%. En los ensayos, las piezas con densidad 100% promediaron los 1,5 kg/mm², lo que equivale a 2133 psi. Con densidades de 25% y 50% y ángulos superiores a los 45°, el promedio fue de 0,7 kg/mm², lo que equivale a 853 psi, poco más del 50% de la resistencia mínima a la flexión para materiales como el PLA.