



Fabrizio Leyton

Estudio y caracterización de las variables que afectan a la impresión 3D en la generación de objetos manipulables

Esta investigación tiene como objetivo la constatación mediante experiencias prácticas de las características y variables inherentes al proceso de fabricación 3D de objetos y cómo estos afectan a los objetos generados con este proceso.

Tutor: Lic. Rita Soria
Co-Tutor: Dis. Ind. Andrés Roppa



farq | uruguay
universidad de la república

Tabla de contenidos

[Resumen de la investigación](#)

[Fundamentación y antecedentes](#)

[Objetivos de la investigación](#)

[Estrategias, metodología y materiales de investigación](#)

[Qué es la impresión 3D?](#)

[Características específicas de la impresión FDM](#)

[Características relacionadas a la mecánica del proceso](#)

[Características relacionadas al Software y Modelado](#)

[Software de procesamiento](#)

[Ensayos](#)

[1. Resolución Z](#)

[1.1 Ensayos](#)

[1.2 Conclusiones](#)

[2. Resolución XY](#)

[2.1 Ensayos](#)

[2.2 Conclusiones](#)

[3. Cáscaras \(shells\)](#)

[3.1 Conclusiones](#)

[4. Ensayos con rellenos \(infill\)](#)

[4.2 Conclusiones](#)

[5. Ángulos de inclinación](#)

[5.1 Ensayos](#)

[5.2 Conclusiones](#)

[6. Camas de adhesión y Soportes de Apoyo](#)

[6.1 Ensayos](#)

[6.2 Conclusiones](#)

[7. Orientación de pieza \(Resistencia mecánica\)](#)

[7.1 Ensayos realizados](#)

[7.2 Conclusiones](#)

[8. Orientación de pieza \(Estética\)](#)

[8.1 Ensayos](#)

[8.2 Conclusiones](#)

[Dificultades encontradas](#)

[Conclusiones generales](#)

[Nuevos espacios de Investigación](#)

[Bibliografía](#)

[Anexos](#)

[Tabla completa de ensayos de Torsión](#)

Resumen de la investigación

La impresión en tres dimensiones representa un campo de estudio que promete un sin número de aplicaciones en diversas áreas, abarcando desde el campo de la repostería, construcción, decoración, hasta el de la salud, abriendo la posibilidad de incluso, imprimir órganos para transplantes.

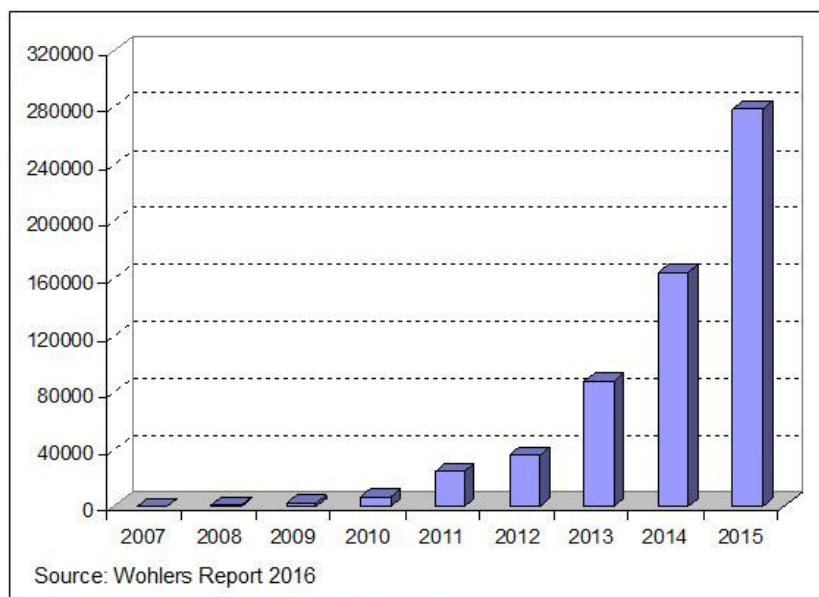
En el presente trabajo se propuso estudiar el potencial que la técnica de impresión en tres dimensiones tiene en la fabricación de objetos finales, trascendiendo el prototipado.

Este destino, el de la fabricación digital, coloca al diseño industrial frente al desafío de dominar características, posibilidades y limitaciones asociadas a dicha técnica. Es a través del diseño de pruebas y ensayos con sus respectivos mecanismos de control de las variables que afectan a la impresión, que se obtendrán insumos sistematizados que permitan alimentar los procesos proyectuales de generación de objetos que serán producidos con la técnica de impresión en tres dimensiones.

Fundamentación y antecedentes

La generación de objetos mediante impresión 3D data de más de 30 años, pero fue recién en los últimos siete que se ha desarrollado considerablemente.

Las primeras patentes de la impresión 3D se registraron en los años 80 y durante muchos años estuvieron en manos de unas pocas empresas, sin que se produjera un importante desarrollo investigativo, pero al expirar entre 2008 y 2009, comienzan los avances en la investigación, orientada tanto a la mejora del producto “impresora” como a la técnica de impresión, bajando sus costos significativamente.



More than 278,000 desktop (under \$5,000) 3D printers were sold worldwide last year

Figura 1 - La gráfica muestra las ventas de impresoras domésticas a nivel mundial, entre los años 2007 y 2015 (wohlers, 2016).

La accesibilidad de las impresoras 3D debido a la baja en sus precios generó un fenómeno social y económico: la fabricación digital como práctica abierta de producción entre iguales.

Esta disrupción en el modelo productivo industrial tradicional producto de la liberación de diseños y medios de producción posibilita que cualquier persona y en cualquier lugar pueda formar parte del proceso de generación de valor económico. Es enclave de lo que se conoce como “economía P2P”, en el que el acceso a un medio de producción de información - un dispositivo con conexión a internet -

permite el acceso a ciertos medios de producción material, y por tanto, reduce las barreras de entrada a flujos productivos emergentes que generan riqueza económica, social y cultural (Chris Anderson:2010)

La democratización del medio de producción material posibilita no sólo la generación de prototipos sino que posibilita la producción de objetos finales, posicionándonos frente a una real “Fabricación Digital”.

Desde el campo del Diseño Industrial, este cambio de paradigma económico implica la necesidad de profundizar en el estudio de la técnica de la impresión 3D, y de todos los aspectos relacionados a sus posibilidades productivas; usos como medio de producción de piezas no prototípicas sino finales.

En el año 2012 se crea en la EUCD - FARQ, el Laboratorio Taller en desarrollo de procesos y productos de diseño, gracias a los fondos obtenidos por la CSIC en su programa de Fortalecimiento de equipamiento de investigación, es así que se accede a la compra de la primer impresora en tres dimensiones. Desde el inicio hemos tenido una participación activa en el desarrollo del Laboratorio y particularmente en la promoción del uso e investigación en ésta nueva tecnología de fabricación de objetos, actividades que se han visto interrumpidas debido a que el servicio no cuenta con fondos para su sistematización. No obstante ello, el conocimiento acumulado en la temática, ha permitido cumplir con la demanda de asesoramiento y presentación de esta tecnología en los diversos espacios que lo han solicitado. Ejemplos de ello son: el asesoramiento realizado al espacio LabFab del VidiaLab en el marco de su proyecto ALFA Gaviota; y la asesoría al equipo de I+D del plan Ceibal sobre tecnología 3D para el desarrollo de un futuro programa.

Al ser una tecnología nueva, no se encuentra suficiente información que respalde o guíe al diseñador en la fabricación de piezas mediante impresión 3D, contar con información sistematizada es vital para plantearse su uso como un real método disruptivo de fabricación de objetos.

Es necesario para el desarrollo académico un estudio de las características, posibilidades y limitaciones de la tecnología de generación de objetos. Se requiere nuevo conocimiento que sustente esta una nueva forma de producir.



Figura 2 - Pequeño relevamiento primario de características físicas de objetos impresos en 3D, EUCD-2013.

El presente estudio es un abordaje sistemático de la tecnología de impresión en tres dimensiones como medio de fabricación de objetos finales, apuntando a la perfección formal, cuidando detalles, reduciendo la producción de desperdicios y aumentando la capacidad de producir elementos complejos.

Objetivos de la investigación

- Identificar y describir procesos de fabricación digital
- Analizar y detallar las variables técnicas que afectan a la impresión 3D en plástico por deposición de filamento.
- Establecer referencias de procesos en la fabricación de objetos manipulables.

Estrategias, metodología y materiales de investigación

Se diseñó una batería de pruebas con la Impresora disponible en la EUCD (Makerbot Replicator Dual), a fin de registrar y documentar los impactos que cada una de las variables de la técnica tiene en un objeto impreso resultante.

Los ensayos (pruebas y tests) abarcaron un abanico de variables que posee la técnica:

- **Características generales de la impresión 3D en plástico por FDM**
- **Características generales de las piezas impresas**
- **Materiales**
Tipos de materiales disponibles, colores, características técnicas de la materia prima, características técnicas del objeto impreso, características mecánicas, resolución relacionada.
- **Dimensiones**
Alcances de la tecnología, problemas derivados de la escala, resoluciones de impresión.
- **Terminaciones**
Terminación según escala, según material, según planos de impresión, según velocidad, según temperatura. Post procesados mecánicos y químicos.
- **Software**
Tipos, parámetros generales, parámetros específicos, valores óptimos, valores forzados.
- **Características Estructurales**
Construcción de la pieza 3D, limitaciones geométricas, características de impresión según forma. Características mecánicas según grosor de paredes o ángulos de impresión. Densidad de la pieza final según tipo de estructura.
- **Estructuras auxiliares**
Definición, características, opciones de estructura, alternativas.
- **Variables según características de la impresoras**
Rango de calor de impresión, rango de calor de cama, tipo de extrusor, sistema de fijación, estructura de la impresora: cerrada, semi-abierta, abierta.

A lo largo de toda la investigación se utilizaron distintos medios de registro: textos, tablas de datos, galería de imágenes y diagramas.

Primero que nada...

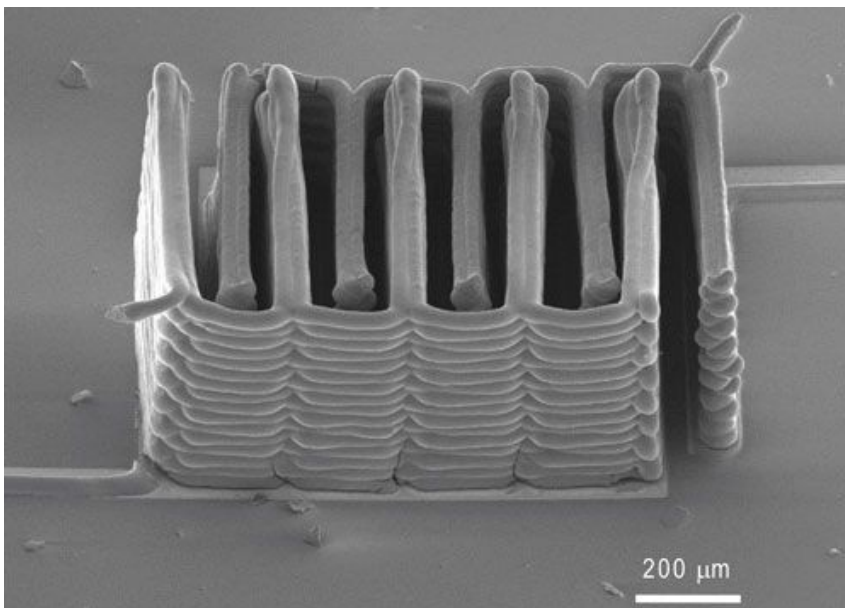
Qué es la impresión 3D?

“Impresión 3D” es el nombre en el que comúnmente se agrupan distintas tecnologías de fabricación aditiva, que como su nombre lo indica, es la generación de objetos mediante la adición de material, a diferencia de la sustracción de material de los métodos tradicionales de fabricación.

Comúnmente este proceso de adición de material se realiza depositando material de aporte capa a capa, aunque existen métodos de fabricación aditiva que trabajan desde otra perspectiva de adición.

Características específicas de la impresión FDM

El proceso de impresión mediante deposición de filamento fundido (FDM por sus siglas en inglés) tiene características singulares que afectan directamente sus capacidades de generación de objetos, y las características físicas y formales que estos pueden tomar.



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.)

Al ser el método de impresión 3D más utilizado en la actualidad y de mayor potencial de expansión en la fabricación de objetos finales, resulta importante relevar las características propias de la técnica, cómo afectan a los productos impresos, qué características deben tener los objetos para poder ser impresos mediante esta técnica y qué nuevos espacios de investigación se abren de cara al futuro.

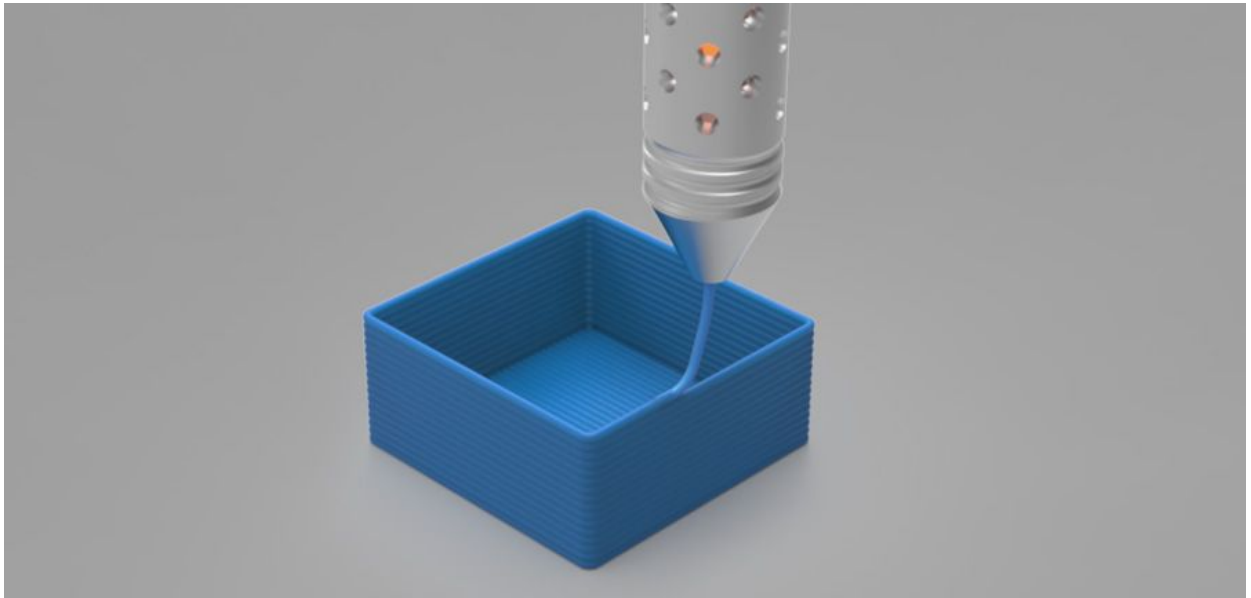
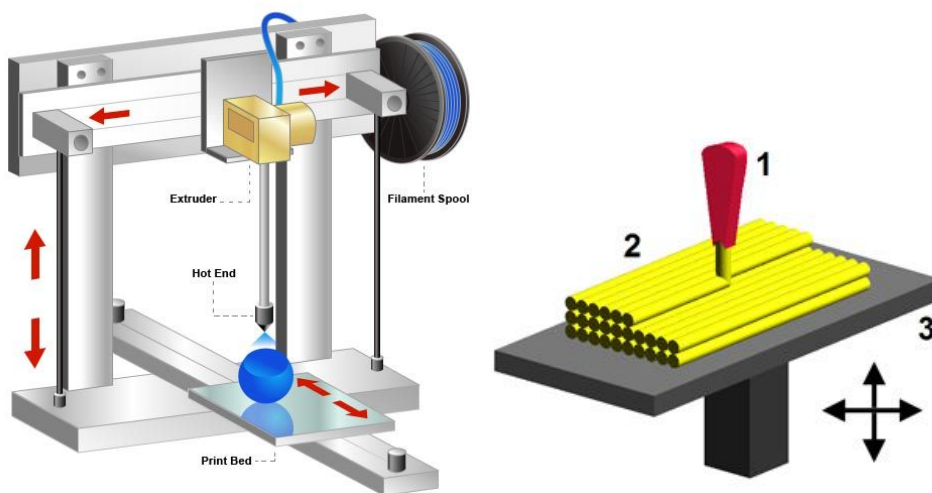


Imagen: tecnoimpre3d.com (<http://tecnoimpre3d.com/wp-content/uploads/2015/08/Cover.jpg>)

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 propias que deben examinarse con detenimiento de forma de evaluar cómo repercuten en el objeto impreso.



Diagramas ilustrativos del funcionamiento de una impresora 3D. Fuente desconocida.

La impresión 3D por deposición de filamento se basa en la **extrusión vertical** de material mediante **boquilla circular**, con movimientos en **XY libres** y movimientos en **Z capa a capa**.

La extrusión se realiza **calentando** una boquilla y **presionando material** en forma de hilo semi-rígido sin fundir de forma de obligarlo a pasar a través de ella. En su paso el material se funde inmediatamente antes de salir al exterior.

La impresión se realiza sobre una superficie plana horizontal, paralela al plano XY, que según el tipo de material a imprimir es necesario que adquiera temperatura para ayudar a la adherencia de las primeras capas y evitar deformación de la pieza.

Características que entran en juego en la impresión 3D por extrusión.

- **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 es el caso de estudio de material plástico, el extrusor debe levantar temperatura para fundir el material a depositar.
- **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.
- **Movimiento en Z**
Es el movimiento que permite ajustar una resolución menor a la del diámetro del extrusor. Permite combinado con la velocidad de movimiento XY y la velocidad de avance del material, lograr distintos tipos de extrusiones y capas.
- **Superficie de impresión horizontal**
El plano horizontal donde 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 ABS, es necesario que la superficie sea calefaccionada, factor determinante a estudiar.
- **Material**
Uno de los mayores atractivos de esta técnica en la posibilidad de ser utilizada con innumerable cantidad de materiales. El material define los rangos de velocidad, resolución, temperatura, que debe tener la impresión. En este caso se trabajó con los polímeros ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido Poliláctico).

Características relacionadas al Software y Modelado

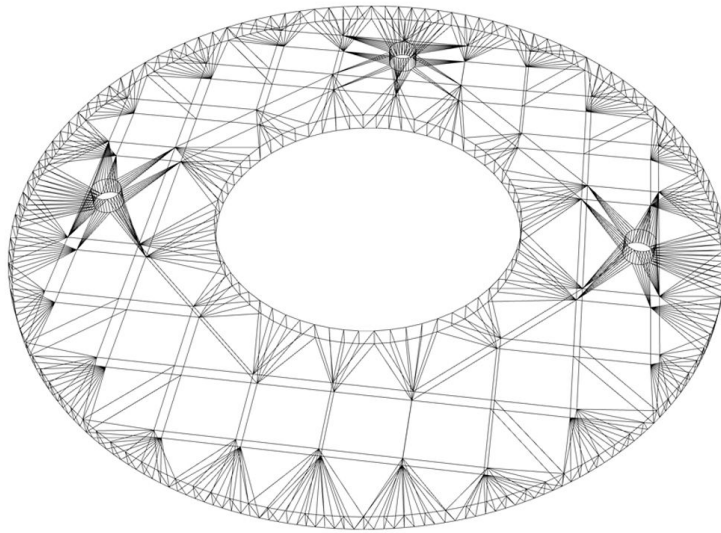


Diagrama de construcción de un objeto tridimensional. Fuente desconocida.

Gran parte de las características de las piezas impresas mediante extrusión son dadas por la forma en que el software utilizado para realizar la traducción de un modelo 3D a una secuencia de trayectos lineales, define los caminos a seguir por la extrusión, capa a capa, de forma de reconstruir físicamente el objeto digital tridimensional.

A grandes rasgos, es posible decir que los actuales softwares de procesamiento e impresión, interpretan la pieza digital de abajo hacia arriba y de afuera hacia adentro. Se cargan con información sobre resoluciones XY y Z, velocidad, temperatura, aceleración, etc. Se definen porcentajes de relleno para espacios que tridimensionalmente se realizan como macizos. Y se definen la forma, orientación y características de elementos auxiliares a la impresión, como son los soportes de apoyo y las camas de adhesión.

Aquí un repaso de las características controladas por software que influyen en la fabricación de objetos.

- **Camas de adhesión**
Las camas de adhesión son estructuras opcionales generadas por software que permiten aumentar la superficie de contacto entre la pieza impresa y la superficie horizontal de soporte. Se utiliza generalmente cuando el material a imprimir tiene baja adhesión o pocos puntos de contacto con la superficie, de forma de aumentar el contacto artificialmente y lograr más estabilidad de la pieza durante la impresión.
- **Soportes auxiliares de Apoyo**
Debido a que la impresión se realiza capa a capa en secuencia sobre una superficie plana horizontal, las piezas que por sus características formales o por su disposición en la máquina contienen partes voladas con determinadas características, estas deben ser soportadas desde el “piso” con estructuras auxiliares.
- **Temperatura**
La temperatura es una variable muy importante en la extrusión de polímeros, como es el caso de estudio. Tanto el extrusor como la superficie de apoyo deben estar a temperaturas determinadas, esa temperatura está definida por el tipo de material y sus características físicas y por configuraciones particulares, como son la velocidad de impresión elegida, la

temperatura ambiente, etc.

- **Velocidad**

La velocidad tiene 2 expresiones dentro de esta técnica, la velocidad de desplazamiento del cabezal de impresión y la velocidad de la extrusión de material. En ambos casos, estas variables dependen del material que se está extruyendo y de la configuración de temperatura, resolución Z, etc. seleccionada.

- **Resolución Z**

La resolución Z es la única modificable mediante software, y define el espesor de cada capa de la pieza a imprimir de forma global. Es el valor que habitualmente se utiliza para definir las “resoluciones” de impresión disponibles en una impresora dada. Este parámetro afecta directamente el tiempo de impresión y el nivel de detalle según la orientación de la pieza. Sus valores mínimos dependen de elementos mecánicos, como ser la rotación mínima de cada paso de motor que mueve el eje Z.

- **Resolución XY**

La resolución XY a diferencia de la resolución Z está definida de forma mecánica y está asociada con el diámetro de la boquilla de impresión. Esta dimensión habitualmente no es considerada en su real magnitud y afecta directamente a los detalles superficiales de los objetos impresos.

- **Cáscaras (Shells)**

Los modelos 3D digitales son procesados en términos generales “de afuera hacia adentro”. Esto hace que sin importar las características geométricas del objeto, éste tiene siempre una capa exterior que será la primera en ser definida, es la primer “cáscara” o “shell” de la pieza. Se pueden configurar la cantidad de shells que tendrá una pieza, y estas serán extrusiones de espesor igual al diámetro del extrusor, colocadas una junto a la otra hacia el interior de la pieza. Una vez que culmina la cáscara o shell, comienza el relleno.

- **Relleno o “infill”**

El relleno es la parte central de la pieza y está separado por el exterior mediante las cáscaras. Habitualmente no podemos verlos, salvo durante la fabricación. El relleno puede ser configurado en distintas densidades y patrones de entramados. Tanto el tipo de trama como la densidad de las misma afectan a las características mecánicas de la pieza final, pues afecta directamente su resistencia ante esfuerzos externos.

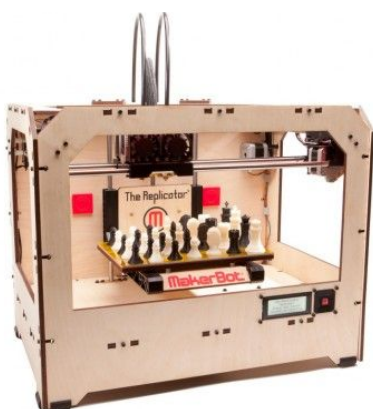
Ensayos

Para evaluar cómo afectan las distintas variables, tanto mecánicas como de software, en la resolución de piezas impresas por extrusión, se definieron varios ensayos que permitieron evidenciar la influencia de cada una de ellas.

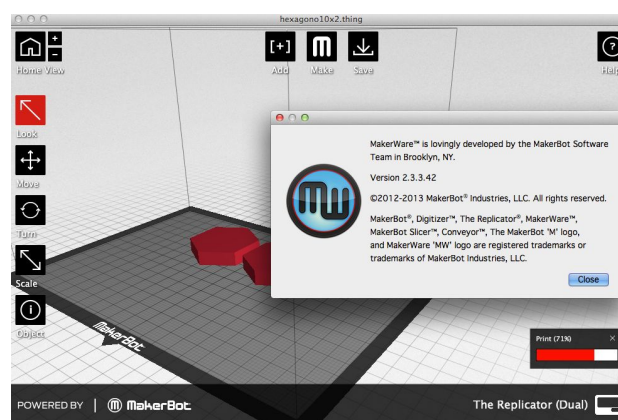
En cada ensayo se establecen variables que fueron modificadas y medidas. Salvo las variables que se estipulan, el resto de los factores que inciden en la pieza resultante se mantuvieron constantes de forma de darle validez a la pruebas y ensayos realizados. Gran parte de esas variables tienen que ver con el software.

Las características del software son muy importantes en la performance final de la impresión 3D, tanto las del software que controla la impresora (firmware), como el software que procesa el modelo 3D para ser impreso. A los efectos de realizar ensayos y poder controlar las distintas variables en juego, se decidió mantener a lo largo de todos los ensayos la misma versión de software, tanto el de la máquina como el de procesamiento del modelo.

En el caso de la máquina, se utilizó la versión final del firmware (al 9/2014) provisto por la empresa Makerbot, fabricante de la máquina que se utilizará en las pruebas.



Makerbot Replicator (Makerbot inc.)



MakerWare V.2.3.3.42 (Captura de Pantalla)

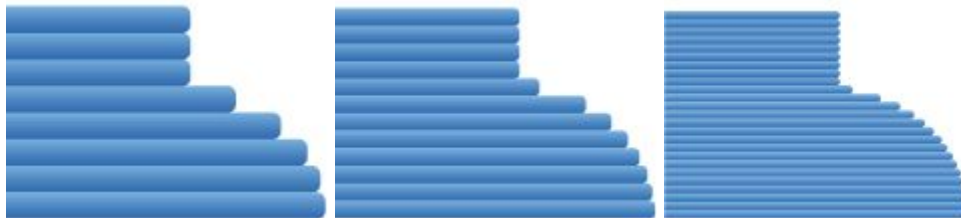
MakerWare es el software propietario que Makerbot propone para controlar sus máquinas y realizar el proceso de “fileteado”(slicer) de las piezas. Es un software que permite importar modelos en 3D, realizar alguna edición muy básica (rotar, escalar, mover) y seleccionar algunas características básicas de la impresión. Las características que permiten modificar el programa, serán las que se tomarán como variables para los distintos tests y ensayos.

A continuación se listan los ensayos realizados dentro de la investigación.

NOTA: Todas las imágenes y diagramas -salvo aclaración- son contenido original realizado en el transcurso de esta investigación.

1. Resolución Z

La resolución del eje Z es generalmente la resolución publicitada al momento de comparar o vender impresoras 3D. En el caso de la impresión por extrusión, el valor de resolución de eje Z es el único que puede ser variado vía software (desde el momento que el diámetro del extrusor es constante) y su limitante está dada 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 (característica de la máquina) y por las características físicas del material a extruir.



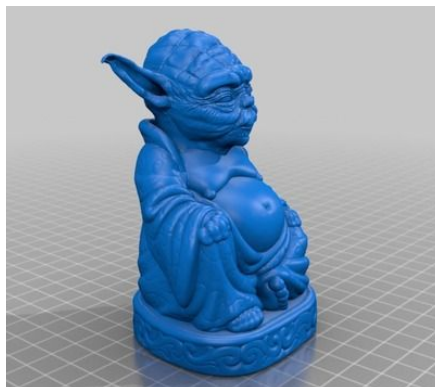
Ejemplo de misma geometría en resoluciones de 3x, 2x y 1x

Para comparar las distintas resoluciones de la máquina y cómo afectan a la pieza final, se toma un objeto con complejidad variada en su geometría y se lo imprime usando cada vez, una de las resoluciones posibles según la máquina. De esa comparación surgen datos de calidad superficial, tiempos de impresión y gasto de material. Es el tipo de ensayo más común para comparación de resoluciones.

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

1.1 Ensayos

Modelo



Pop Buddha

Autor: [tamraz](#)

Repositorio Thingiverse

<http://www.thingiverse.com/thing:1092181>

Ensayos con PLA 1.75mm Makerbot.
Prueba con resoluciones.

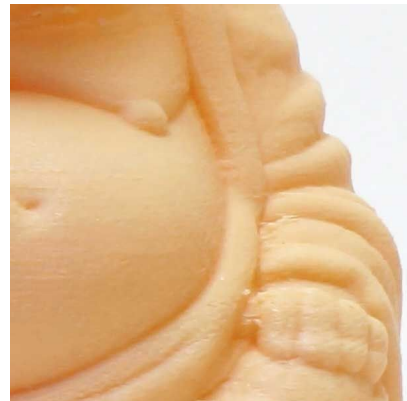
Variables y constantes para este ensayo

Modelo	Resolución	Material	Temp.	Cama	Infill	Shells	Raft	Support	Top	Bottom	Orient	Peso	Tiempo
Buddha	0.3mms	PLA	160°	60°	10%	2	no	no	2	2	90°	43grs	2:33
Buddha	0.2mms	PLA	160°	60°	10%	2	no	no	2	2	90°	43grs	3:47
Buddha	0.1mms	PLA	160°	60°	10%	2	no	no	2	2	90°	44grs	7:27



Modelos impresos durante los ensayos

Detalles de los modelos impresos



Resolución Z = 0,3mms
Tiempo Imp. = 2:33

Resolución Z = 0,2mms
Tiempo Imp. = 3:47

Resolución Z = 0,1mms
Tiempo Imp. = 7:27

Peso = 43grs.

Peso = 43grs.

Peso = 44grs.

1.2 Conclusiones

De los ensayos podemos concluir que la variación en la resolución Z afecta directamente el detalle y calidad de la terminación superficial de la pieza. A mayor resolución Z, mayor detalle y menos textura superficial derivada del proceso de impresión.

A medida que aumentamos la resolución Z (el valor numérico disminuye) se comprueba como la cantidad de material utilizado se mantiene casi constante (cada capa deposita menos cantidad de material a medida que la resolución Z aumenta) pero por otro lado, la cantidad de tiempo requerido para la impresión aumenta significativamente.

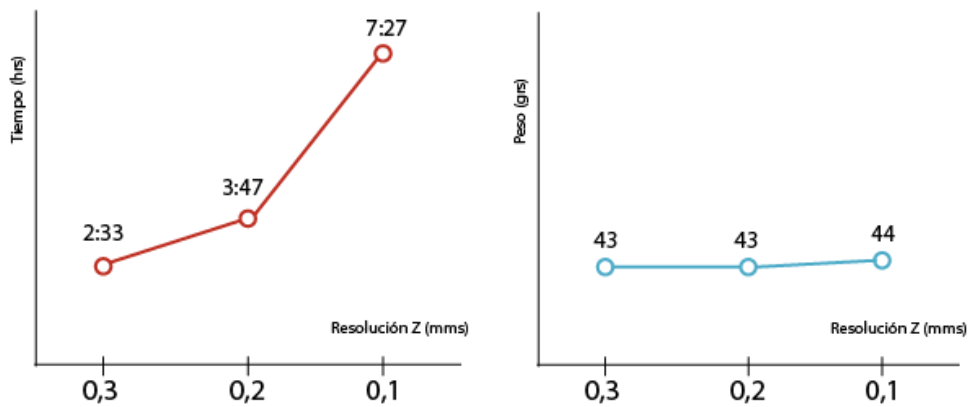


Gráfico mostrando la forma en que varía la cantidad de material utilizado y el tiempo de impresión a medida que cambiamos la resolución Z sobre un mismo objeto.

2. Resolución XY

La resolución de impresión XY está limitada, por sus características, por la dimensión del diámetro del extrusor o “nozzle”. Esto deriva en que las posibilidades de resolución de la pieza impresa está directamente relacionada con una característica físicas de la máquina.

Este ensayo busca evidenciar cómo es resuelta la impresión de paredes y detalles verticales (afectados por la resolución XY) cuando estos están comprendidos dentro de la lógica de dimensiones iguales a un factor de la dimensión del extrusor (ej. en un extrusor de 0,4; Paredes de 0,4 - 0,8 - 1,2...) y cuando no.

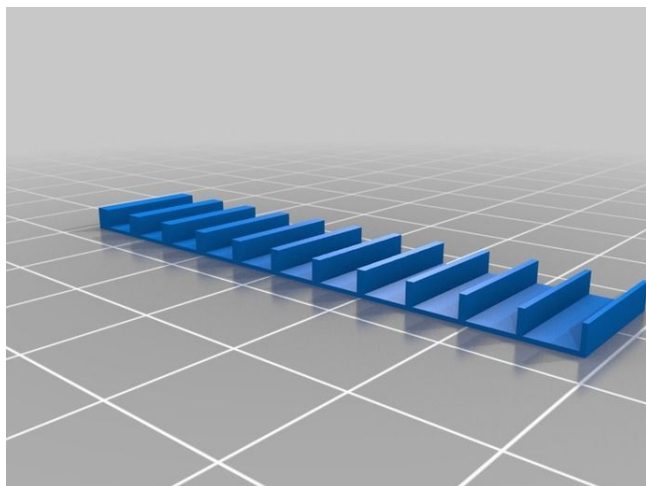


Uno de los modelos de piezas utilizados en los ensayos. Se pueden observar diferencias en cómo los distintos espesores son resueltos.

Para llevar adelante este ensayo se trabajó con modelos ya preparados con paredes de distintos espesores, de forma de en la misma pieza evidenciar las diferencias arrojadas.

Fueron impresos cambiando la escala en pasos de 10%, de forma de ir comprobando cómo un mismo diseño, con el cambio de escala, puede perder o ganar resolución al verse sus detalles comprendidos o no dentro de ese factor de dimensión del extrusor.

Modelo utilizado para pruebas



Wall Thickness Calibration Strip
by berserker scientist, published Sep 11, 2012

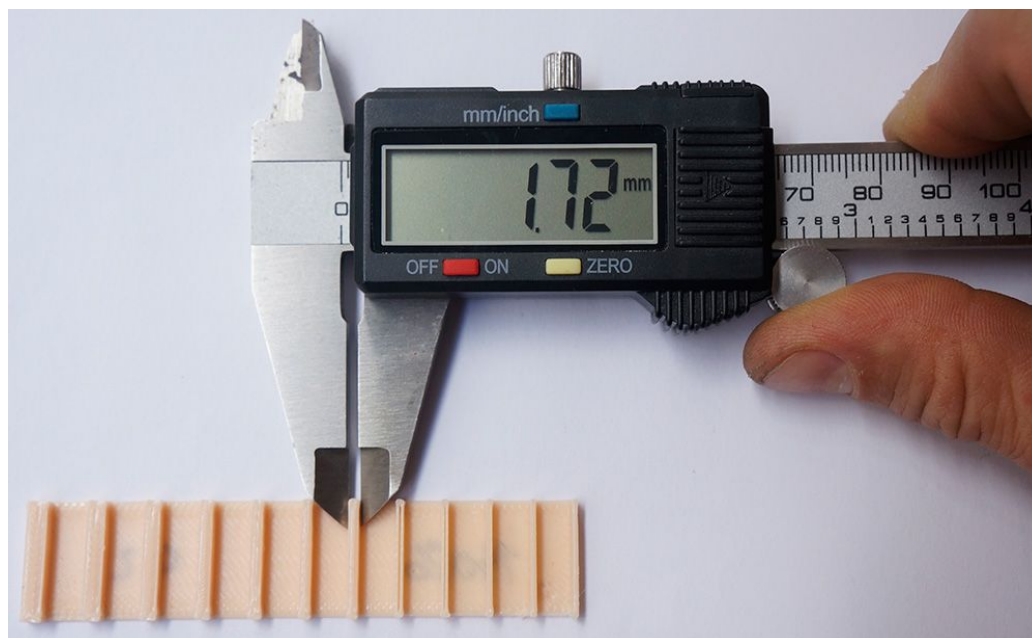
Plataforma Thingiverse
<http://www.thingiverse.com/thing:30249>

9 de Junio
Test con ABS Natural 1.75mm Makerbot,
Makerweare y frente abierto.
Prueba con resoluciones Standard y Fine.
Tiempo: 5mins

2.1 Ensayos

El ensayo realizado para evaluar este punto se planificó de la siguiente forma; un mismo modelo que contiene espesores de pared conocidos y verificable de forma visual y através de medidas, es impreso proporcionalmente en distintas dimensiones.

A través de la medición de los espesores de paredes resultantes vs los esperados y a través de la comprobación visual, se concluye cuánto afecta la dimensión de la geometría cuando ésta está fuera del rango de múltiplos del extrusor.



Modelos impresos durante los ensayos

Las dimensiones de las paredes de este modelo al 100% son; 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 y 2.0 mms.

Se imprimen entonces 4 copias iguales del modelo escalado en los siguientes porcentajes; 80%, 90%, 100%, 110%, 120%, 130% y 140%. Se realizan 4 copias de cada modelos de forma de promediar los valores de las 4 de forma de minimizar errores de medición.

Cant.	Modelo	Resol. z	Mat	Temp.	Cama	Infill	Shells	Raft	Support	Top	Bottom	Orient	Escala
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	70%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	80%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	90%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	100%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	110%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	120%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	130%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	140%
2	Wall	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	150%

Cuadro de datos de los ensayos con modelos Wall Thickness Calibration Strip en distintas dimensiones escaladas.

Los datos completos de los ensayos se encuentran en los anexos.

2.2 Conclusiones



Detalle de modelos impresos durante los ensayos. Se pueden observar paredes con “almas” huecas.

Luego de correr la batería de ensayos y tomar las medidas correspondientes se puede comprobar cómo los distintos espesores de pared, son resueltos por el software y posteriormente por la máquina de forma distinta.

El software de procesamiento resuelve las paredes los valores inferiores con la medida mínima posible, que es igual al diámetro del extrusor. Y las medidas superiores son resueltas con múltiplos de éste, lo que genera saltos en los espesores que no respetan los valores del modelos original. Las paredes con valores múltiplos del diámetro del extrusor no tuvieron problemas, mientras que las paredes que presentan medidas fuera del rango 1x, 2x, 3x, etc. presentan soluciones diversas, incluso paredes con un “alma” hueca.

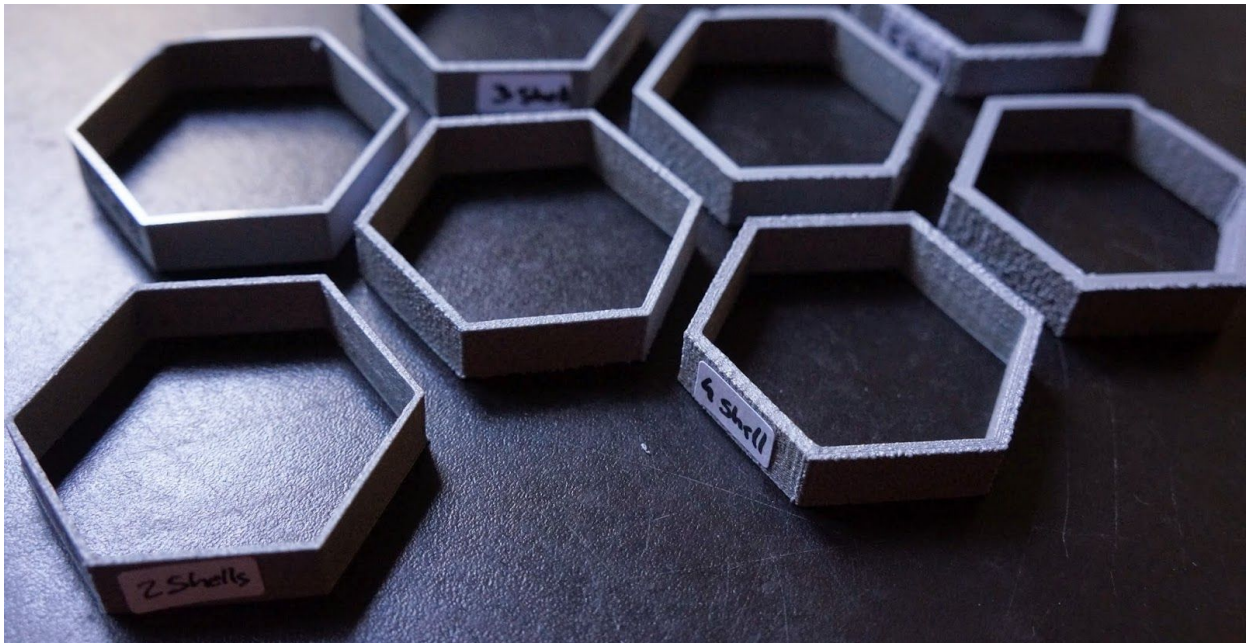
El software resuelve primero las paredes y caras exteriores y si el “alma” o núcleo de la pared tiene una dimensión inferior al diámetro del extrusor entonces el alma es dejada de lado y la pared queda conformada por 2 o 4 paredes (según el espesor de la pared) y un alma vacía en el centro.

En el caso de los modelos escalados, se observa cómo paredes que en su dimensión original se imprimen correctamente, una vez escaladas pueden caer en ese rango de medidas donde se pueden generar almas vacías dentro de las paredes.

Todas las paredes cercanas a los valores de 1mm y 2mms se imprimieron con un alma hueca.

3. Cáscaras (shells)

El concepto de cáscara o Shell, es un concepto que deriva directamente de una característica mecánica de la impresión 3D por extrusión, y es que la resolución XY mínima de extrusión está definida por el diámetro del extrusor. Esta característica fue incorporada por los desarrolladores de software de forma que el exterior de la pieza está definido (en cada capa) por una extrusión de tamaño igual al diámetro del extrusor (cáscara). Esa extrusión define el límite entre la superficie de la pieza y el interior (relleno) que será tratado por el software de forma distinta a la cáscara. La pieza puede tener cuantas cáscaras de deseen, siempre tomando en cuenta que estas crecen hacia adentro y su dimensión está dada como múltiplos del diámetro del extrusor.



Modelos impresos durante los ensayos

El objetivo de este ensayo es evaluar cómo afectan los parámetros de número de cáscaras o shells elegidos a la pieza a imprimir. Los resultados permiten estimar mejores prácticas al momento de obtener piezas en alguna de estas claves; Peso, Tiempo de fabricación y Resistencia a la compresión.

3.1 Ensayos

Se realizaron ensayos utilizando como modelo un una figura básica impresa sin capas superior ni inferior, sin relleno y sin soportes. Se realizaron 3 copias de cada variación en la cantidad de cáscaras o shells de forma de tener un dato promedio de las piezas.



Cada impresión fué sometida a la aplicación de 3 fuerzas de tracción (910 grs, 1.350 grs. y 5.040 grs.) de forma de comprobar de forma visual la deformación de la pieza.

Modelo	Res. Z	Mat	Temp.	Cama	Infill	Shells	Raft	Support	Top	Bottom	Deformación
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	1	no	no	0	0	Muy alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	2	no	no	0	0	Alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	3	no	no	0	0	Media
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	Nula
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	Nula

Resultados promedio de los ensayos con distintas cantidades de Shells y distintas fuerzas.

3.2 Conclusiones

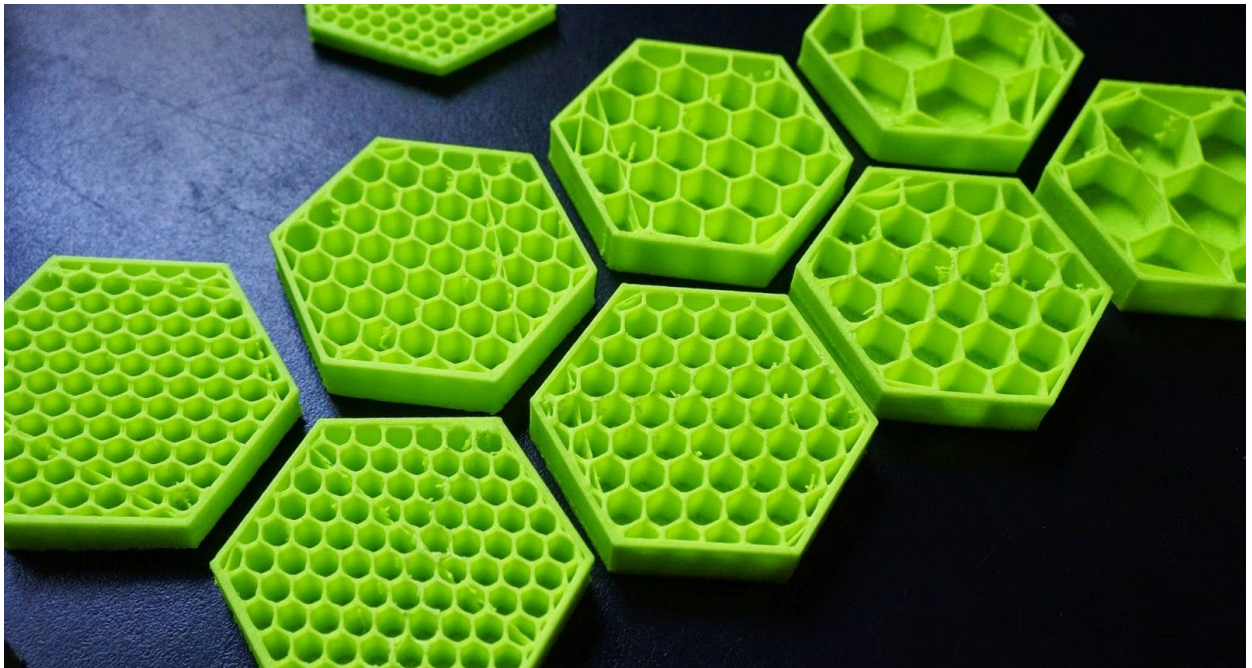
La utilización de los shells permite definir para un mismo modelo paredes de distintas consistencias, el espesor de esas paredes depende directamente del diámetro del extrusor.

Habitualmente, para paredes de consistencia flexible (en el caso de polímeros) basta con configurar una impresión con 1 shell de espesor, si se desea una pared semiflexible 2 shells y 3 o más shells en el caso de querer paredes rígidas. En todos los casos estamos hablando de geometrías impresas con 0% de Infill, de lo contrario el grado de flexión de las paredes no puede valorarse.

4. Ensayos con rellenos (infill)

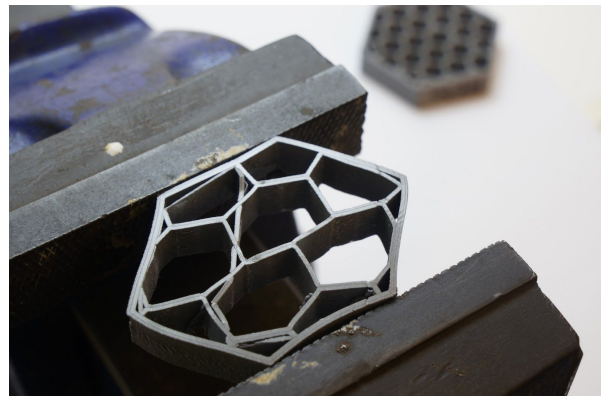
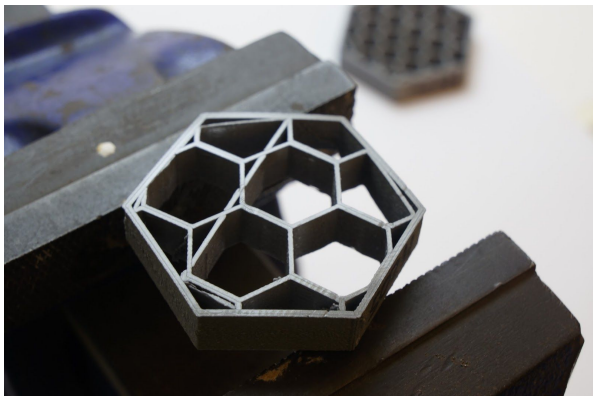
Los “rellenos” o “infill” de las piezas impresas en 3D son estructuras generadas por el software a partir de la última cáscara interna y hacia el interior de la misma.

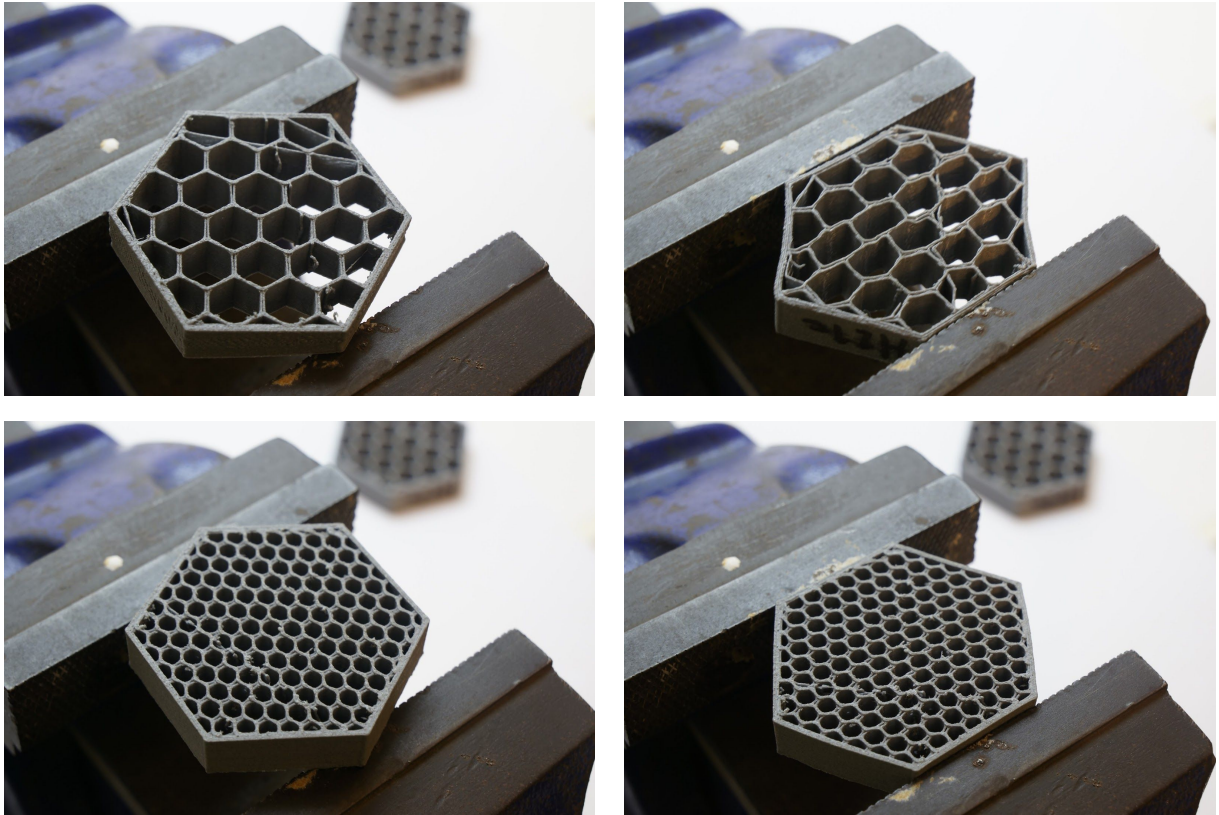
Existen distintos patrones que pueden ser seteados distintos porcentajes de relleno, siendo 0% una pieza sin relleno y 100% una pieza maciza. Valores entre 0% y 100% generarán estructuras homogéneas dentro de la pieza completando el porcentaje indicado.



Serie de piezas impresas con distintos porcentajes de relleno o infill prontas para su posterior ensayo.

4.1 Ensayos





Se definen ensayos donde partiendo de un objeto tridimensional de forma única, se imprimen versiones del mismo con distintos grados de relleno. Se realizaron 3 copias de cada variación de infill en porcentajes correspondientes a; 10%, 20%, 30%, 40%, 60% y 80% forma de tener un dato promedio de las piezas. Todas las piezas se imprimieron con una cantidad de cáscaras o shells constante.

Modelo	Res. Z	Mat	Temp.	Cama	Infill	Shells	Raft	Support	Top	Bottom	Deformación
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	10%	2	no	no	0	0	Muy alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	20%	2	no	no	0	0	Muy alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	30%	2	no	no	0	0	Alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	40%	2	no	no	0	0	Baja
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	60%	2	no	no	0	0	Nula
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	80%	2	no	no	0	0	Nula

Resultados promedio de los ensayos con distintas cantidades de infill y la aplicación fuerzas.

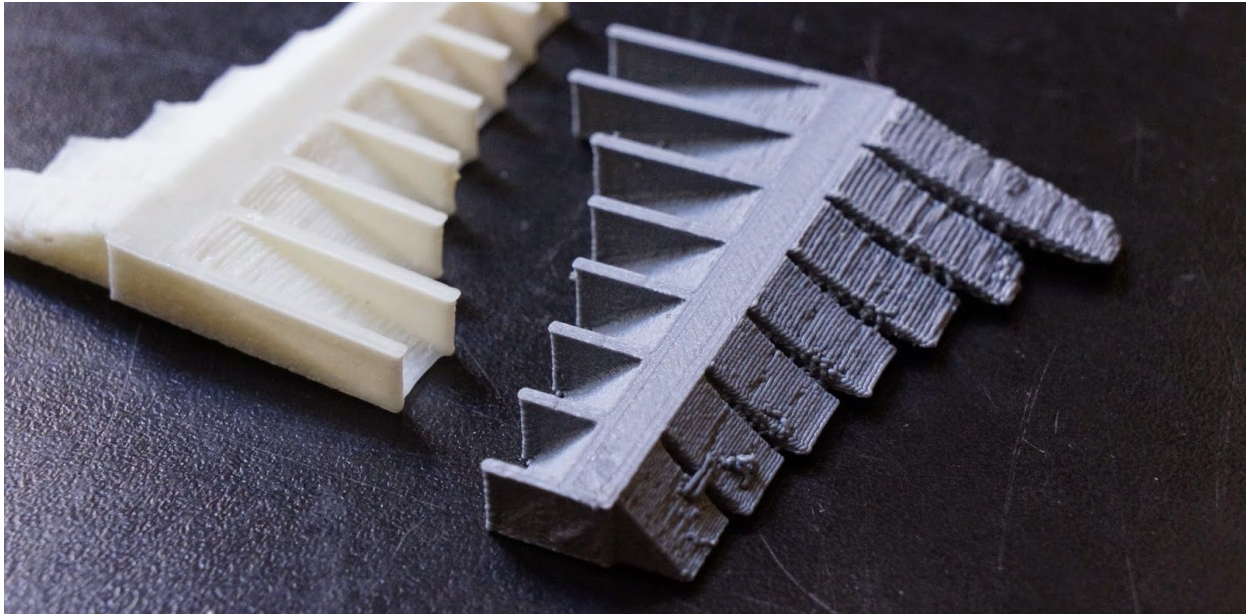
4.2 Conclusiones

La estructura interna que brinda el relleno o infill otorga consistencia y estructura a las piezas impresas en 3D. Porcentajes de entre 5% y 15% brindan una estructura mínima a la pieza, suficiente para mantener en posición los límites de la superficie exterior. Rellenos de entre 20% a 40% son suficientes para resistir compresiones leves, agregando peso y tiempo de fabricación.

5. Ángulos de inclinación

Fruto de la característica 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 contiene determinadas inclinaciones con respecto al plano XY.

En este ensayo se toma un modelo conteniendo distintos planos inclinados con variaciones y se evalúan los resultados de cada plano inclinado, de forma de determinar los ángulos o rangos con mejor calidad superficial al momento de utilizar esta técnica.

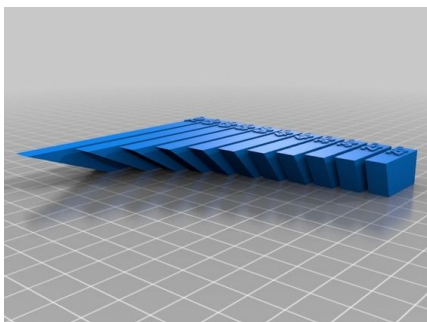


Vista de uno de los modelos usados para los ensayos, donde se testean distintos ángulos en la misma pieza

5.1 Ensayos

El objetivo de estos ensayos es evaluar cómo varía la calidad del plano impreso según el ángulo con respecto al plano XY. Se verificará como las variables de ángulo, resolución y escala afectan a los distintos planos.

Modelos utilizados en los ensayos



Massive Overhang Test

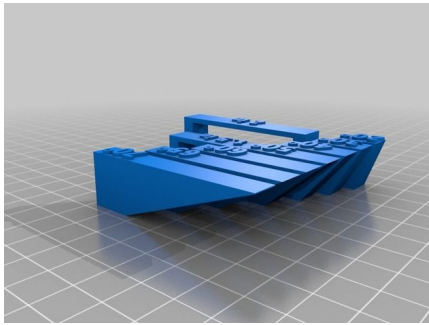
Autor: [thingster](#)

Repositorio Thingiverse

<http://www.thingiverse.com/thing:40382>

Ensayos con PLA 1.75mm Makerbot.

Prueba de ángulos



Overhang and Bridge Test

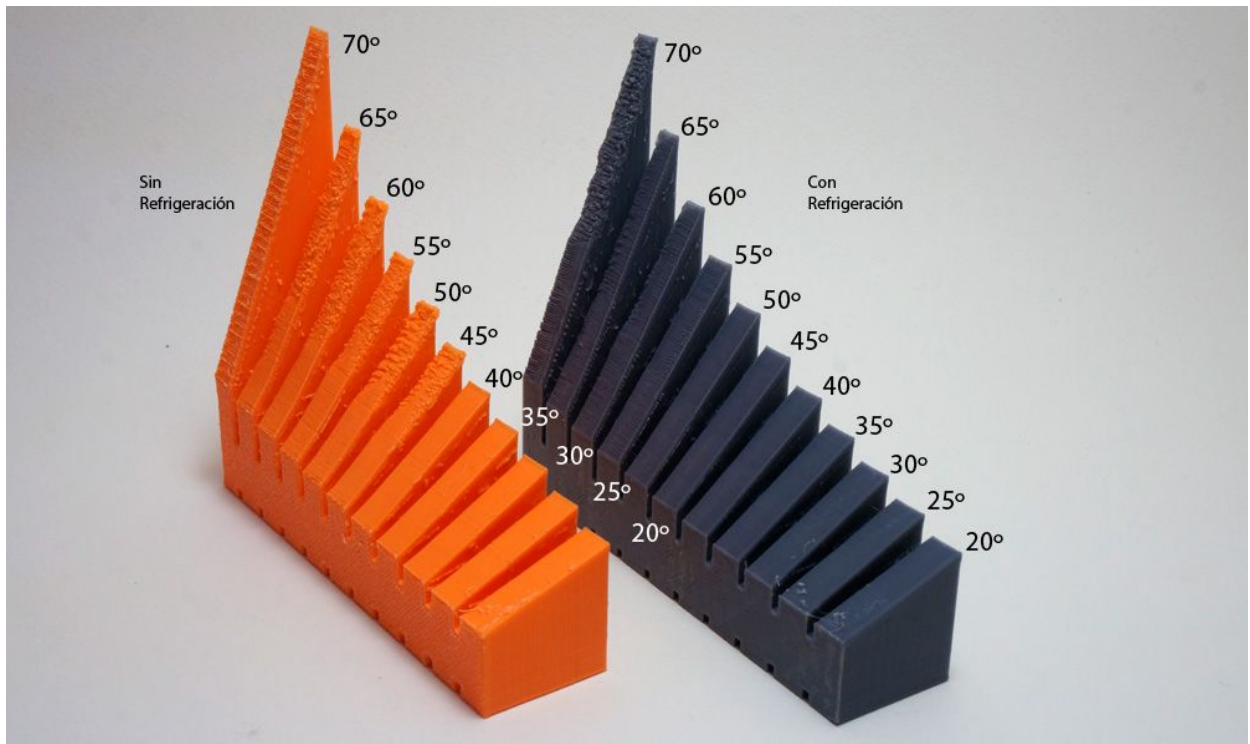
Autor: [MakerBotLearning](https://www.thingiverse.com/ MakerBotLearning)

Repositorio Thingiverse

<http://www.thingiverse.com/thing:858835>

Ensayos con PLA 1.75mm Makerbot.

Prueba de ángulos



Modelos impresos durante los ensayos. Algunos de los modelos impresos en los ensayos con sus ángulos de inclinación con respecto al eje Z. Se puede apreciar la calidad de los planos según los ángulos de inclinación y si estaban o no refrigerados al momento de la impresión.

Se realizaron ensayos con los distintos modelos y en distintas condiciones, por ejemplo de refrigeración de la pieza al momento de la impresión.

Se encontraron ángulos “límite” distintos según las condiciones de impresión, pero con variaciones pequeñas.

5.2 Conclusiones

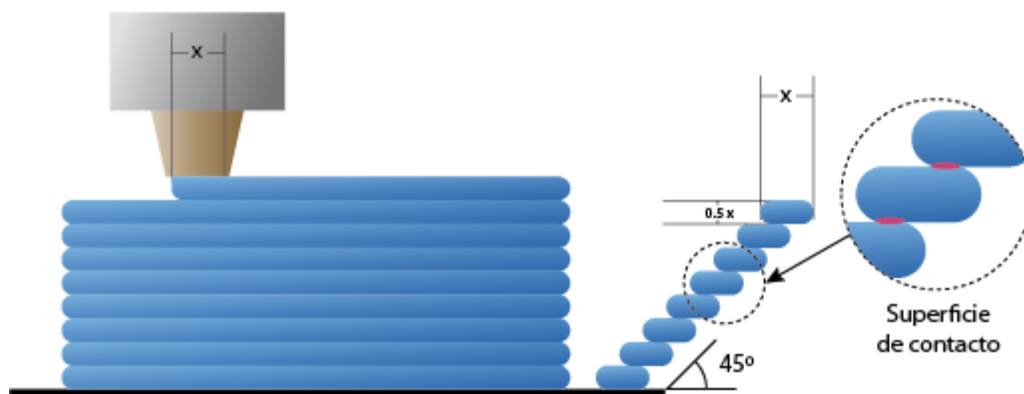
Problemas causados por ángulos menores a 45° (con respecto al plano XY)



Modelos impresos durante los ensayos

En el detalle de arriba se puede apreciar cómo a medida que disminuye el ángulo (de derecha a izquierda, con respecto al plano XY) las paredes del plano inclinado comienzan a tener dificultades para poder crearse.

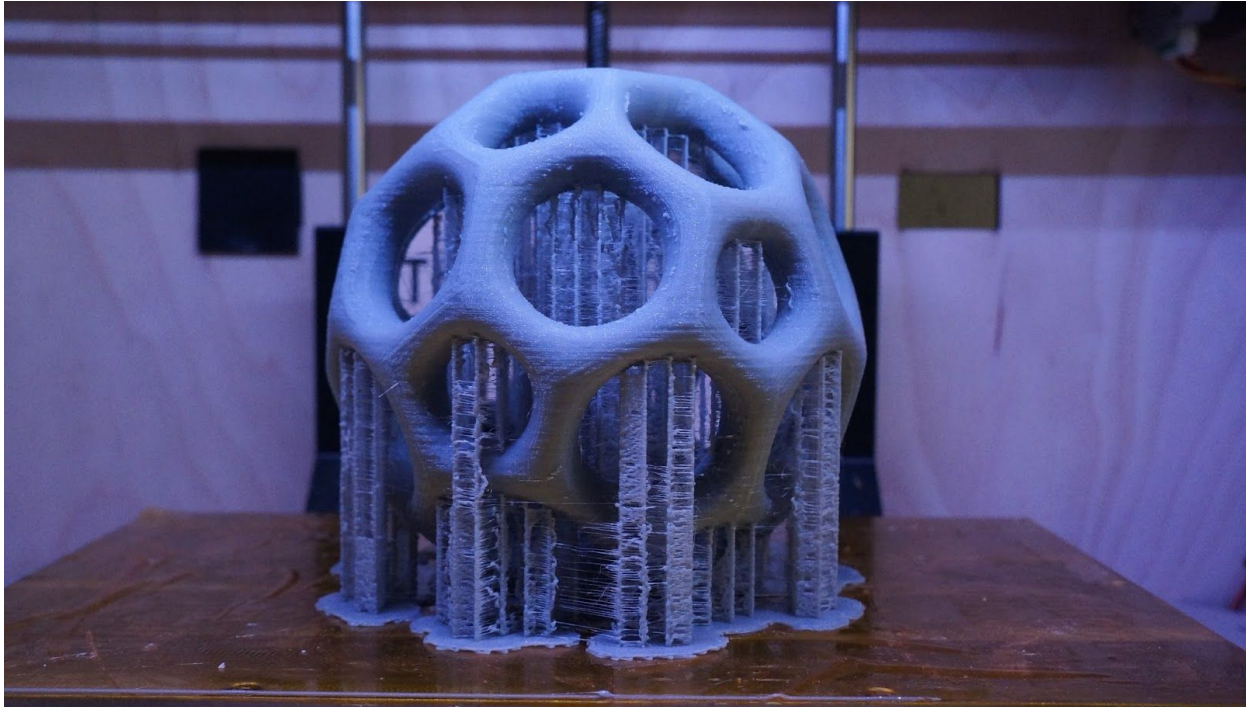
Para geometrías con ángulos menores a 45° es necesaria la generación de soportes o volúmenes auxiliares que realicen la función de soporte de las capas superiores que serán depositadas. Esto sucede por la forma en que cada deposición de material se adhiere a la capa anterior, como muestra el siguiente esquema.



Superficie de contacto entre capas con un desplazamiento de 45°

Dada la forma en que la impresión por deposición construye cada capa -una sobre otra- y dada la forma en que el material es extrudado 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 y mediante ensayos se verifica que éste debe mantenerse por encima de los 45° (con respecto al plano de impresión XY) este ángulo puede disminuir en condiciones donde 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.

6. Camas de adhesión y Soportes de Apoyo



Modelos impresos durante los ensayos

La impresión 3D es un proceso que se desarrolla capa sobre capa de abajo hacia arriba, es por esta característica, que piezas que presentan volúmenes volados precisan de estructuras auxiliares para poder ser impresos. Son necesarios soportes que permitan generar superficie de apoyo a esas zonas voladas, para que una vez que el extrusor deba comenzar a depositar material en esas zonas, encuentre una superficie que reciba el material.

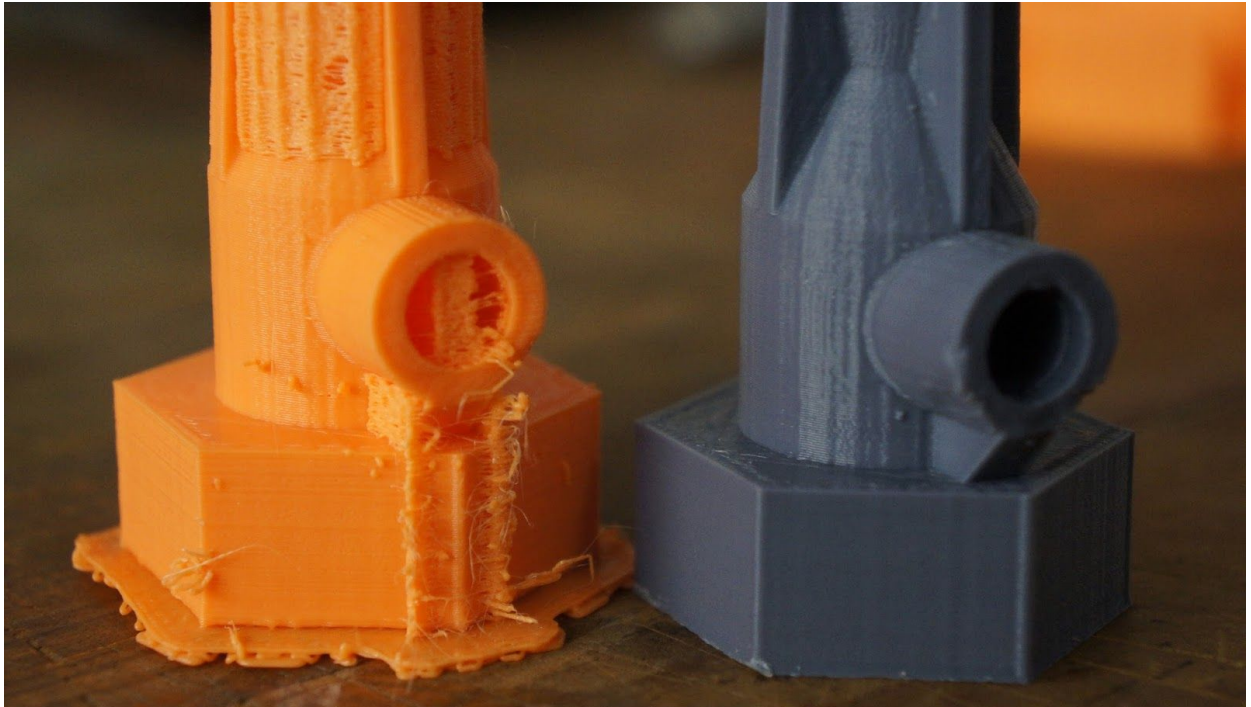
Cada software de procesamiento de objetos, tiene la posibilidad de generar su propio sistema de soportes automáticos, que pueden ser habilitados o no. En la mayoría de los casos donde la geometría no fué pensada específicamente para evitar esta situación, si existen zonas voladas y los soportes automáticos son deshabilitados, el extrusor se encontrará en algún momento extrudando material en el aire, dando como resultado impresiones con zonas defectuosas.

6.1 Ensayos

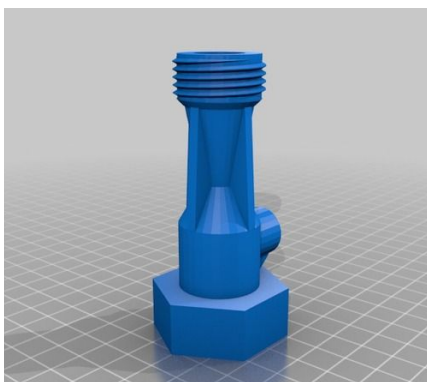
Este ensayo busca, mediante la utilización de varias geometrías con volúmenes volados, ensayar distintos tipos de soportes y comparar sus ventajas y desventajas. Se probarán soportes mediante software.

El objetivo final, es establecer la conveniencia o no de aplicación de determinados tipos de soportes según el tipo de geometría presentada.

Modelo A:



Modelos impresos durante los ensayos



Garden hose venturi pump

Autor: [jag](#)

Repositorio Thingiverse

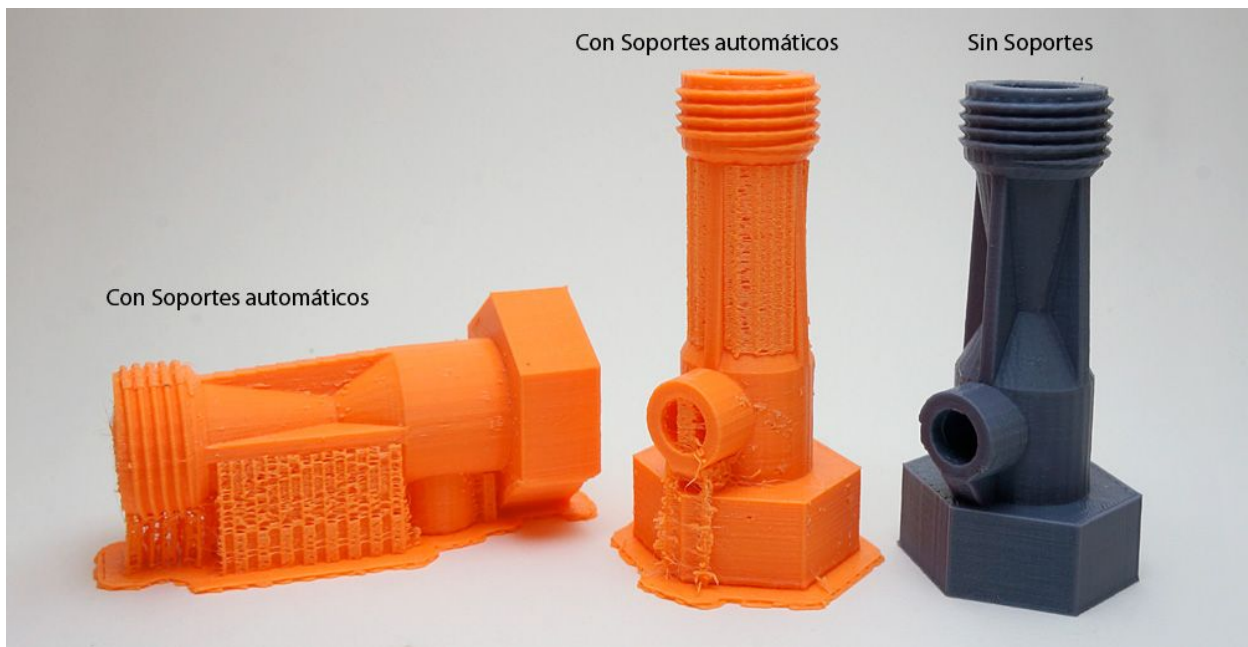
<http://www.thingiverse.com/thing:29100>

Ensayos con PLA 1.75mm Makerbot.

Prueba con soportes.

Este modelo se seleccionó por estar diseñado especialmente para ser impreso sin necesidad de soportes en una configuración básicamente vertical.

El desafío consiste en verificar las diferencias de una impresión con soportes automáticos vía software y la impresión sin soportes “por diseño”.



Modelos impresos durante los ensayos

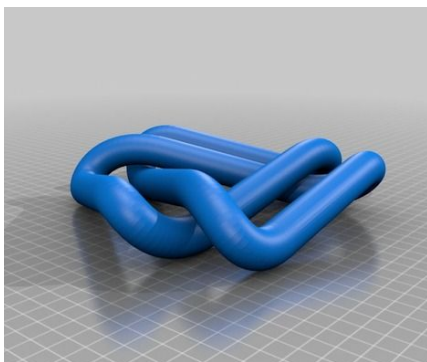
Se imprimió el modelo en su configuración original, con y sin soportes y en una configuración distinta, cambiando la orientación.

Se puede ver cómo una pieza preparada para ser impresa sin soportes obtiene una calidad superficial excelente directamente desde la impresión, sin pasar por postprocesado.

Ensayo



Modelos impresos durante los ensayos



Escher's Knots

Autor: [kenji1206](https://www.thingiverse.com/kenji1206)

Repositorio Thingiverse

<http://www.thingiverse.com/thing:153400>

Ensayos con PLA 1.75mm Makerbot.

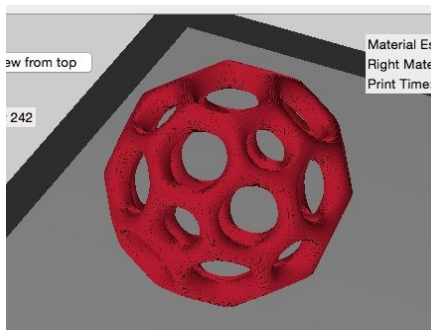
Prueba con soportes.

Este modelo tiene una configuración netamente horizontal, con ángulos de inclinación con respecto al plano XY muy bajos. Es una pieza donde se hace necesaria la utilización de soportes.

Ensayo



Modelos impresos durante los ensayos



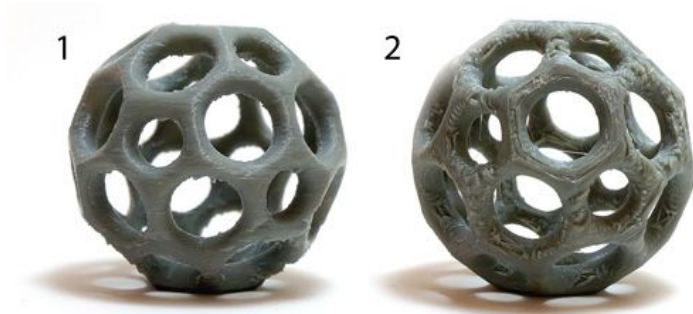
Organic Ball Autor: Desconocido

Ensayos con PLA 1.75mm Makerbot.
Prueba con soportes.

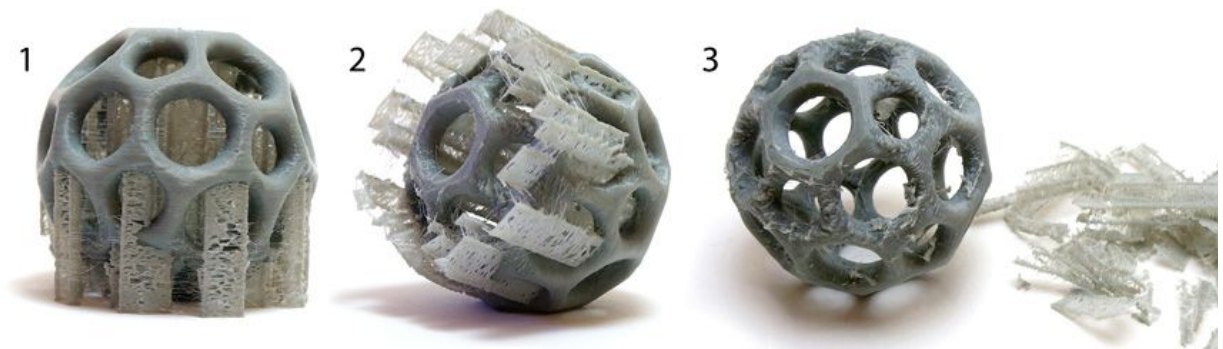
Este modelo se seleccionó por sus características de estructura cerrada con aberturas, de muy difícil fabricación por otros métodos productivos. Presenta planos volados interiores y exteriores, así como caras en distintos ángulos.

Se realizaron impresiones; sin soportes, con soportes automáticos, con soportes vía Meshmixer e impresiones de la pieza dividida en partes, como forma de testear 4 estrategias de impresión de la misma pieza.

Modelo	Resol. z	Mat	Temp.	Cama	Infill	Shells	Raft	Support	Top	Bottom	Peso	Tiempo
Organic Ball	0.2	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	9	0:53
Organic Ball	0.2	PLA	160°	60°	25%	2	no	si	2	2	13	1:12
Organic Ball	0.2	PLA	160°	60°	25%	2	no	si	2	2	11	1:05
Organic Ball	0.2	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	10	0:56



Modelo Organic_Ball impreso sin soportes. En la foto 2 se puede observar como las zonas voladas de la pieza se imprimen con defectos.



Modelo Organic_Ball impreso con soportes automáticos (Makerbot). En la foto 2 se visualiza los soportes que sirven de apoyo a las zonas voladas de la pieza. En la foto 3 se observa cómo queda la pieza una vez removidos los soportes.

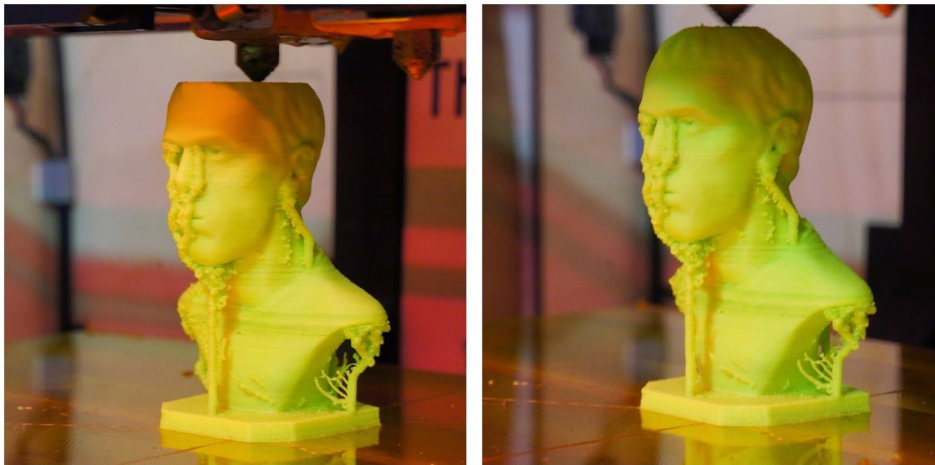


Modelo Organic_Ball impreso con soportes generados con MeshMixer (Autodesk). En la foto 2 se visualiza los soportes que sirven de apoyo a las zonas voladas de la pieza. En la foto 3 se observa cómo queda la pieza una vez removidos los soportes.



Modelo Organic_Ball dividido en 2 partes e impreso sin soportes. Ambas piezas se apoyan directamente sobre la cama de impresión. En la foto 3 se muestra cómo queda a pieza una vez unida mediante una unión química (adhesivo).

Modelo D:



Imágenes de los ensayos realizados con soportes adaptativos, mediante meshmixer.

Lugano

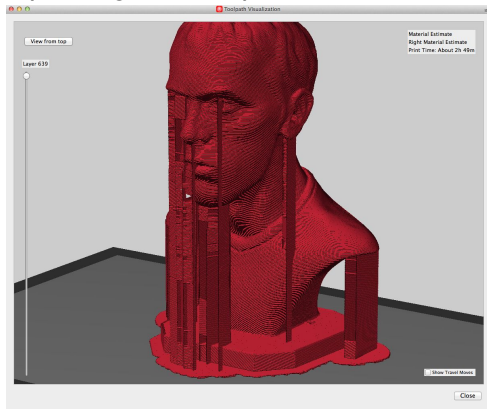
Autor: RenderBoy3D

Ensayos con PLA 1.75mm Makerbot.

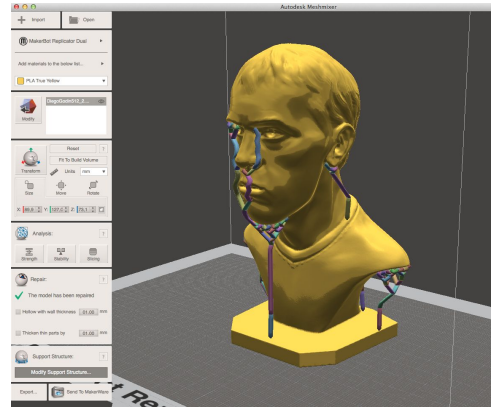
Prueba con soportes.

Soluciones de soportes generados por software

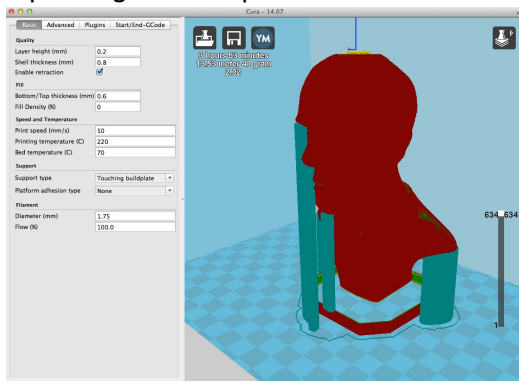
Soportes generados por Makerbot



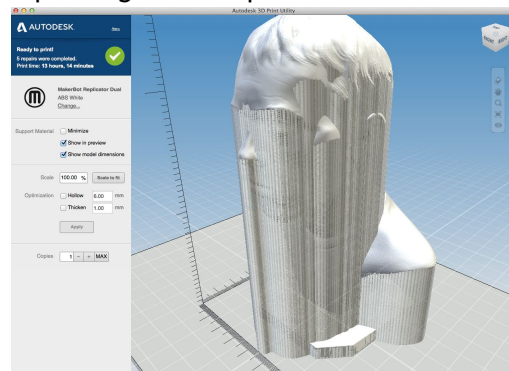
Soportes generados por Meshmixer



Soportes generados por Cuda

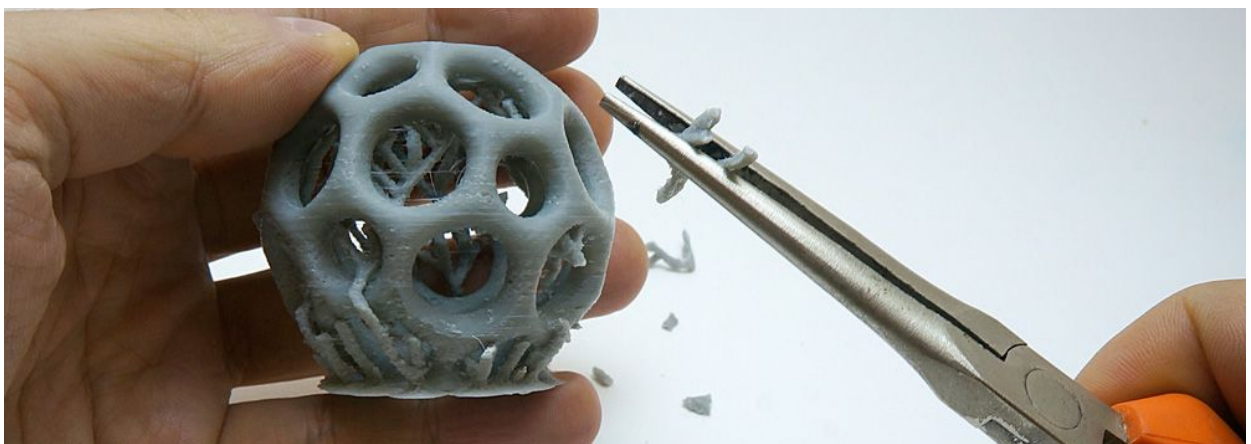


Soportes generados por Autodesk Print Utility



Capturas del procesado de modelo impres durante los ensayos. Se pueden observar las distintas soluciones de soportes según el software utilizado para procesamiento del modelo.

6.2 Conclusiones

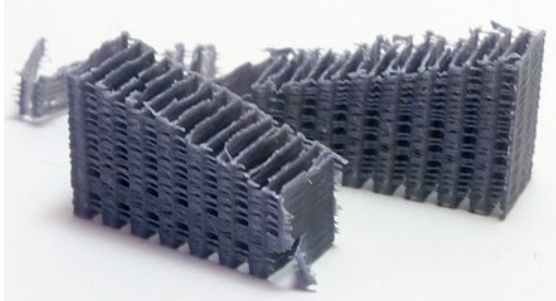


Modelos impres durante los ensayos. Retiro de soportes tipo “orgánico” como los generados por el programa Meshmixer.

Existen diversas técnicas para dar soporte a geometrías menores de 45° , entre las que encontramos; soportes automáticos generados por los distintos software de procesamiento de modelos y geometrías personalizadas realizadas por el propio creador del modelo.

Ambas estrategias buscan generar soportes “fusibles” que permitan el depósito de material durante la impresión y que luego deben ser fácilmente retiradas del modelo final.

Los soportes de tipo “orgánicos” como los generados por el programa Meshmixer (Autodesk) consumen menos material, son más fáciles de retirar y dejan menos marcas. Es igualmente una solución altamente vinculada con la impresión en plástico, para otros materiales extruibles puede no ser tan eficiente.



Los soportes “masivos” o de pilares, que son los generados por los principales software de procesado son más difíciles de retirar y dejan más marcas sobre la superficie de la pieza. A su vez son los más versátiles al momento de pensar en trabajar con otros materiales de impresión.

Otra forma de resolver el problema de las geometrías voladas, es la separación del modelo en distintas piezas con el fin de ser impresas de forma separada evitando el efecto “volado”. Este método implica la realización de un proceso de unión mecánica o química posterior de las piezas impresas.

7. Orientación de pieza (Resistencia mecánica)



Modelos impresos durante los ensayos

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

Los objetos impresos por extrusión de material son conformados capa por capa de abajo hacia arriba, lo que les confiere una terminación “a rayas” característica. Esas líneas exponen a todo espectador la orientación que tenía la pieza en el momento que fué impresa y además el sentido en que la pieza es más resistente. En el caso de las impresiones en plástico, la consistencia del material una vez es fundido en el extrusor es constante y genera una unidad a lo largo de la extrusión, pero no pasa lo mismo con la extrusión que se deposita sobre otra, que ya tiene varios segundos siendo enfriada y expuesta a temperatura ambiente. Es así que en el sentido de la impresión podemos hablar de continuidad de material, y en el sentido 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, 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 consiste 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 realizan pruebas de flexión, de forma de estimar qué ángulos o sentidos de extrusión resisten de mejor forma las distintas fuerzas aplicadas.

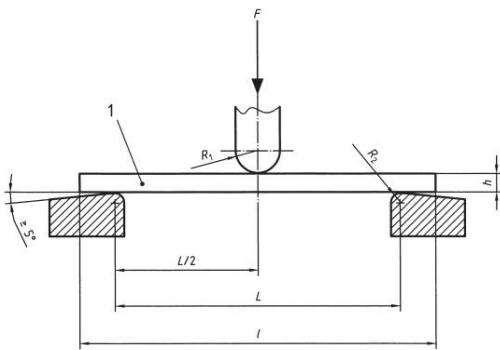
El objetivo final, es establecer los ángulos más convenientes para impresión de piezas que deben resistir algún tipo de esfuerzo en su estructura.

7.1 Ensayos realizados



Modelos impresos durante los ensayos. Conjunto de probetas fabricadas con distintos ángulos de impresión y densidades para ensayos según norma ISO 178.

Para los ensayos relacionados con orientación de la pieza se trabajó junto al **Prof. Ing. Pablo Raimonda** del Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Junto a Raimonda se evaluaron las normas internacionales relacionadas al tipo de ensayo requerido, se establecieron los parámetros más convenientes para el ensayo, el tipo de probeta y las variables y variaciones a medir.

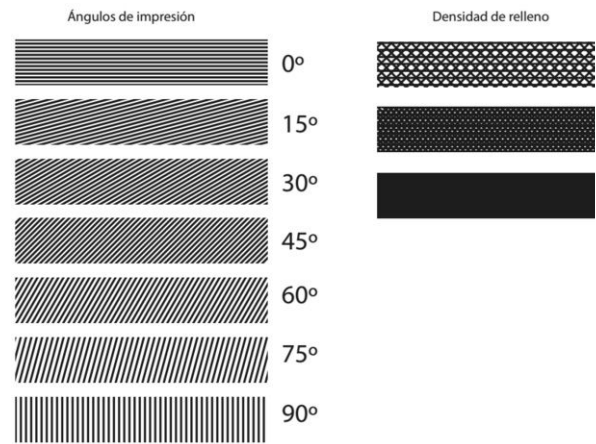


A la izquierda diagrama de ensayo de norma ISO 178, a la derecha máquina de ensayos en FING.

Se definió realizar los ensayos 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 usarán con la impresora.

El tamaño de la probeta de ensayos según la norma debe ser de 80x10x4 mms de dimensión y se deben contemplar un mínimo de 5 probetas de idénticas características por cada variable a medir.

A fin de mantener la cantidad de piezas a ensayar dentro de cantidades viables de ser realizadas 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%. Para cubrir todas las combinaciones de variables con un mínimo de 5 piezas idénticas como exige la norma.



Variables y constantes para este ensayo



Modelos impresos durante los ensayos

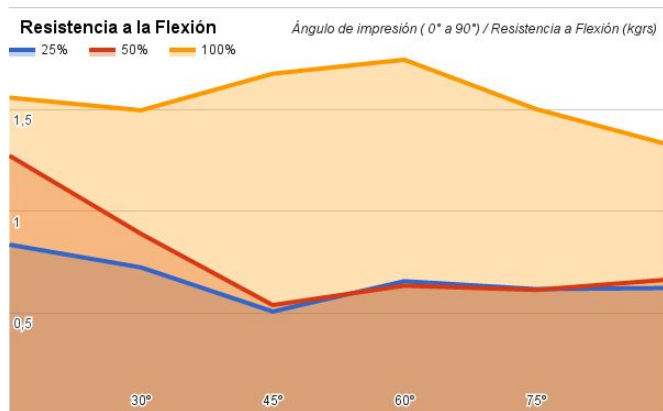
Cant.	Modelo	Resol. z	Mat	Temp.	Cama	Infill	Shells	Raft	Support	Top	Bottom	Orient	Resistencia
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	0,8345
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	15°	Descartado
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	30°	0,7225
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	45°	0,506
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	60°	0,6548
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	75°	0,616
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	90°	0,6215
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	1,2718
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	15°	0,8925
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	30°	0,8875
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	45°	0,5375
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	60°	0,633
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	75°	0,612

5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	90°	0,6625
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	0°	1,5572
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	15°	1,5874
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	30°	1,495
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	45°	1,6747
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	60°	1,7435
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	75°	1,5012
5	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	90°	1,3278

Cuadro de datos (Resumen) de los ensayos con probetas realizados para medir la resistencia mecánica a la torsión. Resistencia está representado en Kgs/mm2.

Los datos completos de los ensayos se encuentran en los anexos de este informe.

7.2 Conclusiones



Cómo se puede apreciar en la gráfica, la resistencia a la presión está directamente relacionada con el porcentaje de relleno (o infill) de la pieza, así las probetas con densidad 25% resisten menos que las probetas con densidad 50% y éstas, 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 sólo se mantiene para distintos ángulos de acción en las piezas con 100% de relleno.

En el caso de las probetas con rellenos parciales (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.

Podemos concluir que para piezas que requieren soportar esfuerzos conviene que estas sean impresas perpendiculares al sentido del esfuerzo al que van a ser sometidas y en escenarios de menor control, 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, sólo en su configuración de densidad del 100% se mantienen dentro del rango típico de resistencia en PLA inyectado (entre 1310 a 16100 psi). En los ensayos las piezas con densidad 100% promediaron los 1.5kgs/mm2 que equivale a 2133 psi. Con densidades de 25% y 50% y ángulos superiores a los 45° el promedio fué de 0,7 kgs/mm2 que equivale a 853psi, poco más del 50% de la resistencia mínima a la flexión para materiales como el PLA (ver tabla de características del PLA en anexos).

8. Orientación de pieza (Estética)

La orientación de la pieza al momento de ser impresa afecta la forma en que las distintas geometrías son resueltas, utilizando las variables de resolución XY y Z.

La intención de este ensayo es verificar cómo la orientación de la pieza afecta la resolución de la forma en la práctica.

8.1 Ensayos

Para este ensayo utiliza un modelo único, impreso en 3 ángulos distintos con respecto al plano XY



Fig. X - Modelo impreso en 3 ángulos de inclinación distintos. De izquierda a derecha 60°, 30°, 0°.

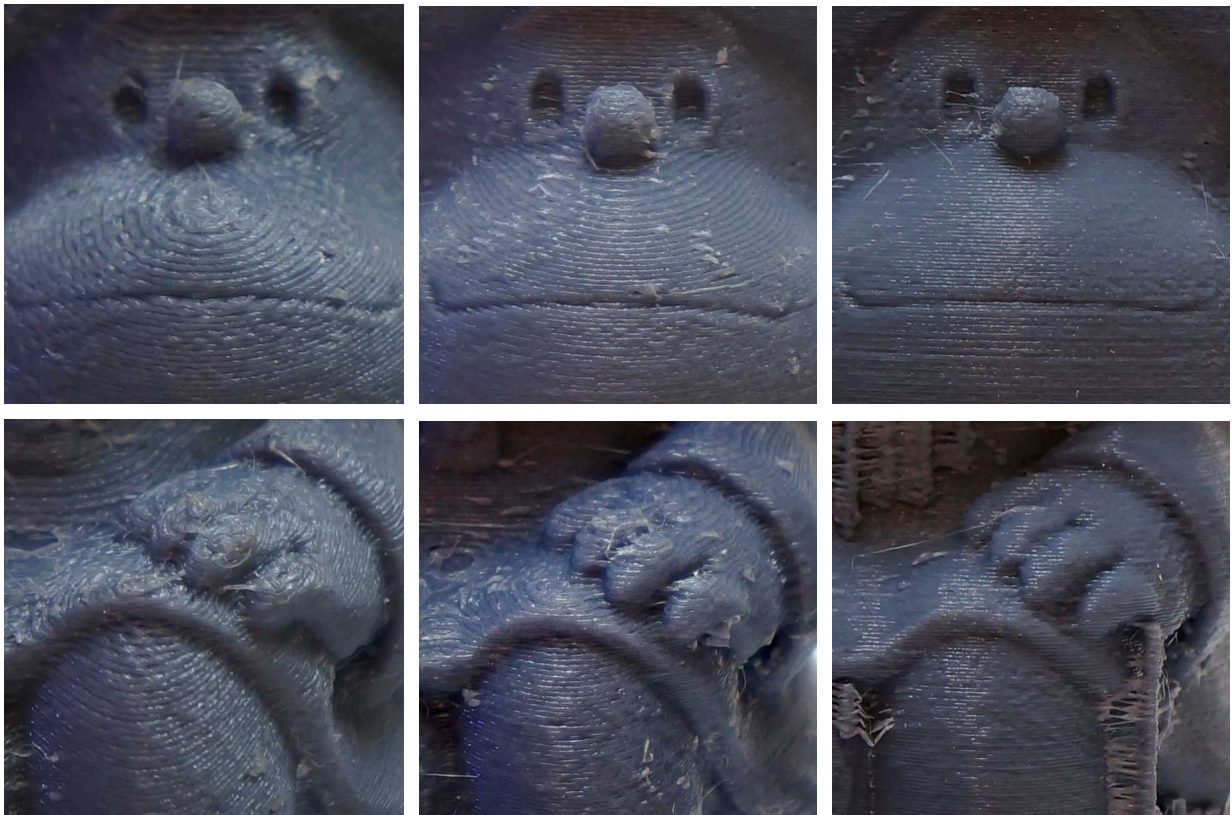
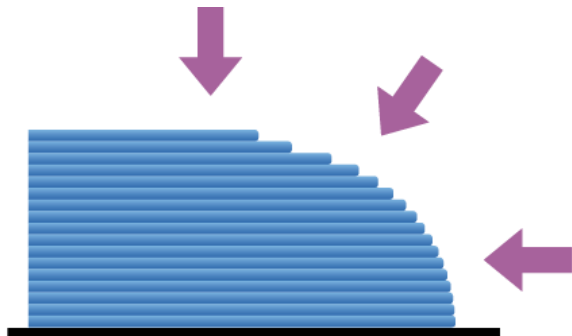


Fig. X - Detalles de modelo de ensayos según ángulo de inclinación. De izquierda a derecha 60°, 30°, 0°.

8.2 Conclusiones

Derivado de los ensayos se puede concluir que la forma en que es depositado el material, al momento de ir generando la forma solicitada presenta limitaciones en la resolución de detalles en la medida que la superficie se acerca a plano XY.

Se puede observar en los ensayos, como los mismos detalles y geometrías del modelo pierden resolución si estas son impresas en uno u otro ángulo de inclinación con respecto al XY.



Esto se puede entender en el siguiente diagrama

Al tener una dimensión (XY) limitada en su resolución, la terminación superficial variará según la geometría y el ángulo desde donde es observada.

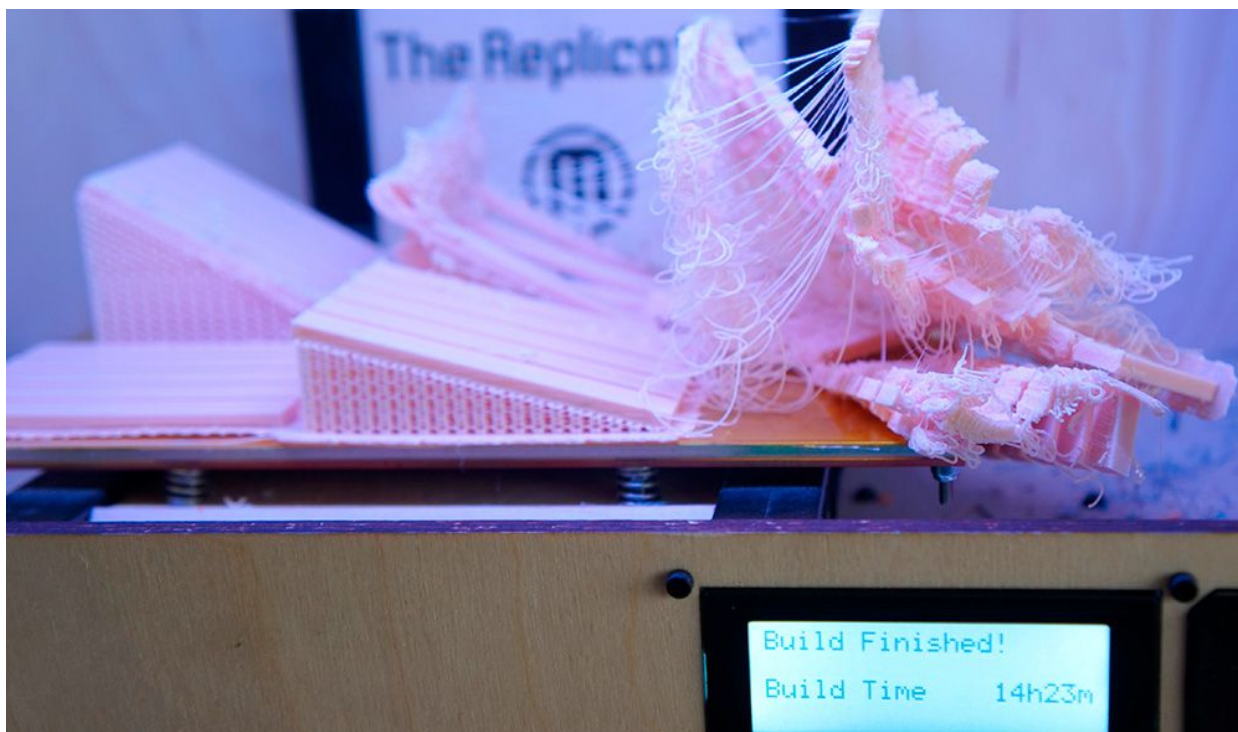
En parte, el efecto de “poca resolución” de los ángulos cercanos al plano XY se puede atenuar aumentando la resolución Z de toda la impresión, como se puede apreciar en las pruebas de resolución Z.



Detalle de la misma zona de 3 impresiones de un mismo modelo con diferentes resoluciones Z.

Esta solución acarrea las consecuencias explicadas antes, cómo el aumento importante en el tiempo de fabricación de cada pieza.

Dificultades encontradas



Imágen de una de las múltiples impresiones que no llegaron a resultar exitosas.

Extensos tiempos de ejecución de impresiones

En la mayoría de los casos los tiempos de impresión superan largamente las 3 ó 4 horas, volviendo complicado encontrar el momento en el día que conjugar disponibilidad horaria y un horario de acceso al espacio donde se encuentra la impresora. Este contratiempo no había sido tenido en cuenta y repercutió gran parte del desarrollo del proyecto.

Condiciones ambientales de Uruguay

El lugar físico donde se encuentra la impresora 3D utilizada para realizar los ensayos, ubicado en los talleres de la EUCD, es en los meses de otoño-invierno bastante frío, húmedo y carece de calefacción. Este factor no contemplado, prolonga el tiempo de preparación de la impresora (tiempo en que tanto el extrusor como la superficie caliente aumentan su temperatura) en hasta 70-80 minutos. Generando ventanas de uso muy inferiores a las previstas.

Al mismo tiempo, la temperatura y humedad (supera el 80% la mayoría de los días) del local, genera fallas y problemas de impresión en la mayoría de los casos, debido al contraste entre la temperatura de la pieza mientras es impresa y la temperatura ambiente del local. Esta condicionante no estaba prevista en una primera instancia y fué un factor determinante en la producción de piezas válidas en este período de tiempo.

Tan importante es este factor que debió realizarse una modificación en la máquina (un revestimiento térmico) de forma de facilitar la impresión en estas condiciones tan presentes en el Uruguay.

Conclusiones generales

Las características de la fabricación por extrusión de material, son poco difundidas o conocidas en los distintos ámbitos de enseñanza y empresas privadas. Son más conocidos sus problemas o errores más habituales, pero no siempre se conoce qué es lo que los causa y cómo actuar desde el diseño para evitarlos o minimizarlos.

Esta investigación pretendió, desde su génesis, arrojar un poco de luz, sobre las distintas variables que se ponen juego y brindar herramientas para la explotación del enorme potencial que tiene esta técnica de fabricación.

Desde el planteamiento del proyecto hasta la culminación del mismo ha pasado mucho más tiempo del previsto inicialmente. Varios factores, principalmente imprevistos personales, hicieron que la investigación se realizara de forma fraccionada, mezclando meses de actividad, con largos períodos de inactividad. No obstante, el tiempo ha permitido reflexionar y profundizar los conocimientos sobre la técnica, además de evidenciar, que hoy día, persisten empresas privadas que brindan servicios de impresión, que desconocen el porqué en determinadas ocasiones, la impresiones “salen mal”.

Este tiempo también ha habilitado que parte de lo aprendido durante esta investigación se comenzara a volcar al aula, en la formación de futuros diseñadores a través de contenido para los cursos del “Laboratorio de Fabricación Digital” iniciado en 2015 y en varios proyectos del espacio HackLab relacionados con impresión 3D.

También estas pausas han permitido reflexionar y ajustar la investigación. Por ejemplo se decidió desestimar algunos ensayos planificados inicialmente, se valoró que no aportaban al objetivo de la investigación, que es la definición de las características de la técnica que influyen en el objeto final. Es así que ensayos sobre terminaciones superficiales o comparaciones entre impresos en ABS o PLA fueron dejados de lado para centrarse en las características que influyen más allá del material aplicado. Se decidió hacer más hincapié y más profundidad en ensayos que resultaron vitales para el cabal entendimiento del proceso.

Los datos obtenidos luego de la enorme cantidad de horas e impresiones dispuestas para ésta investigación, han posibilitado un entendimiento más cabal de la tecnología de fabricación aditiva por extrusión. Y además, personalmente, me han acercado a un entendimiento mayor de las dinámicas de investigación tecnológicas, que desconocía al momento de presentarme a este llamado de iniciación a la investigación.

En general, el resultado de esta investigación ha sido muy positivo y ha repercutido en los distintos proyectos de investigación que se vienen llevando adelante en la EUCD, relacionados con la temática de Impresión 3D. Quedan espacios abiertos para la mejora del material surgido de esta investigación y queda un insumo en donde apoyar nuevos desarrollos en el futuro.

Nuevos espacios de Investigación

De forma primaria, la delimitación de las características del método de impresión 3D por deposición en la actualidad (proceso necesario llevado a cabo en la primer etapa de esta investigación) comenzó a arrojar luz sobre posibles nuevos espacios de investigación, que escapan a los objetivos de este proyecto. Esos nuevos espacios se conciben en principio, como variaciones en las limitantes de la actual técnica, que a su vez se reconocen como posibles de ser abordados.

Superficie de impresión irregular

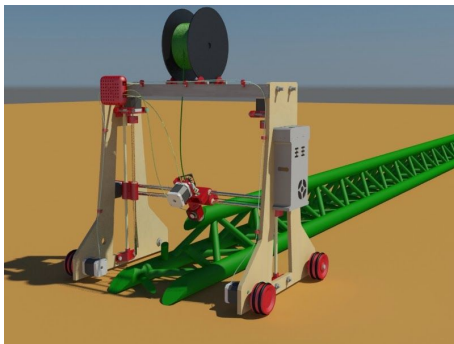
El poder realizar impresiones partiendo de una superficie irregular, permitiría entre otras cosas, poder imprimir directamente sobre otra pieza, realizar reparaciones, habilitar la posibilidad de realizar impresiones en distintas etapas y con distintos materiales.

Boquilla de extrusión no circular

Varias de las características de las piezas de impresión por extrusión derivan de que son impresas mediante una extrusión cilíndrica. Es así que surge la pregunta: Qué posibilidades se generarían si se cambia la forma en que la extrusión de material es realizada?

Extrusor NO vertical

En el sistema actual, la extrusión de material se realiza mediante un extrusor ubicado de forma perpendicular con respecto a la superficie de impresión. Esto imposibilita la extrusión de material en zonas donde el acceso al mismo no sea vertical.



Freebot

En este concepto, se plantea la posibilidad de contar con un extrusor inclinado que sumado a la posibilidad de movilidad de la impresora en si, posibilitaría la fabricación de piezas de grandes dimensiones lineales, sin requerir que esta esté contenida dentro de la propia impresora.

Fuente:

<http://diy3dprinting.blogspot.com/2014/12/freebot-mobile-3d-printer-concept-with.html>

Resolución Z Variable

La resolución Z puede ser variada mediante software, y de ella depende la velocidad de impresión, la resolución de detalles, entre otros. Actualmente es una variable que se aplica globalmente a la pieza a imprimir. Poder variar la resolución según la zona de impresión, puede acelerar la impresión en lugares que no requieren detalles por ser estructurales o no estar a la vista y mantener una impresión lenta pero detallada exclusivamente en aquellas zonas que así lo requieran.

Bibliografía

Wohlers, Terry T. Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report. Print.

3D Printing Basics: The Free Beginner's Guide

<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>

Plastics - Determination of flexural properties (ISO 178 : 2001). English version of DIN EN ISO 178

Design for 3D Printing: Scanning, Creating, Editing, Remixing, and Making in Three Dimensions

Samuel N. Bernier, Bertier Luyt, Tatiana Reinhard

Functional Design for 3D Printing 2nd edition. Clifford Smyth

Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados.

Trabajo de fin de Grado. Laura Arteaga Medina. Julio 2015

Impresión 3D: Como va a cambiar el mundo (Spanish Edition). Andrei Vazhnov

3D Printing Passes \$5.1 Billion in Latest Wohlers Report 2016

<http://3dprintingindustry.com/2016/04/06/3d-printing-passes-5-1-billion-in-latest-wohlers-report-2016>

Mechanical Testing 3D Printed Parts: Results and Recommendations

<https://engineerdog.com/2015/09/02/mechanical-testing-3d-printed-parts-results-and-recommendations/>

Printing Things: Visions and Essentials for 3D Printing. C. Warnier, D. Verbruggen/Unfold, S. Ehmman

Making It: Manufacturing Techniques for Product Design. Chris Lefteri

Anexos

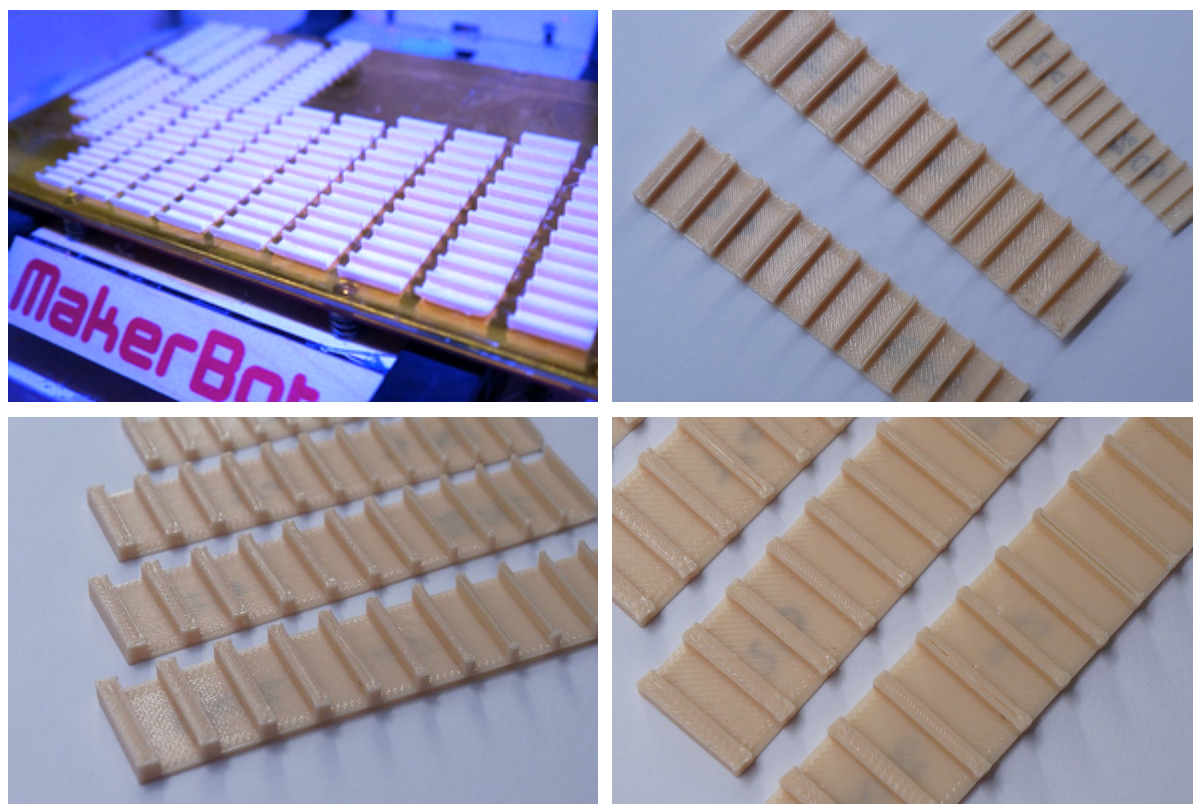
(Ensayo #1) Resolución Z



(Ensayo #2) Tabla de ensayos de resolución XY

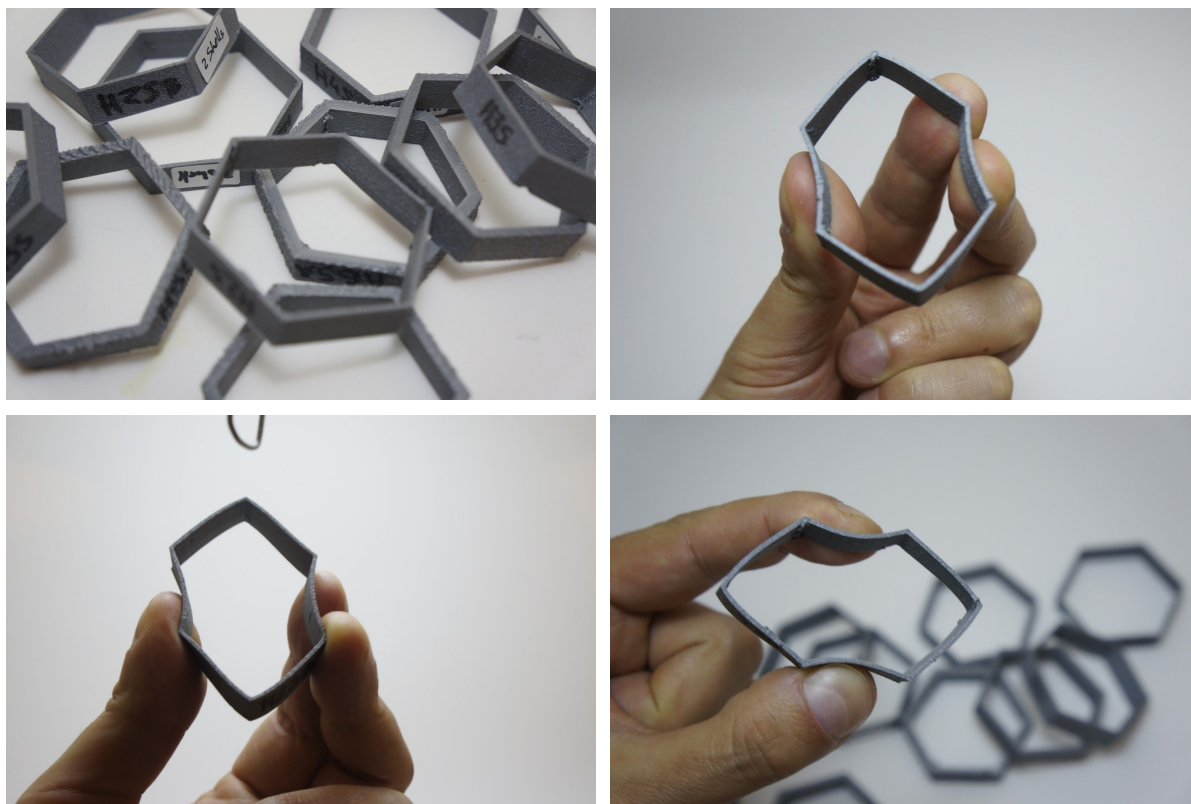
80%		90%		100%		110%		120%		130%		140%	
Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real
0,32	0,4	0,36	0,45	0,4	0,5	0,44	0,51	0,48	0,45	0,52	0,5	0,56	0,85
0,4	0,41	0,45	0,45	0,5	0,5	0,55	0,8	0,6	0,85	0,65	0,86	0,7	0,89
0,48	0,43	0,54	0,45	0,6	0,8	0,66	0,86	0,72	0,9	0,78	0,88	0,84	0,9
0,56	0,75	0,63	0,79	0,7	0,85	0,77	0,86	0,84	0,9	0,91	0,93	0,98	1,01
0,64	0,77	0,72	0,81	0,8	0,9	0,88	0,88	0,96	1	1,04	1,05	1,12	1,1
0,72	0,82	0,81	0,83	0,9	0,9	0,99	1	1,08	1,08	1,17	1,16	1,26	1,6
0,8	0,83	0,9	0,89	1	1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,6	1,4	1,66
0,96	0,93	1,08	1,05	1,2	1,2	1,32	1,6	1,44	1,6	1,56	1,67	1,68	1,75
1,12	1,1	1,26	1,57	1,4	1,6	1,54	1,7	1,68	1,72	1,82	2	1,96	2,1
1,28	1,6	1,44	1,68	1,6	1,8	1,76	1,85	1,92	2,05	2,08	2,2	2,24	2,3
1,44	1,63	1,62	1,7	1,8	1,9	1,98	2,05	2,16	2,2	2,34	2,4	2,52	2,6
1,6	1,65	1,8	1,84	2	2,1	2,2	2,4	2,4	2,45	2,6	2,68	2,8	2,8

Datos expresados en mms. Los valores resaltados corresponden a paredes con “alma” hueca. Tabla con datos de los ensayos realizados al modelo Wall Thickness Calibration Strip impreso en 7 dimensiones distintas. Cada valor de este cuadro corresponde al promedio de 4 impresiones distintas, totalizando 336 paredes XY relevadas.



Proceso de impresión y relevamiento de las distintas muestras impresas.

(Ensayo #3) Cáscaras (shells)



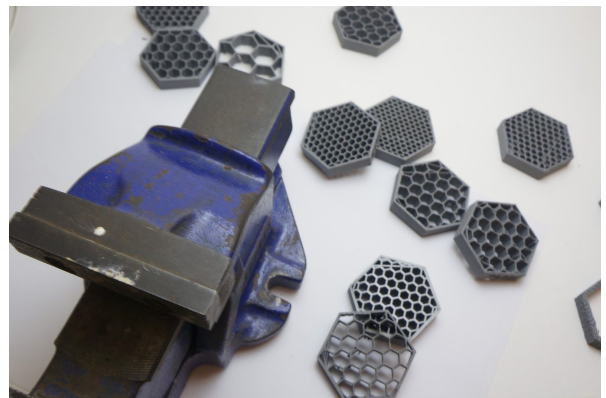
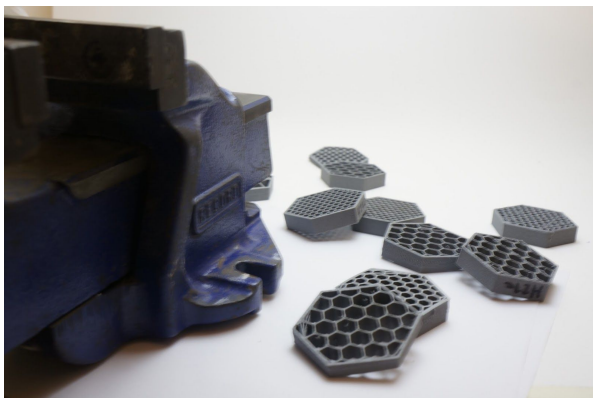
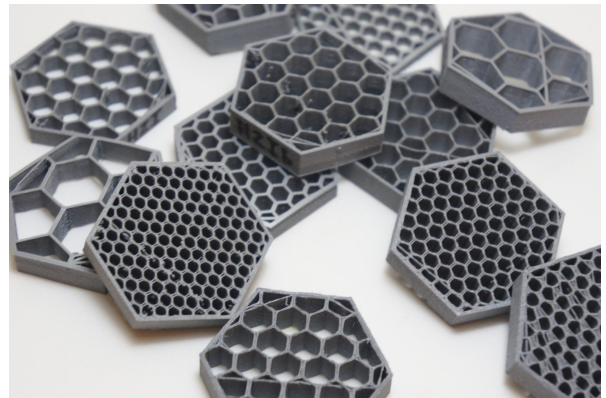
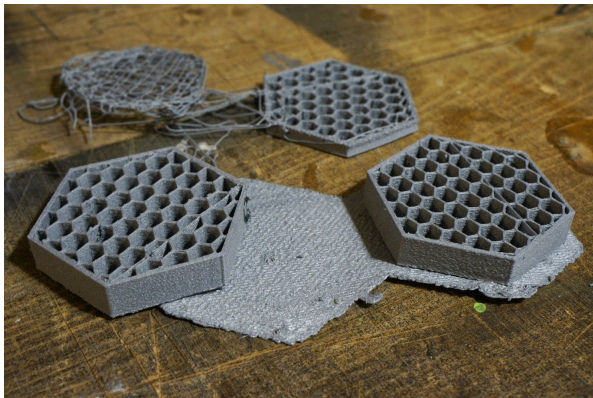
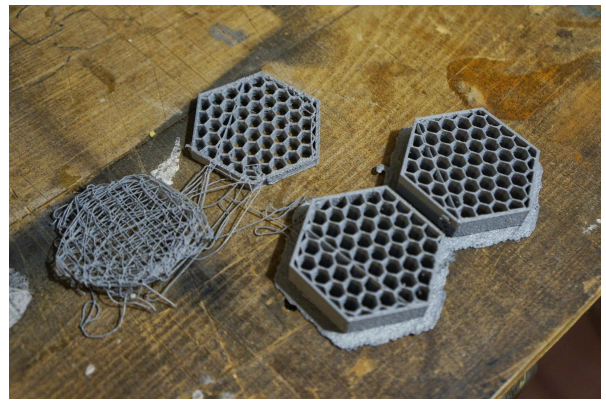
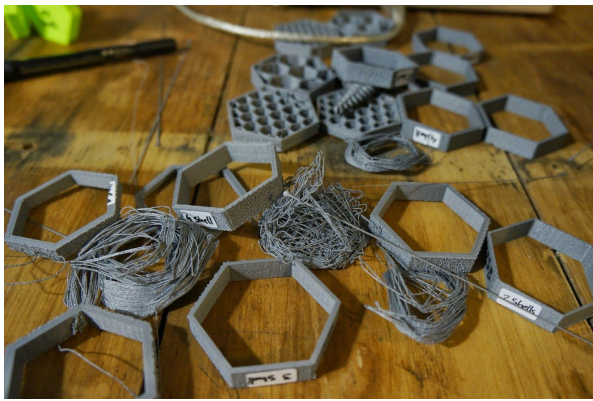
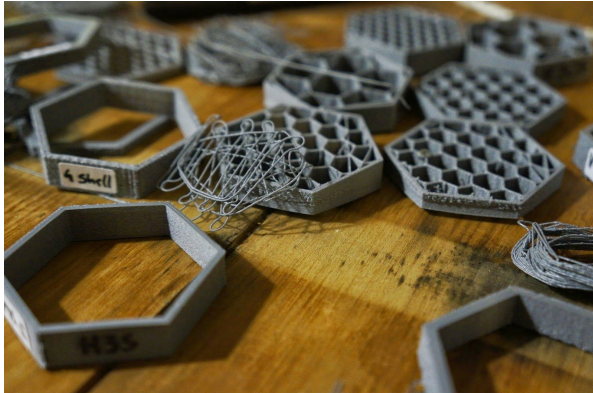
Proceso de impresión y relevamiento de las distintas muestras impresas.

Tabla con datos de los ensayos realizados al modelo Hexágono impreso en 5 variantes distintas, cada una correspondiendo a un valor de shell distinto (1, 2, 3, 4 y 5). De cada pieza se realizaron 3 copias y este cuadro corresponde al promedio de las 3 impresiones distintas. Se totalizaron **45** ensayos distintos.

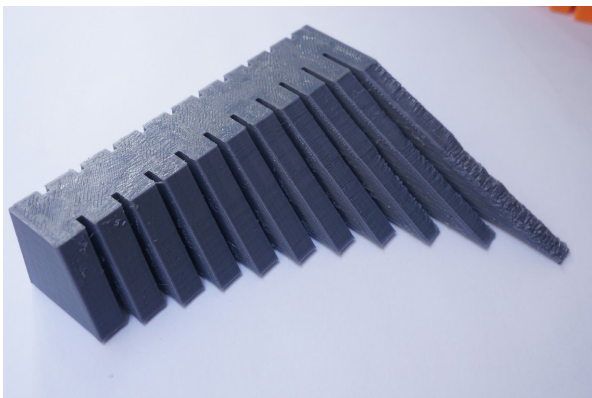
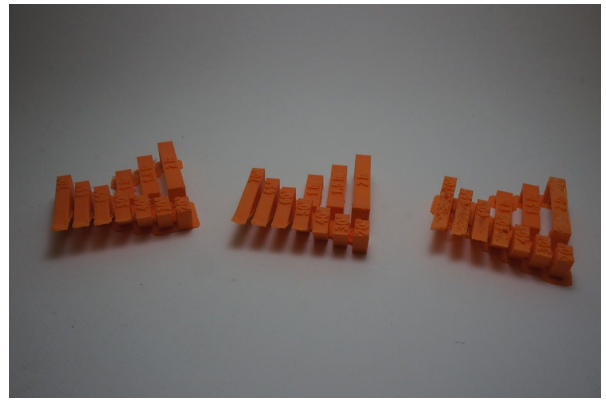
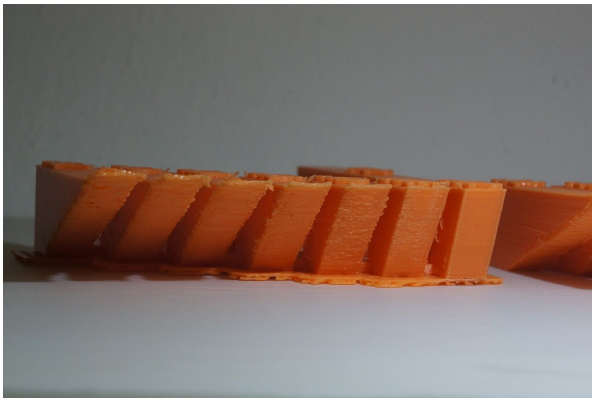
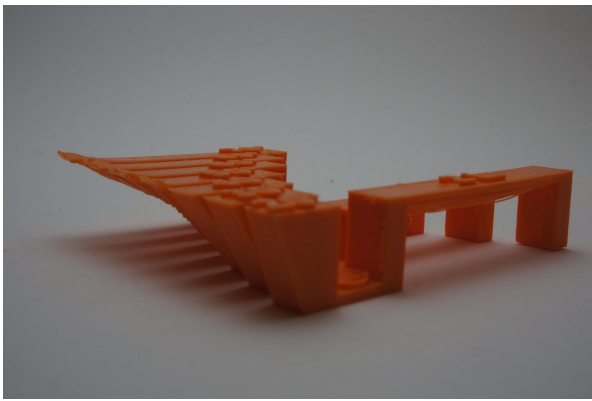
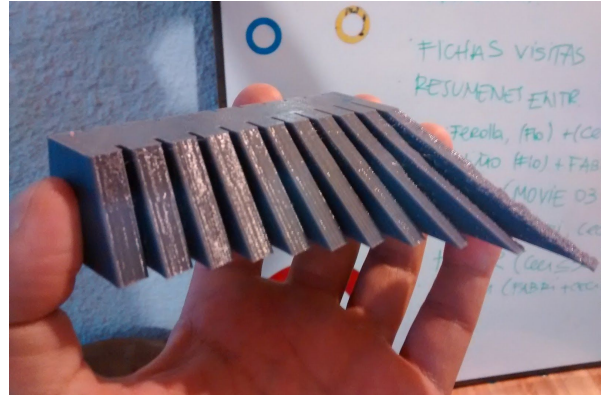
Modelo	Res. Z	Mat	Temp.	Cama	Infill	Shells	Raft	Su.	Top	Bot.	Fuerza	Deformación
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	1	no	no	0	0	910 grs.	Muy alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	2	no	no	0	0	910 grs.	Alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	3	no	no	0	0	910 grs.	Media
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	910 grs.	Nula
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	910 grs.	Nula
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	1	no	no	0	0	1350 grs.	Muy alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	2	no	no	0	0	1350 grs.	Alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	3	no	no	0	0	1350 grs.	Media
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	1350 grs.	Nula
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	1350 grs.	Nula
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	1	no	no	0	0	5040 grs.	-- Rotura
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	2	no	no	0	0	5040 grs.	-- Rotura
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	3	no	no	0	0	5040 grs.	Alta
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	5040 grs.	Media
Hexágono	0.2	ABS	230°	110°	0%	4	no	no	0	0	5040 grs.	Nula

Tabla de resultados de ensayos con Shells

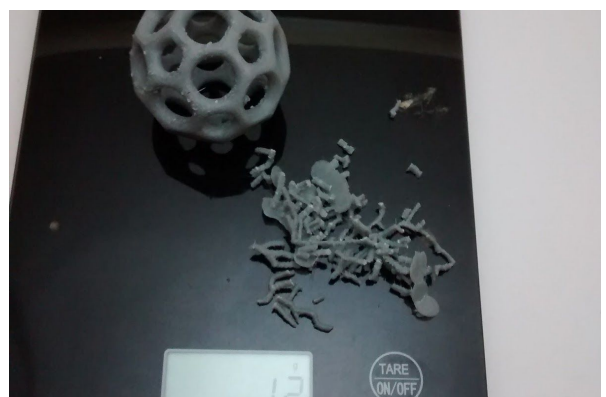
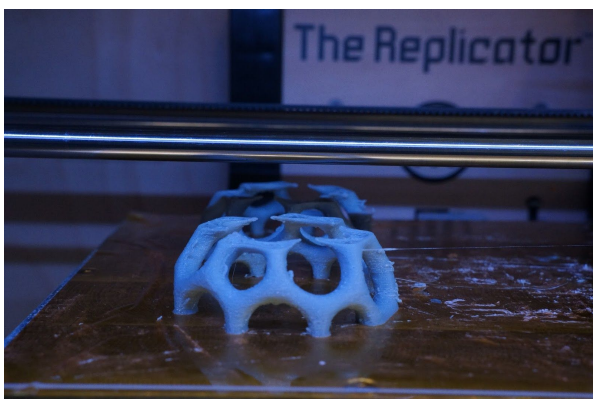
(Ensayo #4) Infill



(Ensayo #5) Ángulos Inclinación



(Ensayo #6) Camas de adhesión y Soportes de Apoyo



(Ensayo #7) Tabla de ensayos de Torsión

Cant.	Modelo	Resol. z	Mat	Temp	Cama	Infill	Shells	Raft	Sup.	Top	Bottom	Orient	#	Presión	Promedio
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	1	0,8850	0,8345
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	2	0,8250	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	3	0,8375	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	4	0,8625	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	0°	5	0,7625	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	15°	1	0,2200	0,223
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	15°	2	0,2375	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	15°	3	0,2500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	15°	4	0,2800	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	15°	5	0,1275	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	30°	1	0,6875	0,7225
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	30°	2	0,7500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	30°	3	0,7375	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	30°	4	0,7125	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	30°	5	0,7250	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	45°	1	0,4800	0,506
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	45°	2	0,5250	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	45°	3	0,5375	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	45°	4	0,4875	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	45°	5	0,5000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	60°	1	0,6865	0,6548
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	60°	2	0,6875	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	60°	3	0,6500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	60°	4	0,6000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	60°	5	0,6500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	75°	1	0,5625	0,616
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	75°	2	0,6125	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	75°	3	0,6200	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	75°	4	0,6000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	75°	5	0,6850	

1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	90°	1	0,7375	0,6215
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	90°	2	0,6300	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	90°	3	0,5300	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	90°	4	0,5725	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	25%	2	no	no	2	2	90°	5	0,6375	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	1	1,3100	1,2718
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	2	1,3000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	3	1,2750	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	4	1,2120	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	0°	5	1,2620	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	15°	1	0,9500	0,8925
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	15°	2	0,8500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	15°	3	0,8500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	15°	4	0,9375	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	15°	5	0,8750	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	30°	1	0,9000	0,8875
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	30°	2	0,8125	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	30°	3	0,8625	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	30°	4	0,9125	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	30°	5	0,9500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	45°	1	0,5000	0,5375
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	45°	2	0,6125	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	45°	3	0,5000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	45°	4		
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	45°	5		
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	60°	1	0,6025	0,633
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	60°	2	0,6500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	60°	3	0,6875	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	60°	4	0,5500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	60°	5	0,6750	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	75°	1	0,5875	0,612
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	75°	2	0,5850	

1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	75°	3	0,6000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	75°	4	0,6250	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	75°	5	0,6625	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	90°	1	0,6625	0,6625
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	90°	2	0,6500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	90°	3	0,6625	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	90°	4	0,6250	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	50%	2	no	no	2	2	90°	5	0,7125	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	0°	1	1,6370	1,5572
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	0°	2	1,4500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	0°	3	1,5500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	0°	4	1,6120	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	0°	5	1,5370	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	15°	1	1,6120	1,5874
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	15°	2	1,5250	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	15°	3	1,6000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	15°	4	1,5500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	15°	5	1,6500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	30°	1	1,4500	1,495
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	30°	2	1,4500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	30°	3	1,4500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	30°	4	1,5250	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	30°	5	1,6000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	45°	1	1,6370	1,67466667
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	45°	2	1,7120	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	45°	3	1,6750	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	45°	4		
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	45°	5		
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	60°	1	1,7500	1,7435
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	60°	2	1,7870	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	60°	3	1,7120	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	60°	4	1,7250	

1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	60°	5		
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	75°	1	1,5370	1,5012
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	75°	2	1,5200	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	75°	3	1,5120	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	75°	4	1,3000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	75°	5	1,6370	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	90°	1	1,2700	1,3278
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	90°	2	1,2820	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	90°	3	1,3000	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	90°	4	1,3500	
1	Probeta	0.2mms	PLA	160°	60°	100%	2	no	no	2	2	90°	5	1,4370	

Ácido poliláctico (PLA) Propiedades típicas

Descripción del Producto			
This data represents typical values that have been calculated from all products classified as: Generic PLA This information is provided for comparative purposes only.			
General			
Estado del Material: Comercial: Activo			
Disponibilidad: África y Oriente Medio Asia-Pacífico Europa Latinoamérica Norteamérica			
Prop. físicas	Valor Típico	Unidad	Mét. Ensayo
Gravedad específica			
--	1,24		ASTM D792
73°F	1,24 a 1,26	g/cm ³	ISO 1183
Velocidad de Fundido			
210°C/2,16 kg	6,0 a 78	g/10 min	ASTM D1238
190°C/2,16 kg	1,5 a 36	g/10 min	ISO 1133
Contracción de moldeo			
Flujo : 73°F	3,7E-3 a 4,1E-3	in/in	ASTM D955
73°F	0,30 a 1,1	%	ISO 294-4
Prop. mecánicas	Valor Típico	Unidad	Mét. Ensayo
Módulo de tensión			
73°F	293000 a 514000	psi	ASTM D638
73°F	45000 a 815000	psi	ISO 527-2
Tensión			
Punto de Fluencia, 73°F	8840 a 9500	psi	ASTM D638
Punto de Fluencia, 73°F	2250 a 10400	psi	ISO 527-2
Rotura, 73°F	7080 a 8150	psi	ASTM D638
Rotura, 73°F	2000 a 10200	psi	ISO 527-2
73°F	6930 a 10000	psi	ASTM D638
Elongación			
Punto de Fluencia, 73°F	9,8 a 10	%	ASTM D638
Punto de Fluencia, 73°F	1,0 a 8,5	%	ISO 527-2
Rotura, 73°F	0,50 a 9,2	%	ASTM D638
Rotura, 73°F	1,0 a 12	%	ISO 527-2
Módulo de Flexión			
73°F	347000 a 715000	psi	ASTM D790
73°F	44200 a 1,38E+6	psi	ISO 178
Resistencia a la flexión			
73°F	6950 a 16000	psi	ASTM D790

73 °F	1310 a 16100	psi	ISO 178
Impacto	Valor Típico	Unidad	Mét. Ensayo
Fuerza de Impacto Charpy Notched (73 °F)	0,67 a 2,6	ft·lb/in ²	ISO 179
Resistencia al impacto Charpy sin entalle (73 °F)	4,0 a 11	ft·lb/in ²	ISO 179
Resistencia al Impacto Izod con ranura			
73 °F	0,30 a 0,88	ft·lb/in	ASTM D256
73 °F	1,6 a 3,0	ft·lb/in ²	ISO 180
Prop. térmicas	Valor Típico	Unidad	Mét. Ensayo
Temperatura de deflexión bajo carga			
66 psi, No recocido	121 a 126	°F	ASTM D648
66 psi, No recocido	122 a 248	°F	ISO 75-2/B
264 psi, No recocido	118 a 122	°F	ISO 75-2/A
Temperatura de transición vítrea			
--	134 a 136	°F	ASTM E1356
--	111 a 145	°F	DSC
Temperatura de Ablandamiento Vicat	130 a 146	°F	ISO 306
Temperatura de Fusión	315 a 338	°F	
Temperatura máxima de cristalización (calorimetría de barrido diferencial, DSC)	266 a 327	°F	ASTM D3418

Propiedades típicas: éstas no deben interpretarse como especificaciones.

Fuente: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/34/c/t/acido-polilactico-pla-properties-processing>