



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Análisis de la influencia de la  
temperatura de la cámara en piezas  
fabricadas por impresión 3D por la  
tecnología FFF**

**Autor:**

**Valverde Lorenzo, Eduardo**

**Tutor:**

**Mansilla Gallo, Alberto**

**Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería  
Metalúrgica, Expresión Gráfica en la  
Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia  
y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e  
Ingeniería de los Procesos de Fabricación**

**Valladolid, Julio, 2018.**



## Resumen

El trabajo de fin de grado consta de tres partes. La primera incluye un desarrollo teórico sobre la impresión 3D, los parámetros que podemos modificar, los materiales que se utilizan y las características de las piezas que se pueden fabricar. Una segunda parte que explica la creación de una estructura sobre la impresora 3D con la finalidad de controlar uno de los parámetros clave del proceso de fabricación, la temperatura de la cámara, algo que no se podía realizar con la impresora previamente. Por último, se analizan mediante un ensayo con probetas si los diseños fabricados mejoran la resistencia mecánica y la precisión dimensional de las piezas impresas y, por tanto, si se han podido conseguir los objetivos del trabajo.

## Palabras clave

- Impresión 3D
- FFF
- Temperatura de la cámara
- Resistencia mecánica
- Precisión dimensional



## Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Resumen y palabras clave</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>Introducción y objetivos</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>Desarrollo del TFG</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>1. Impresión FFF</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>1.1. Funcionamiento de una impresora FFF</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>1.2. Parámetros de una impresora FFF</b> .....   | <b>11</b> |
| 1.2.1 Parámetros del programa laminador .....   | 11        |
| <b>1.3. Ventajas y desventajas de la impresión 3D</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>1.4. Proceso para conseguir una pieza en impresión 3D</b> .....                                      | <b>15</b> |
| 1.4.1. Formato STL .....  | 15        |
| 1.4.2. Programas reparadores de STL .....   | 15        |
| 1.4.3. Programas laminadores .....  | 16        |
| 1.4.4. Código GCODE .....   | 16        |
| <b>1.5. Puesta en marcha y retirada de la pieza</b> .....   | <b>18</b> |
| <b>1.6. Impresora FFF utilizada</b> .....   | <b>19</b> |
| 1.6.1. Características de la impresora .....  | 19        |
| 1.6.2. Modificaciones .....   | 20        |
| <b>1.7. Materiales</b> .....  | <b>21</b> |
| 1.7.1. Comportamiento mecánico de los polímeros .....   | 21        |
| 1.7.2. Fractura de los polímeros .....  | 22        |
| 1.7.3. Factores que influyen en las características mecánicas de los polímeros<br>semicristalinos ..... | 22        |
| 1.7.4. Cristalización en los polímeros .....  | 23        |
| 1.7.5. Fusión .....   | 23        |
| 1.7.6. Transición vítrea .....  | 24        |
| 1.7.7. Polímeros termoplásticos .....   | 24        |
| 1.7.8. Contracción de polímeros en la impresión 3D .....  | 24        |
| <b>1.8. Materiales para la impresión 3D</b> .....   | <b>26</b> |
| 1.8.1. PLA (Ácido Poliláctico) .....  | 26        |
| 1.8.2. ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) .....   | 27        |
| 1.8.3. PVA (Polivinilo de alcohol) .....  | 27        |
| 1.8.3. TPU (Elastómero termoplástico) .....   | 28        |
| 1.8.4. Nailon .....   | 29        |
| <b>2. Fenómeno de la difusión y comportamiento mecánico en la<br/>impresión 3D</b> .....                | <b>31</b> |
| <b>2.1 Fenómeno de difusión</b> .....   | <b>31</b> |
| 2.1.1. Definición .....   | 31        |
| 2.1.2. Factores de la difusión .....  | 32        |
| 2.1.3. Difusión en impresión 3D .....   | 32        |
| <b>2.2. Comportamiento mecánico según la dirección de impresión</b> .....                               | <b>35</b> |
| 2.2.1. Curvas esfuerzo-deformación para fibras longitudinales y transversales .....                     | 36        |
| 2.2.2. Resistencia dependiendo de la dirección .....  | 36        |
| <b>3. Mejoras en la impresora</b> .....   | <b>39</b> |
| <b>3.1 Diseños</b> .....  | <b>39</b> |
| 3.1.1 Diseño de la cubierta frontal .....   | 39        |
| 3.1.2 Diseño de la cubierta superior .....  | 40        |
| 3.1.3 Resistencia y ventilador .....  | 42        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.2 Medida de temperatura en la cámara de impresión .....</b>            | <b>45</b> |
| 3.2.1 Temperatura de la cámara sin cubierta .....                           | 45        |
| 3.2.2 Temperatura de la cámara con cubierta superior y puerta frontal ..... | 46        |
| 3.2.3 Temperatura de la cámara con todos los diseños .....                  | 50        |
| <b>3.3 Consecuencias.....</b>   | <b>54</b> |
| <b>4. Ensayos .....</b>   | <b>55</b> |
| <b>4.1 Probetas.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>4.2 Definición del ensayo .....</b>                                      | <b>57</b> |
| 4.2.1 Ensayo a flexión .....  | 57        |
| 4.2.2 Ensayo dimensional .....  | 59        |
| <b>4.3 Resistencia teórica de las probetas .....</b>                        | <b>61</b> |
| <b>4.4 Resultados .....</b>   | <b>63</b> |
| 4.4.1 Defectos de las probetas .....  | 63        |
| 4.4.2 Resistencia mecánica .....  | 64        |
| 4.4.3 Precisión dimensional .....   | 65        |
| <b>5. Conclusiones .....</b>  | <b>69</b> |
| <b>Bibliografía .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>Anexos .....</b>   | <b>73</b> |
| <b>Anexo 1. Características Ultimaker Extended 3 .....</b>                  | <b>73</b> |
| <b>Anexo 2. Propiedades de los filamentos .....</b>                         | <b>75</b> |
| <b>Anexo 3. Planos de los cerramientos superior y frontal .....</b>         | <b>79</b> |

## Introducción y objetivos

La fabricación aditiva es un procedimiento relativamente moderno y en auge. Dentro de las distintas opciones que se pueden utilizar, nosotros hemos elegido para la realización de este trabajo, la Fabricación con Filamento Fundido (FFF). El funcionamiento de esta tecnología consiste en la extrusión de un material y la deposición del mismo, capa a capa, siguiendo un recorrido marcado. Para el desarrollo de esta tecnología, se va a utilizar la impresora Extended 3, del fabricante Ultimaker.

La impresión 3D permite obtener piezas complejas a un coste relativamente pequeño comparado con los métodos tradicionales. Las características de las piezas que obtenemos dependen principalmente de la calidad del material, de la impresora que utilicemos y de los parámetros que podamos modificar en la misma.

En el mercado existen una amplia gama de impresoras. Las diferencias principales que podemos encontrar entre ellas incluyen: la precisión y calidad de sus elementos y los parámetros que permiten controlar.

Para que obtengamos una impresión de calidad en 3D hay que optimizar la resistencia mecánica de la pieza, así como el cumplimiento de las tolerancias y dimensiones. Para mejorar estas características debemos controlar todos los parámetros operativos durante la impresión.

Existen muchos parámetros que podemos regular. Uno de los más importantes y, que no podemos controlar con nuestra impresora, es la temperatura ambiente de impresión.

Los fabricantes tratan de conseguir que sus impresoras controlen el mayor número de parámetros, o al menos, los más importantes. La realidad es que las impresoras de medio y bajo coste del mercado (como la que se va a utilizar) actualmente no permiten el control de la temperatura ambiente de impresión.

El objetivo del trabajo de fin de grado es analizar la influencia de la temperatura ambiente de impresión en la resistencia mecánica y la precisión dimensional de las piezas en nuestra impresora 3D.

Con el fin de obtener el control sobre la temperatura ambiente de impresión, se van a desarrollar una serie de diseños estructurales sobre la impresora y

comprobaremos mediante un ensayo con probetas si se puede conseguir mejorar su resistencia mecánica y su precisión dimensional.



## Desarrollo del TFG

### 1. Impresión FFF

Las impresiones que se van a realizar en el TFG serán mediante el método FFF (Fabricación con filamento fundido) que explicaremos en este capítulo.

#### 1.1. Funcionamiento de una impresora FFF

La fabricación aditiva consiste en la creación de piezas mediante la adición de material capa a capa, de esta forma lo primero que debemos hacer es dividir la pieza en capas. Estas capas se imprimen por orden consiguiendo formar unas sobre otras hasta conseguir formar la pieza completa.

El material base de una impresora es un filamento. Este filamento pasa por un extrusor que aplica calor para transformarlo en un material semilíquido.

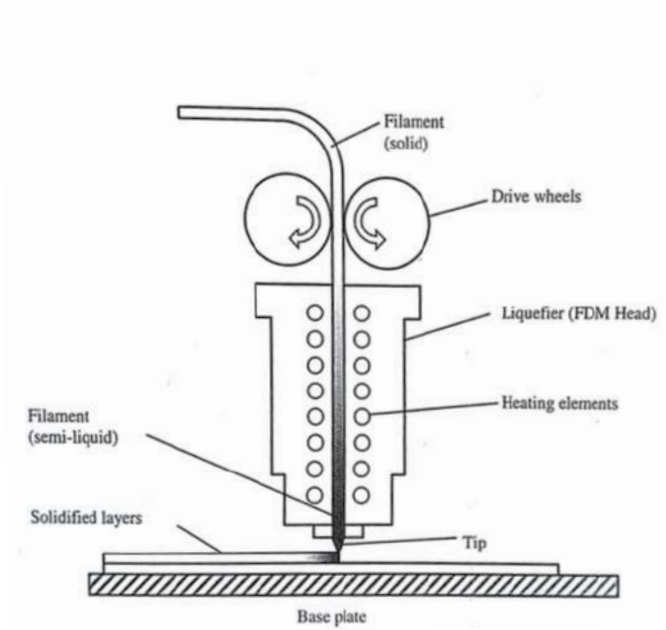


Imagen 1.1: Funcionamiento del cabezal. (*3D printing and additive manufacturing*, Kai Chua C, Fai Leong K; Londres; 2017).

El material es depositado en capas muy finas siguiendo un recorrido marcado hasta formar toda la capa. Una vez fuera del cabezal y depositado se solidifica gracias a la acción de un ventilador que lo enfría rápidamente. Cuando se termina de formar la capa, el cabezal sube un escalón y empieza a formar la siguiente capa.

Una vez se han formado todas las capas de la pieza, el extrusor se retira y el proceso termina.

Hay impresoras 3D que tienen 2 cabezales, ello permite jugar con las geometrías, materiales y colores. Lo más habitual es utilizar un extrusor que cree la geometría de la pieza y utilizar otro para que imprima el material de soporte.

El soporte es necesario cuando existen voladizos en las piezas impresas, se utiliza para que la impresión no se haga en vacío y la estructura de la pieza se mantenga.

## 1.2. Parámetros de una impresora FFF

En el proceso de impresión 3D existen muchos parámetros de fabricación que se pueden controlar, desde la altura de cada capa hasta la velocidad del ventilador.

Los programas laminadores (dividen la pieza en capas) son los que nos permiten variar los distintos parámetros de fabricación. De entre todos ellos se utilizará el CURA que se explicará en el apartado 1.4.3. Programas de laminado hay muchos, entre ellos Slic3r, Simplify o CURA.

Se ha escogido el programa CURA en vez de otro software laminador debido a varias razones:

1. El programa CURA es de la empresa Ultimaker, es decir de la misma marca que la impresora que se va a utilizar. El software está especialmente diseñado para utilizarse en este tipo de impresoras.
2. Permite variar del orden de 170 parámetros de impresión.
3. La interfaz del programa facilita su uso.

### 1.2.1 Parámetros del programa laminador

La clave para que la impresión se realice de forma satisfactoria es la buena elección de los parámetros de impresión durante el proceso de fabricación. La elección de parámetros se hará desde el programa laminador (1.4.3.) y estos parámetros escogidos son los que se transmiten a la impresora para que los lleve a cabo.

El programa laminador y la impresora deben estar conectados de alguna manera de forma que todos los parámetros escogidos por el programa sean posibles de ejecutar en la impresora. Lo habitual es que el mismo programa tenga especificados los datos de todas las impresoras del mercado, de forma que lo único que hay que hacer es especificar la impresora con la que se trabaja.

Los parámetros más importantes que podemos controlar gracias a nuestro software CURA son:

- Altura de capa: Nos indica la altura de cada capa y, por tanto, la cantidad de filamento que sale por el extrusor. Si queremos que el aspecto de la pieza sea bueno debemos utilizar una altura de capa pequeña aunque de seguir este procedimiento la impresión tardará mucho más en realizarse.

- **Altura de capa inicial:** Es habitual que el grosor de la primera capa sea distinta que el resto. Podemos hacer la capa más delgada que el resto para favorecer el pegado de la misma y disminuir la contracción del material (1.7.8).
- **Densidad de relleno:** Las piezas pueden estar o no completamente rellenas, de no estar llenas podremos escoger el patrón y la cantidad de relleno que queramos. La impresión 3D permite que, sin necesidad de un relleno al 100%, las fuerzas se repartan y se consigan unas buenas características mecánicas.
- **Grosor de la pared:** Las piezas pueden no estar internamente rellenas, por lo que debemos especificar cuanto grosor queremos en las paredes si la densidad de relleno no es del 100%.



Imagen 1.2.1: Pieza partida a la mitad con un relleno del 20%.

- **Expansión horizontal:** Con este parámetro podemos controlar que la dimensión de las piezas sea correcta. En las piezas se producen cambios en el volumen debido a la presión de la boquilla sobre la pieza, con este parámetro podremos compensar estos efectos.
- **Temperatura de impresión:** Podemos escoger la temperatura de salida del material. Escogemos esta temperatura dependiendo del tipo de material, buscando que el mismo no se desgaste y fluya correctamente.
- **Temperatura de la placa de impresión:** Se varía la temperatura de la placa dependiendo del material que se imprima, un buen control de

este parámetro favorece que no se produzca contracción en la base de la pieza.

- Flujo: Porcentaje que queremos que salga por la boquilla con respecto al que debería salir para una extrusión completa.
- Velocidad de impresión: Nos indica la velocidad a la que queremos que se imprima la pieza.
- Soporte: Necesario en piezas con voladizos.

Parámetros que no podemos controlar:

- Temperatura ambiente de impresión: Existen impresoras en el mercado que permiten su control, aunque en la nuestra no es así. Vamos a tratar durante el desarrollo de este trabajo de controlar este parámetro para así analizar la resistencia mecánica y la precisión de las piezas.

### 1.3. Ventajas y desventajas de la impresión 3D

La impresión 3D presenta una serie de ventajas e inconvenientes frente a los métodos convencionales que enumero a continuación.

Ventajas:

- Versatilidad en la fabricación de piezas.
- Fabricación de piezas complejas.
- No hay derroche de material.
- Posibilidad de utilizar relleno.
- Fácil retirada del material de soporte.
- Fácil cambio de material.
- Se pueden crear piezas voluminosas si el tamaño de la impresora lo permite.

Desventajas:

- Proceso lento.
- Precisión dimensional restringida.
- Contracción del material: suele ser corregida cambiando los parámetros de la máquina para compensarlo, aunque no es nada fácil predecirlo.
- Resistencia mecánica.

## 1.4. Proceso para conseguir una pieza en impresión 3D

Lo primero es tener un modelo CAD de la pieza. Este modelo se puede conseguir con programas de diseño como “Catia” o “Inventor”, así como muchos otros. También se puede conseguir a través de un escaneado.

Este modelo 3D debemos mallarlo, es decir, pasarlo a una nube de puntos que conforman la superficie exterior de la pieza. Esta superficie se guarda como archivo STL (1.4.1.). Antes del continuar se debe confirmar que la nube de puntos esté perfectamente cerrada y sea válida. Si es necesario podemos repararla o modificarla (1.4.2).

Una vez tenemos el modelo, se exporta a un software laminador Este software (Simplify, o CURA entre otros) te genera las distintas capas de la pieza conformando un código junto con los parámetros escogidos. El código generado se enviará a la máquina FFF en formato GCODE.

### 1.4.1. Formato STL

Es el formato utilizado en la representación de modelo 3D para posteriormente exportarlo a un software laminador. Este modelo está formado por una malla que consiste en una superficie conformada por triángulos que representan el exterior del objeto. Estos triángulos están descritos a través de coordenadas X Y Z en el espacio para cada uno de los vértices y un vector normal para indicar la cara exterior.

Sin embargo, a veces la superficie creada utiliza vértices redundantes y tiene otro tipo de desventajas como huecos, caras degeneradas o caras redundantes lo que conlleva que pueda generar dificultades en la impresión. Es importante cerciorarnos de que nuestro modelo 3D está perfectamente formado, y que es válido para la exportación.

### 1.4.2. Programas reparadores de STL

Existen muchos programas para reparar o modificar el código STL (Recap, Meshlab). Como he dicho en el apartado anterior, hay que cerciorarnos de que nuestro modelo 3D está perfectamente formado, que no existan caras redundantes, huecos, etc. Para ello utilizamos este tipo de programas que nos arreglan estos problemas y nos dejan la pieza STL lista para la impresión 3D.

En la mayoría de los casos no hace falta utilizar este tipo de programas reparadores, sólo cuando veamos que el modelo STL está mal formado o siempre que queramos modificar algo en la nube de puntos.

### 1.4.3. Programas laminadores

El formato STL bien formado y validado se exporta a uno de estos programas para la creación de las capas (Simplify, CURA, etc). Estos programas laminan el sólido en capas y posteriormente lo exportan en formato GCODE que es el que entiende la impresora 3D.

La elección de los distintos parámetros es la clave de que la impresión sea de buena calidad, dependiendo del software que utilicemos podremos variar unos u otros parámetros.

Una ventaja del programa es que dependiendo del material utilizado, por defecto, el software escoge de forma predeterminada los parámetros. Por lo tanto, en la mayoría de los casos sólo deberemos variar algunos de los mismos.

El software CURA tiene la posibilidad de cambiar del orden de 170 parámetros, por lo que lo habitual es sólo cambiar los más importantes y dejar el resto de forma predeterminada.

### 1.4.4. Código GCODE

Es el código que lee la impresora 3D. Se consigue tras exportarlo de uno de los programas laminadores anteriormente mencionados.

El código generado es lo que entiende la impresora, está formado por todas las órdenes que enviamos. Un ejemplo de un código de este tipo es:

```
T0  
M82  
  
G92 E0  
M109 S215  
G0 F15000 X9 Y6 Z2  
G280  
G1 F1500 E-6.5  
M107  
M204 S625
```



```
M205 X6 Y6
G0 F4285.7 X108.531 Y100.449 Z0.27
M204 S500
M205 X5 Y5
G1 F1500 E0
G1 F1200 X109.147 Y99.802 E0.01323
G1 X109.818 Y99.214 E0.02645
G1 X110.54 Y98.687 E0.03969
G1 X111.305 Y98.227 E0.05291
G1 X112.109 Y97.838 E0.06614
G1 X112.944 Y97.522 E0.07937
G1 X113.805 Y97.282 E0.09261
G1 X114.683 Y97.12 E0.10584
```

Cada comando emite una orden. Se puede apreciar que el código sigue una serie de puntos (X Y Z) hasta formar la pieza completa.

Las primeras órdenes que se ponen en el código son las temperaturas de impresión de las capas, es decir, los parámetros iniciales de funcionamiento. Las órdenes G1 y G0 especifican los movimientos que debe tener el cabezal, así como la cantidad de filamento que empuja y la velocidad con la que se empuja el mismo.

Existen muchos tipos de comandos, aunque los más importantes son los ya mencionados anteriormente.

### 1.5. Puesta en marcha y retirada de la pieza

El último paso del proceso es exportar el código GCODE. La impresora sigue todas las instrucciones de forma automática (calibración de la base, temperatura de la cama y del cabezal...).

La pieza debe de quedarse bien pegada a la base durante su formación. Para que esto ocurra dependiendo del tipo de material y de sus características habrá que utilizar algún tipo de spray o pegamento para la base. De esta manera nos cercioraremos que la pieza no se despegará durante el proceso.

La utilización de este tipo de productos se da debido al fenómeno de contracción de las piezas (1.7.8) o Warping. El material sale del extrusor a una temperatura muy alta y solidifica sobre una base más fría. Si este proceso no se realiza de forma gradual provocamos tensiones en la base que pueden llegar a provocar levantamientos en las esquinas o directamente el despegue de la pieza.



Imagen 1.5: Laca para la adhesión de piezas a la base.

Una vez terminada la fabricación, la pieza estará caliente y habrá que esperar a que se enfríe para despegarla de la base. De haber utilizado material soporte para la sujeción de la pieza debemos proceder su eliminación. Dependiendo del tipo de material que utilicemos se quitará de una forma u otra, aunque en la mayoría de los casos con detergente y agua es posible quitarlo.

## 1.6. Impresora FFF utilizada

Se va a utilizar la impresora Ultimaker Extended 3, se desarrollan a continuación algunas de sus características.

### 1.6.1. Características de la impresora

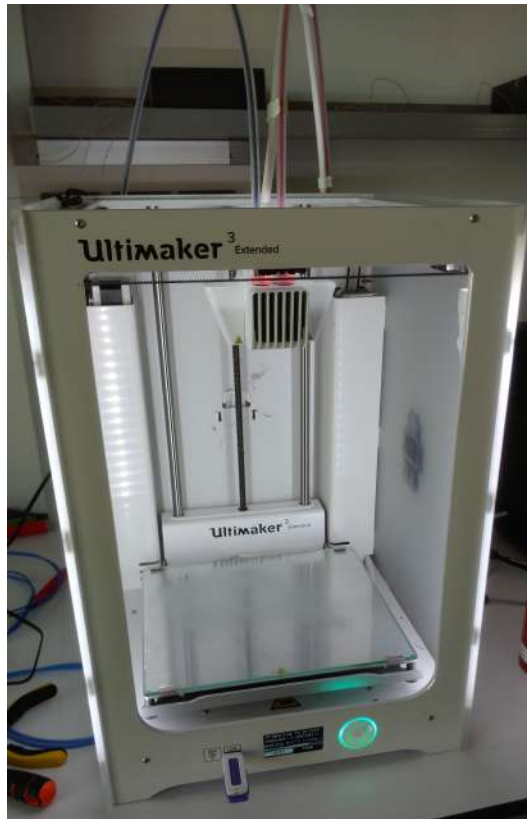


Imagen 2.6.1: Impresora Ultimaker Extended 3.

Se adjunta en el Anexo 1 las distintas características de la impresora Ultimaker Extended 3.

Durante la fabricación es el cabezal el que se mueve sobre los ejes X e Y, y la placa de impresión la que se mueve sobre el eje Z. Es por ello que al inicio de la impresión, la cama está colocada arriba del todo y va bajando mientras se va formando la pieza.

Se pueden hacer piezas de hasta 215 mm de ancho, 215mm de largo y 300mm de alto.

### 1.6.2. Modificaciones

Se van a diseñar unas piezas para la Ultimaker Extended 3 que desarrollamos en el punto 3. El objetivo es conseguir unas temperaturas lo más homogéneas y altas posibles en la cámara de impresión. Así podremos analizar si la temperatura ambiente a la que imprimimos es un factor importante para conseguir una buena dimensionalización y unas buenas características mecánicas en las piezas.

La empresa Ultimaker no nos recomienda pasarnos de 60°C en la cámara de impresión. Esta limitación es debida al desgaste que se puede producir en las piezas de la impresora por el aumento excesivo de la temperatura.

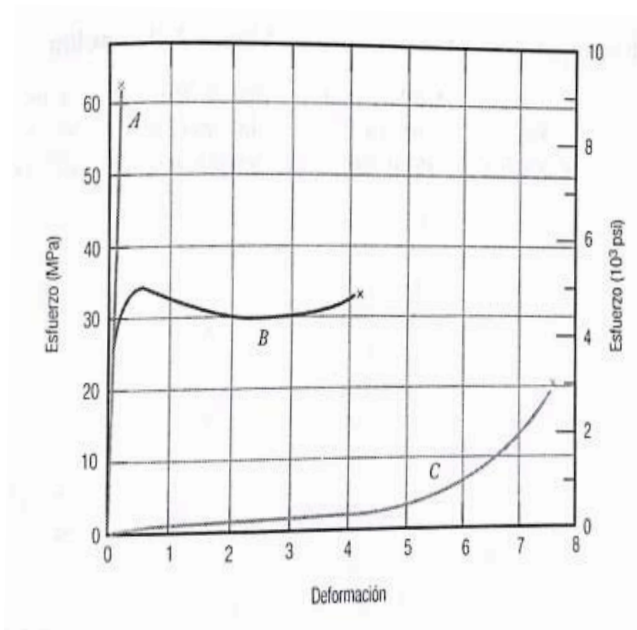
## 1.7. Materiales

Los materiales que se utilizan para la impresión 3D son los polímeros termoplásticos.

Se explican a continuación las cualidades de estos polímeros, así como sus propiedades y características para posteriormente señalar cuales son algunos de los materiales específicos que se pueden utilizar en la impresora Ultimaker extended 3.

### 1.7.1. Comportamiento mecánico de los polímeros

Las propiedades mecánicas de los polímeros se clasifican al igual que los metales en función de su módulo de elasticidad, fluencia, límite elástico y resistencia a tracción. Se utiliza el ensayo esfuerzo-deformación para establecer varias de estas propiedades. Los polímeros son altamente sensibles a la velocidad de deformación, a la temperatura y a la naturaleza química del ambiente.



Gráfica 1.7.1: Comportamiento esfuerzo-deformación de los polímeros: frágil (curva A), plástico (curva B), y con elevada elasticidad (curva C). (*Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales*. Callister WD; 1996).

El módulo de elasticidad, al igual que la ductilidad, se consigue como en las pruebas que se hacen a los metales, con un ensayo de tracción. El punto de

fluencia es el punto máximo de la curva (curva B), al terminar la región elástica lineal. La resistencia a tracción es el esfuerzo que ocurre hasta la rotura, puede estar por debajo del esfuerzo del punto de fluencia.

Lo que ocurre en la deformación mediante un ensayo de un material plástico es que cuando se forma una estricción, las cadenas se orientan y aumenta localmente la resistencia.

### **1.7.2. Fractura de los polímeros**

En los polímeros termoplásticos (los que vamos a estudiar) son posibles tanto la fractura dúctil como la fractura frágil. La fractura frágil esta favorecida por la reducción de temperatura, aumento de velocidad de deformación, incremento en la anchura de las probetas, presencia de entallas agudas y de la elevación de la temperatura de transición vítrea.

Un fenómeno que ocurre en los polímeros termoplásticos es la rotura por microfisuración. Se forman microporos que al crecer forman grietas que se propagan hasta romper.

### **1.7.3. Factores que influyen en las características mecánicas de los polímeros semicristalinos**

Además de los factores que influyen en el comportamiento esfuerzo-deformación (temperatura, velocidad de aplicación...) existen otros factores estructurales o de procesamiento que tienen influencia en el módulo y en la resistencia de los materiales poliméricos. Los describimos a continuación.

#### **1.7.3.1. *Peso molecular***

Un aumento del peso molecular implica un aumento de la resistencia a tracción. Esto se explica por el aumento de enredamientos en la cadena polimérica.

#### **1.7.3.2. *Grado de cristalinidad***

El grado de cristalinidad afecta al alcance del enlace secundario intermolecular. En las regiones cristalinas las cadenas moleculares están densamente empaquetadas porque generalmente existen enlaces secundarios entre los segmentos adyacentes a la cadena. Estos enlaces

secundarios son mucho más notorios en las regiones cristalinas, por ello, el módulo de tracción aumenta de forma significativa con la cristalinidad.

#### 1.7.3.3. Tratamiento térmico

El recocido de los polímeros semicristalinos puede llevar a un aumento de la cristalinidad, del tamaño y a cambios en la esferulita. Si no ha sido trefilado, un aumento en la temperatura de recocido lleva a aumentar el módulo de tracción, el límite elástico y a reducir la ductilidad.

#### 1.7.4. Cristalización en los polímeros

El grado de cristalinidad de los polímeros influye en las características mecánicas y térmicas de estos materiales. Los polímeros, al enfriarse a partir de la temperatura de fusión forman núcleos en los cuales las pequeñas regiones de las moléculas enredadas y al azar se ordenan y alinean formando capas de cadenas dobladas.

Después de la nucleación y durante la etapa de crecimiento de la cristalización, los núcleos crecen por el ordenamiento y la alineación de segmentos adicionales de la cadena molecular.

La dependencia del tiempo en la cristalización se puede poner de forma matemática según la ecuación de Avrami

$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

Fórmula 1.7.4: Ecuación de Avrami.

Siendo “y” la fracción cristalizada y las constantes “k” y “n” (independientes del tiempo (t)) y cuyos valores dependen del sistema de cristalización del polímero.

#### 1.7.5. Fusión

Corresponde a la transformación de un material sólido con estructura ordenada de cadenas alineadas a un material líquido viscoso con una estructura aleatoria. El comportamiento de la fusión depende del historial de la probeta que utilicemos, sobretodo de la temperatura a la que cristalizó.

Durante la impresión 3D, el filamento pasa su punto de fusión para salir de forma correcta por la boquilla y solidificarse nada más salir.

#### 1.7.6. Transición vítrea

La transición vítrea tiene lugar en los polímeros y reduce el movimiento de los grandes segmentos de las cadenas moleculares al disminuir la temperatura. La temperatura a la cual el polímero comienza a ser blando y deja de ser rígido se denomina temperatura de transición vítrea “Tg”.

La temperatura de transición vítrea es clave durante la impresión 3D, ya que la unión entre capas se realiza por encima de la misma, es uno de los factores importantes para que se produzca el fenómeno de difusión (2.1).

#### 1.7.7. Polímeros termoplásticos

Los polímeros termoplásticos están constituidos por la agrupación de macromoléculas lineales. Éstas están ligadas entre sí mediante enlaces débiles Van der Waals o puentes de hidrógeno. Estos enlaces desaparecen cuando llega a alcanzarse la temperatura de transición vítrea.

A partir de esta temperatura se puede conformar fácilmente el material. Por debajo de la temperatura de ablandamiento el polímero se comporta como un sólido amorfo o si el grado de polimerización es muy grande llega a obtenerse cierta cristalinidad.

#### 1.7.8. Contracción de polímeros en la impresión 3D

Los polímeros pueden sufrir el fenómeno de la contracción. Esta contracción es debida a la dilatación térmica, a la solidificación del polímero (velocidad de enfriamiento y temperatura de la placa de impresión), a las tensiones internas y a la termodinámica del proceso de fabricación.

Para mejorar la contracción del proceso debemos controlar todos estos factores de la fabricación, en especial la solidificación de polímero y la termodinámica del proceso. Para intentar reducir la contracción brusca que ocurre durante la impresión de una pieza se debe controlar el proceso de solidificación del plástico. Para ello se tiene que mantener la temperatura de la pieza controlada. Para evitar la contracción del material al solidificarse sobre la base, utilizaremos una placa de impresión a alta temperatura y, en ocasiones (dependiendo del material), una base que adhiera mejor el polímero a la cama.

El coeficiente de dilatación térmica es el valor que mide el cambio de volumen o longitud en un material cuando cambia de temperatura, depende del material que se utilice. Hay que tener especial cuidado durante la impresión



de materiales con alto coeficiente de dilatación térmica ya que presentarán las contracciones más grandes.

## 1.8. Materiales para la impresión 3D

Se van a enumerar los materiales más importantes que se utilizan para la impresión 3D, así como las características de los filamentos (Anexo 2).

Hay que tener en cuenta que las características de los materiales también dependen del fabricante.

### 1.8.1. PLA (Ácido Poliláctico)

El PLA es un plástico fabricado con materiales orgánicos y renovables, es muy fácil de imprimir aunque no tiene muy buenas características mecánicas.

Nos proporciona un modelo sólido de lo que queremos imprimir. No se suele utilizar como material final para piezas que requieren ciertas características mecánicas por su baja resistencia.

El PLA lo podemos encontrar en todo tipo de colores, dependiendo del fabricante podremos escoger el color que más nos guste.



Imagen 1.8.1: Piezas de ácido poliláctico.

### 1.8.2. ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno)

El ABS desprende un olor intenso a plástico cuando se imprime, es más difícil de imprimir que el PLA, aunque adquiere unas mejores características mecánicas.

Para la impresión de ABS se va a utilizar una laca de adhesión debido a que la primera capa del material pega con dificultad sobre la cama de impresión. Además, la contracción del plástico es grande lo que posibilita que se despegue fácilmente.

Las características mecánicas del ABS las podemos encontrar en el Anexo 2.



Imagen 1.8.2: Piezas de ABS.

#### 1.8.2.1. ABS HI (Acrilonitrilo butadieno estireno)

El ABS HI es una variante del ABS del productor Smarfill que está especialmente creado para piezas con altas características mecánicas. Tiene una gran resistencia al impacto.

Las demás características son similares a la de ABS, se adjuntan en el Anexo 2.

### 1.8.3. PVA (Polivinilo de alcohol)

Se trata de un material soluble en agua. No es un material para imprimir una pieza, sino que se utiliza como soporte para otros materiales.

Para que pueda hacer de soporte debe tener cierta compatibilidad con el material principal.

Se utiliza principalmente con el PLA.

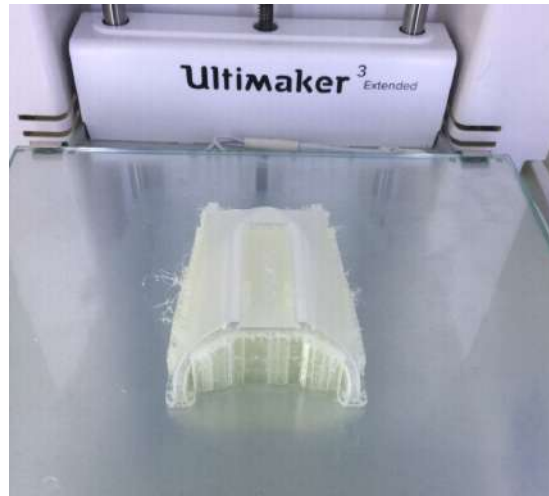


Imagen 1.8.3: Pieza de PLA que utiliza soporte PVA.

### 1.8.3. TPU (Elastómero termoplástico)

El TPU es un plástico flexible que nos permite imprimir piezas sólidas. Las piezas que se imprimen con TPU tienen un aspecto sólido aunque son deformables.

La deformación a la que se les puede someter depende principalmente de la densidad con que rellenemos la pieza y del espesor de las paredes.



Imagen 1.8.3: Piezas de TPU.

#### 1.8.4. Nailon

El nailon ofrece muy buenas características mecánicas aunque es muy difícil de imprimir. El material es muy resistente y permite obtener piezas de gran valor mecánico con un peso relativamente pequeño.



## 2. Fenómeno de la difusión y comportamiento mecánico en la impresión 3D

### 2.1 Fenómeno de difusión

La difusión es un fenómeno muy importante en el proceso de fabricación 3D ya que es el proceso que permite la unión entre los churros de material extruidos por la impresora.

Uno de los parámetros que queremos controlar durante el proceso de impresión es la temperatura ambiente a la que se lleva a cabo. Controlando ese parámetro podremos actuar sobre el fenómeno de la difusión.

#### 2.1.1. Definición

Movimiento de transporte por traslado atómico. Cuando el cambio atómico se realiza entre átomos del mismo tipo se denomina autodifusión.

Consiste en migración de los átomos de un sitio de la red a otro, para conseguir este movimiento se deben de cumplir dos condiciones: la primera es que exista un lugar vecino vacío y la segunda que el átomo debe de tener suficiente energía para romper los enlaces con los átomos vecinos y distorsionar la red durante el desplazamiento.

La energía necesaria es de naturaleza vibratoria, a una determinada temperatura una fracción de átomos es capaz de difundirse. Esta fracción aumenta con la temperatura.

##### 2.1.1.1. Difusión por vacantes

Este mecanismo de difusión implica la presencia de vacantes y la posibilidad de la difusión de las vacantes es en función del número de defectos que existan. A elevada temperatura el número de vacantes aumenta significativamente, la autodifusión se produce con este mecanismo.

##### 2.1.1.2. Difusión intersticial

Este mecanismo implica la ocupación de un átomo en un hueco intersticial de otro vecino. Tiene lugar por interdifusión de solutos que tienen átomos pequeños. Es un mecanismo que ocurre sobre todo en las aleaciones, donde la probabilidad del movimiento atómico intersticial es mayor que la difusión por vacantes.

### ***2.1.1.3. Difusión en dislocaciones, límites de grano y superficies externas***

Éste tipo de difusión se suele denominar “en cortocircuito” ya que ocurre a una velocidad mayor que la difusión en volumen. En la mayoría de los casos la contribución de la difusión en cortocircuito es insignificante.

### **2.1.2. Factores de la difusión**

#### ***2.1.2.1. Substancias que difunden***

El término que indica la velocidad de difusión atómica y por tanto la capacidad de difusión es el coeficiente de difusión. Cada material tendrá un valor distinto.

La red que estén formando y la temperatura influirán en el valor del coeficiente de difusión.

#### ***2.1.2.2. Influencia de la temperatura***

La temperatura tiene una gran influencia en los coeficientes y las velocidades de difusión. Un aumento de la temperatura genera una mayor cantidad de vacantes y provoca una mayor difusión.

Nosotros desarrollaremos esta idea durante este trabajo, vamos a provocar una mayor difusión durante el pegado entre capas en la impresión 3D.

### **2.1.3. Difusión en impresión 3D**

Durante la impresión 3D se produce el fenómeno de difusión en la unión entre los distintos churros de material que salen de la boquilla.

Como explicamos en el punto 1.1, el plástico se calienta por encima de su punto de fusión y es depositado encima de otra capa de plástico, donde se produce el fenómeno de la difusión al juntar un plástico muy caliente con otro templado, en donde se llega a estar en la unión por encima de la temperatura de transición vítrea, que es cuando se produce el fenómeno.

Las condiciones que se alcanzan en la unión de los plásticos son las que dictaminan la calidad de la misma. La temperatura y el enfriamiento son parámetros cruciales.

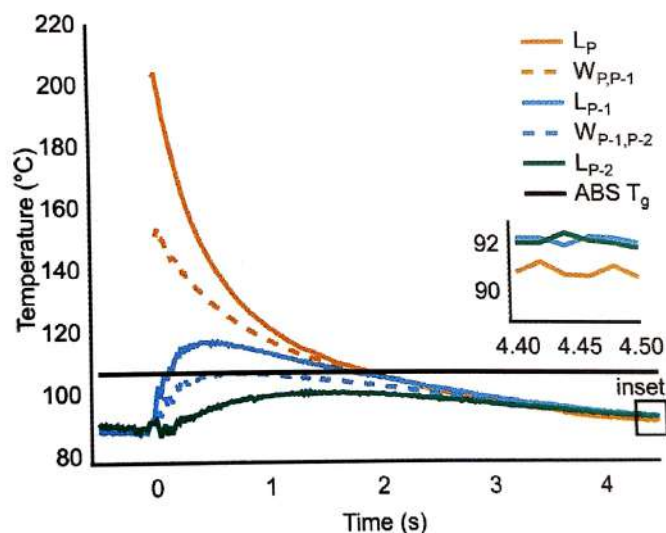


En un estudio se muestran las temperaturas de unión entre las capas en la formación de una pieza de ABS (Jhonathan E. Seppala y Kalman D. Migler, 2016)

En el mismo se muestra que en condiciones normales de impresión de ABS, el plástico según sale de la boquilla se enfría a una velocidad aproximada de 100°C/segundo y se mantiene por encima de la temperatura de transición vítrea por aproximadamente otro segundo.

### 2.1.3.1 Proceso de unión

En la gráfica posterior se presenta la unión de una capa Lp con la capa anterior Lp-1



Gráfica 2.1.3.1: Temperatura de las capas del ABS frente al tiempo. (Seppala J.E, Migler K.D; 2016. Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusion. *Additive Manufacturing* ).

La línea negra de la gráfica indica la temperatura de transición vítrea del ABS.

Se puede observar que las capas ya solidificadas (Lp-1 y Lp-2) están a una temperatura de reposo de 90 grados aproximadamente. En el momento que ponemos una capa superior caliente, la temperatura de la capa Lp-1 sube y la de Lp baja rápidamente hasta que ambas se juntan y llegan a la misma temperatura de reposo que la Lp-2.

Entre medias del proceso Lp-1 y Lp se mantienen en un rango de tiempo de algo menos de 2 segundos por encima de la temperatura de transición vítrea. Es ahí cuando se produce la unión entre capas.

### *2.1.3.2. Importancia de la unión entre capas*

Un buen pegado entre capas implica una mejora sustancial en las características mecánicas de las piezas. Para que exista una buena unión debe haberse producido el fenómeno de difusión de forma satisfactoria.

Para que el proceso de difusión produzca una buena unión se tiene que mantener la unión entre capas el máximo tiempo posible por encima de la temperatura de transición vítrea.

Como he explicado en el punto 2.1.1, una alta temperatura favorece la presencia de vacantes y un tiempo mayor por encima de la temperatura de transición vítrea consigue una mayor transmisión de átomos.

Por ello debemos aumentar el tiempo de unión entre capas por encima de la temperatura de transición vítrea, para conseguirlo debemos aumentar la temperatura en la unión o tener un enfriamiento más lento. Así conseguiremos mejorar calidad en la unión y en consecuencia de las características de las piezas formadas.

Para conseguir aumentar el tiempo de unión por encima de la temperatura de transición vítrea podremos hacer varias cosas, la que se hará en este trabajo será subir la temperatura de reposo de las capas.

Si mantenemos una temperatura de reposo de capa más alta, la unión entre capa caliente y capa en reposo se hará a una mayor temperatura y más rápido, además conseguimos un enfriamiento más lento por lo que el tiempo por encima de la temperatura de transición vítrea aumentará.

## 2.2. Comportamiento mecánico según la dirección de impresión

Los materiales impresos tienen una anisotropía natural que provoca que las propiedades mecánicas son distintas dependiendo de la dirección.

La forma de impresión de las piezas es muy importante en su comportamiento mecánico posterior. Se pueden distinguir dos direcciones en la unión entre fibras: longitudinal y transversal.

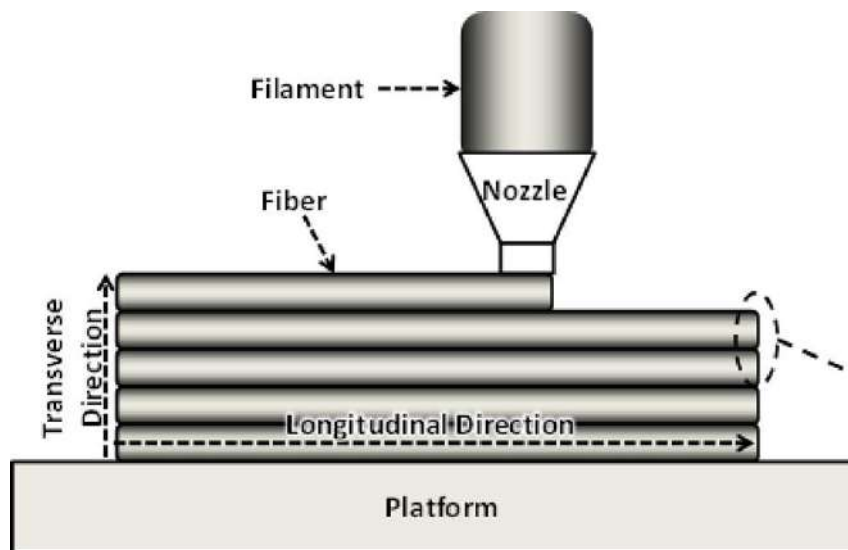
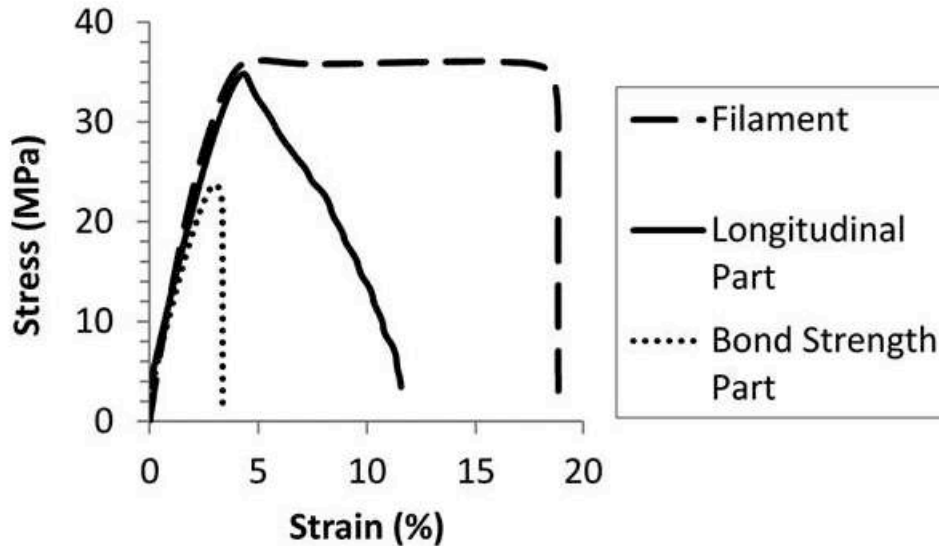


Imagen 2.2: Direcciones longitudinales y trasversales en una impresión real. (Coogan TJ, Kazmer DO; 2017. Bond and part strength in fused deposition modeling. *Prototyping journal*).

Las fibras longitudinales están unidas en la dirección de impresión mientras que las transversales se unen unas con otras gracias a la soldadura creada entre los chorros de plástico.

### 2.2.1. Curvas esfuerzo-deformación para fibras longitudinales y transversales



Gráfica 2.2.1: Curva esfuerzo-deformación en un polímero de ABS. (Coogan TJ, Kazmer DO; 2017. Bond and part strength in fused deposition modeling. *Prototyping journal*).

El ensayo de la gráfica 2.2.1 (Coogan TJ y Kazmer DO, 2017) nos pone de manifiesto las características mecánicas de las piezas según su dirección de impresión, el gráfico nos indica la tensión que aguantan las fibras longitudinales, las transversales y las del filamento frente a la deformación hasta su rotura.

El ensayo está hecho con ABS a una velocidad de 0.5 mm/min, basado en prueba ATSM D1708.

Se puede observar que las fibras aguantan más en dirección longitudinal que en la transversal. La resistencia longitudinal podremos cambiarla variando el tipo de material utilizado mientras que la resistencia transversal depende en mayor medida de los parámetros de impresión.

### 2.2.2. Resistencia dependiendo de la dirección

La resistencia longitudinal de las fibras se debe principalmente al material que estemos imprimiendo, una mejora del material provoca una mejora en la resistencia.

En cambio, la resistencia en las direcciones transversales se debe a varios factores, citados a continuación en los subapartados. Esta resistencia es la que se debe implementar para conseguir una mejora sustancial en las características mecánicas de las piezas sin variar su material.

#### ***2.2.2.1. Influencia de la temperatura de la placa de impresión y de la boquilla***

El aumento en la temperatura de la placa de impresión provoca una mayor temperatura en las capas (2.1.3). Si tenemos una mayor temperatura de reposo de capa, el tiempo de unión entre capas por encima de la temperatura de transición vítrea aumenta, lo que provoca una difusión mayor y consigue una mejor unión.

Un aumento en la temperatura de la boquilla provoca el mismo efecto, pues aunque no suba la temperatura de la capa en reposo, lo hace la de la nueva capa extruida.

#### ***2.2.2.2. Influencia de la velocidad de deposición, anchura de capa y de la altura de capa***

El aumento en la velocidad de impresión provoca un menor tiempo de enfriamiento previo de capa, antes de que se llegue a enfriar otra capa ya se está formando la siguiente, lo que mejora el fenómeno de difusión. Esto ocurre especialmente en piezas de pequeñas dimensiones.

De la misma forma, aumentar la anchura de capa consigue una mayor masa, que se enfría más lentamente.

La altura de capa es el factor más importante y que tiene dos efectos contrapuestos, el primero es debido a la presión que ejerce la boquilla sobre la capa, cuanto menor es la altura de capa mayor es la presión y el contacto entre capas debido al esfuerzo aumenta, consiguiendo mejorar la difusión. El efecto contrapuesto indica que si disminuimos la altura de capa echamos menos cantidad de masa, lo que empeora la unión.



### 3. Mejoras en la impresora

Debemos por tanto mejorar la difusión del plástico durante la impresión 3D, con ello podremos analizar sus características mecánicas y la precisión de las piezas impresas.

Para aumentar la temperatura de las capas de reposo se va a crear un cerramiento frontal y superior de la impresora que junto con la acción de un ventilador y una resistencia van a mantener dentro de la cámara de impresión una temperatura estable. No sólo tenemos que mantener una temperatura homogénea sino que debemos conseguir también que esa temperatura sea alta y no existan corrientes de aire que afecten a la formación de la pieza.

Se quiere controlar la temperatura de la cámara de impresión, para ello el objetivo principal es cerrar la impresora. El primer diseño incluye un cerramiento frontal, y el segundo un cerramiento superior. Más adelante incorporamos una resistencia calorífica que nos proporciona el calor necesario para mantener la temperatura alta y estable en la cámara.

Por último, se harán unas pruebas para comprobar a que temperaturas que se alcanzan.

#### 3.1 Diseños

##### 3.1.1 Diseño de la cubierta frontal

El primer diseño que se incorpora es la cubierta frontal. Consiste en una puerta de metacrilato de 3 milímetros unida a la impresora con 3 agarraderas y una pieza que hace de pestillo. Las agarraderas están impresas y se utilizan tornillos y tuercas para unirlos con la plancha de metacrilato. Las piezas se han pedido al mismo fabricante de la impresora, Ultimaker. Se adjunta en el anexo 3 el plano de la puerta.

Con este cerramiento evitamos las fugas frontales de calor y la elección del metacrilato transparente como material nos permite ver la pieza mientras se va formando una vez estemos imprimiendo con la máquina.

Este cerramiento no es principal puesto que el calor de la placa de impresión asciende y debe aislarse con el cerramiento superior.

La puerta interviene principalmente para mantener el calor en la cámara una vez se consiga una temperatura estable en la misma y mientras se vaya

formando una pieza de mucha altura, para evitar las fugas de calor, puesto que la placa va descendiendo mientras se va formando la pieza.

Es la placa la que se mueve en el eje Z y el cabezal el que se mueve en los ejes X e Y, por ello según va ascendiendo la pieza va bajando la placa y más área de puerta debe mantener el calor.

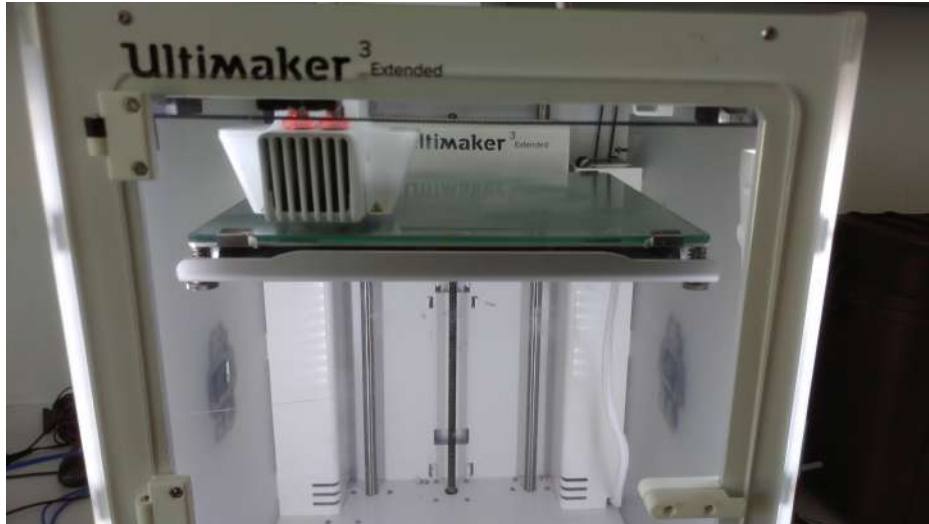


Imagen 3.1.1: Placa de impresión con respecto a la puerta.

### 3.1.2 Diseño de la cubierta superior

El diseño de la cubierta superior tiene varios objetivos. El primero es hacer de barrera al calor que asciende de la placa de impresión, y el segundo mantener la temperatura dentro de la cámara sin fugas.

La cubierta esta formada por 6 piezas de metacrilato de 10 mm de espesor unidas entre si por tornillos y escuadras. Las escuadras están diseñadas para estar ser impresas con la misma impresora.

Los planos de las piezas de metacrilato están adjuntas en el anexo 3.

Los materiales necesarios para el montaje de la cubierta son:

- 6 Planchas de metacrilato (planos en anexo 3).
- 4 Escuadras de ABS
- 41 Tornillos M5x20
- 55 Arandelas para M5
- 18 Tuercas para M5
- 2 Trozos de piel de 6x10cm



Utilizamos los trozos de piel para mantener aislado lo que podamos el cerramiento pero dejando que los tubos de arrastre de material se muevan sin restricción.

Las arandelas se utilizarán siempre que la cabeza del tornillo toque con el metacrilato o la piel para repartir la presión y no dañar el material. En el caso de tocar el tornillo con la escuadra de ABS no hará falta utilizar arandela.

Las escuadras las vamos a imprimir en ABS en la propia impresora. Hay tres diseños de escuadras. Dos escuadras para la parte frontal de la estructura y una para cada parte posterior.

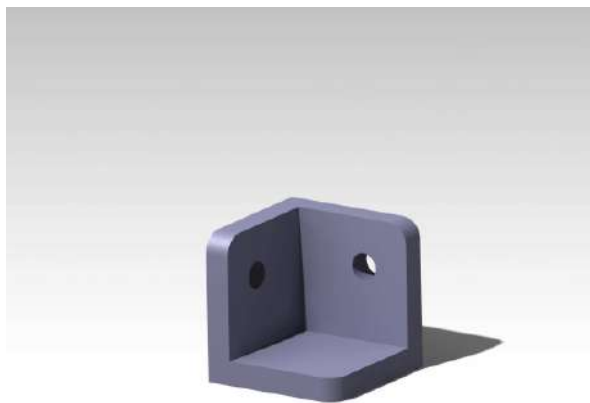


Imagen 3.1.2.1: Escuadras delanteras.

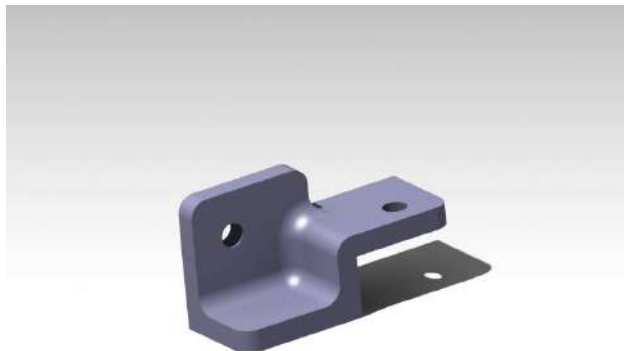


Imagen 3.1.2.2: Escuadra trasera izquierda.

Para un anclaje correcto de la cubierta superior, las escuadras deben asentarse sobre la impresora. Además, las planchas laterales están sobre los extremos de la impresora.

Una vez montadas las dos cubiertas tendremos aislada la cámara de la impresora por completo.

### 3.1.3 Resistencia y ventilador

Para alcanzar altas temperaturas en la cámara de impresión se va a incorporar al diseño una resistencia de calor y un ventilador que homogeneice las temperaturas por toda la impresora.

Partes del diseño:

- 5 metros de resistencia de silicona flexible de 150 Vatios.
- Ventilador 92x92x25mm que gira a 2230 rpm.
- Termostato.
- Cableado.

La resistencia se incorpora en la parte frontal del ventilador. El aire impulsado por el mismo choca con la resistencia en donde se calienta y acaba repartiéndose por la cámara de impresión.



Imagen 3.1.3.1: Resistencia flexible en ventilador.

El ventilador se conecta a la corriente eléctrica y la resistencia al termostato que es el que controla su funcionamiento.

El funcionamiento es simple, se controla la temperatura que se quiere conseguir en la cámara de impresión con el termostato. La resistencia funciona mientras la temperatura registrada por la sonda se mantenga por debajo de lo puesto en el termostato.

La sonda de temperatura la ponemos dentro de la cámara de impresión cerca del cabezal. La temperatura de la ubicación de la sonda debe de ser representativa de la temperatura de la cámara.

El ventilador y la resistencia las vamos a incorporar dentro del cerramiento superior. El cerramiento se ha diseñado para dejar un hueco en la parte trasera en donde se acopla el ventilador mediante tornillos. Este diseño permite que se reparta el calor de forma homogénea por la cámara de impresión.

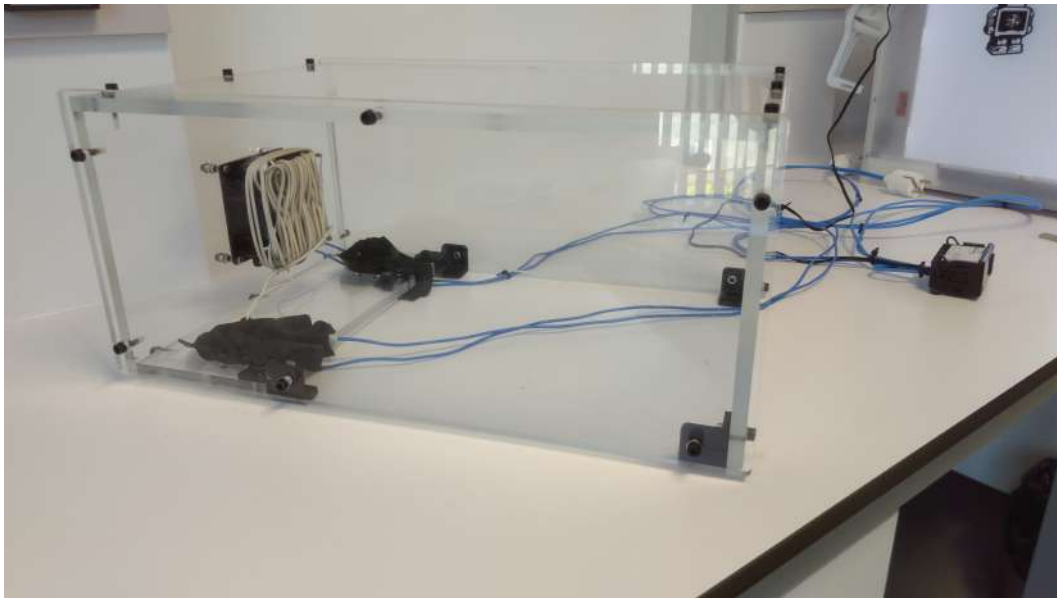


Imagen 3.1.3.2: Estructura superior con ventilador y resistencia.

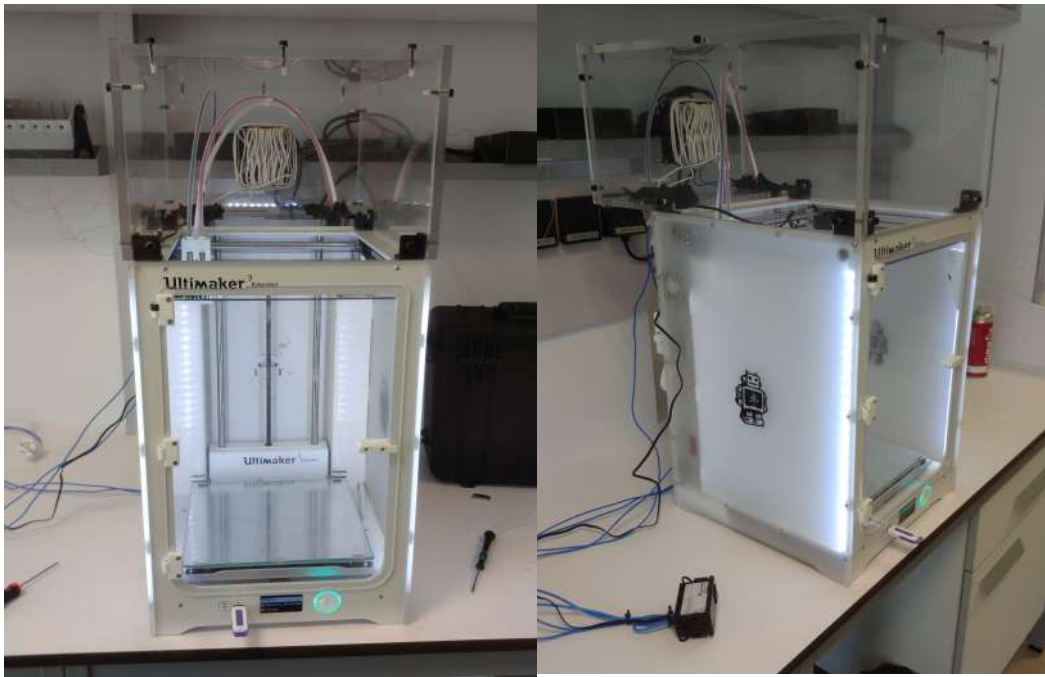


Imagen 3.1.1.3: Impresora con todos los diseños.

### 3.2 Medida de temperatura en la cámara de impresión

Para observar como mejoran las temperaturas durante la impresión vamos a medir las mismas a lo largo de la cámara mientras vamos implementando los diseños.

El objetivo es mantener la temperatura de la cámara de impresión lo más alta y estable posible, cumpliendo las necesidades de las piezas pero sin pasarnos para no dañar los materiales de la impresora. El fabricante Ultimaker nos recomienda no pasarnos de 60°C.

#### 3.2.1 Temperatura de la cámara sin cubierta

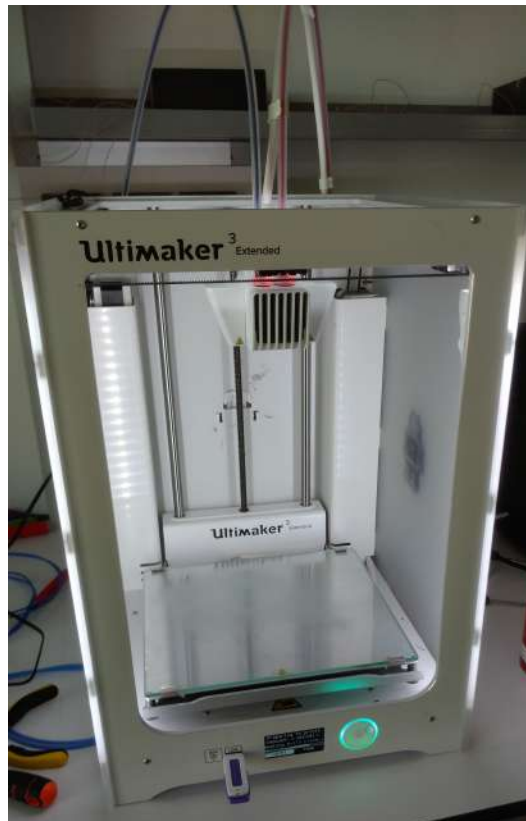


Figura 3.3.1: Impresora Ultimaker por defecto.

La impresora Ultimaker por defecto imprime al aire, ya que no tiene ningún tipo de cerramiento, por lo que la temperatura de impresión será la de la sala donde esté instalada exceptuando en las primeras capas en donde la temperatura depende del calor que se genere en la placa de impresión.

La impresora está instalada en el edificio L.U.C.I.A. perteneciente a la Universidad de Valladolid, en el Campus Universitario Miguel Delibes.

La temperatura de los laboratorios del edificio está controlada por un climatizador y habitualmente ronda los 21-22°C.

### 3.2.2 Temperatura de la cámara con cubierta superior y puerta frontal

Para medir la temperatura se ha utilizado como cerramientos la puerta proporcionada por Ultimaker y un cerramiento superior también proporcionado por Ultimaker. Este último cerramiento tiene aberturas en sus uniones provocando que existan fugas. Es por ello que se ha diseñado el cerramiento superior específico, para suplir las carencias del de fábrica.

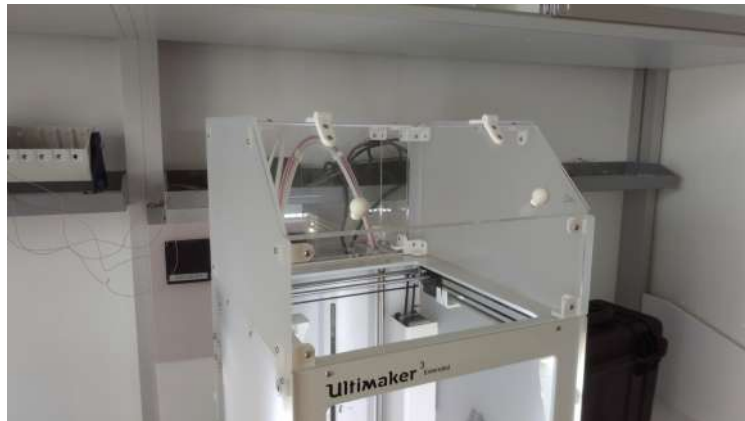


Imagen 3.2.2.1: Cerramiento superior proporcionado por Ultimaker.

Para medir la temperatura dentro de la cámara de impresión utilizaremos un sistema de medida, el sistema comprende de cuatro termopares tipo T, un chasis y una tarjeta de adquisición de datos de la marca “National Instruments”. El chasis hace de conector entre el ordenador y la tarjeta de adquisición de datos.

Con el software “Labview”, el cual está desarrollado para la instrumentación de datos, se realiza un programa en el ordenador que permite a la tarjeta de adquisición utilizar los termopares para el registro de datos, para posteriormente exportarlos de nuevo al ordenador.

Pondremos la cama a 60° y 100° centígrados, utilizaremos una base plástica para poner los termopares a distintas alturas, desde 1 centímetro hasta 28 centímetros.

La base la pondremos en 6 posiciones distintas en la placa, para comprobar que zonas se calientan más y la homogeneidad de la misma.

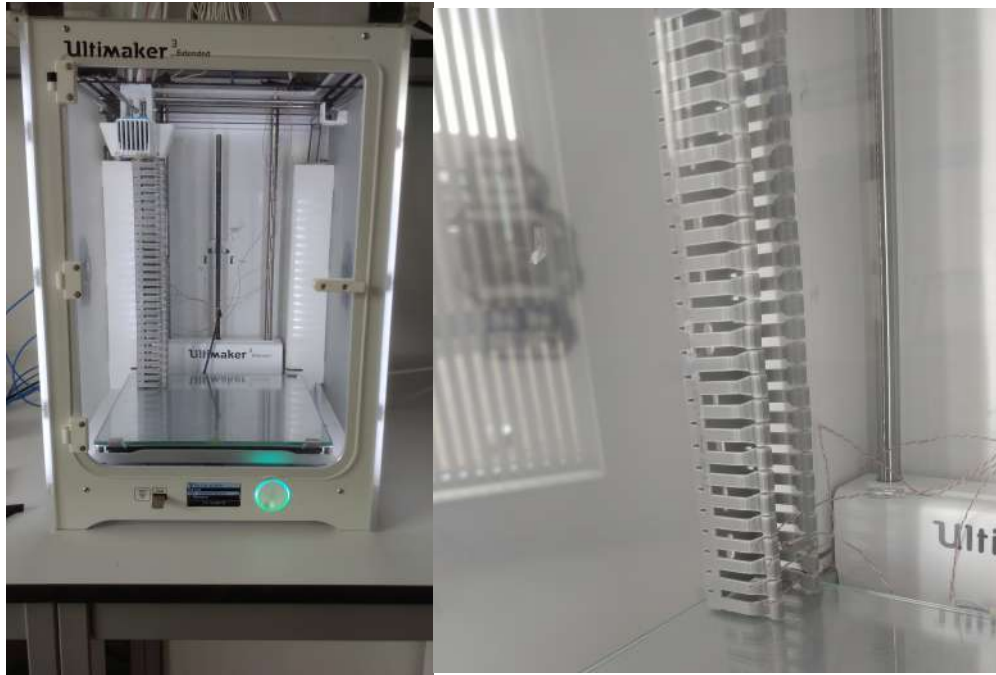
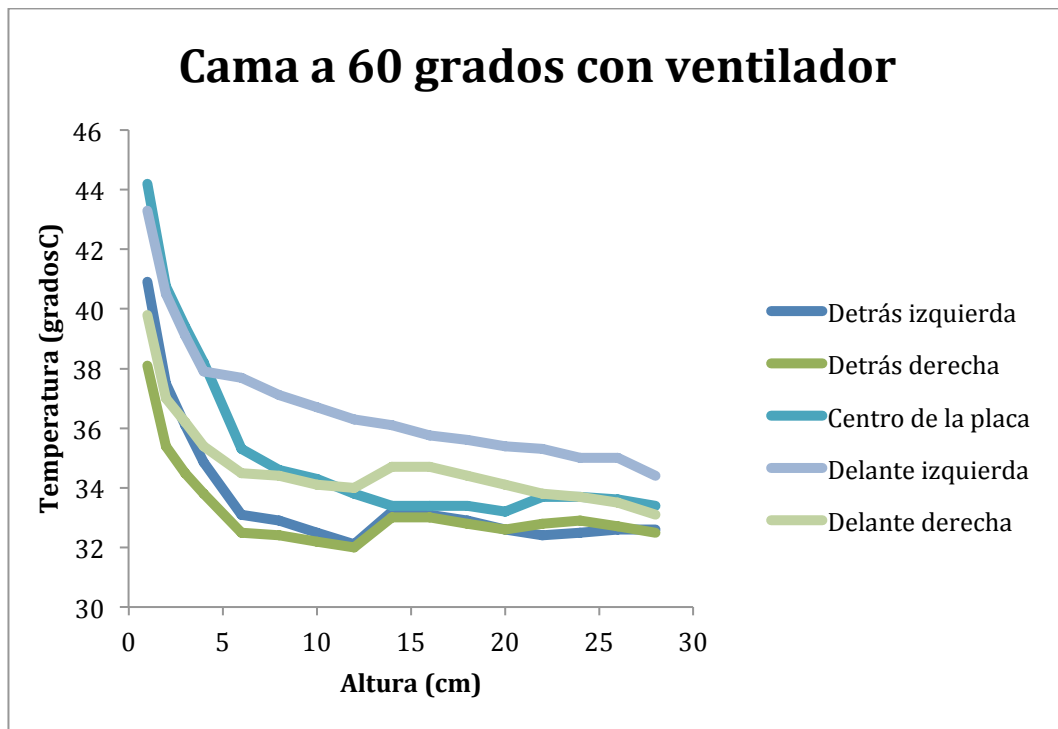


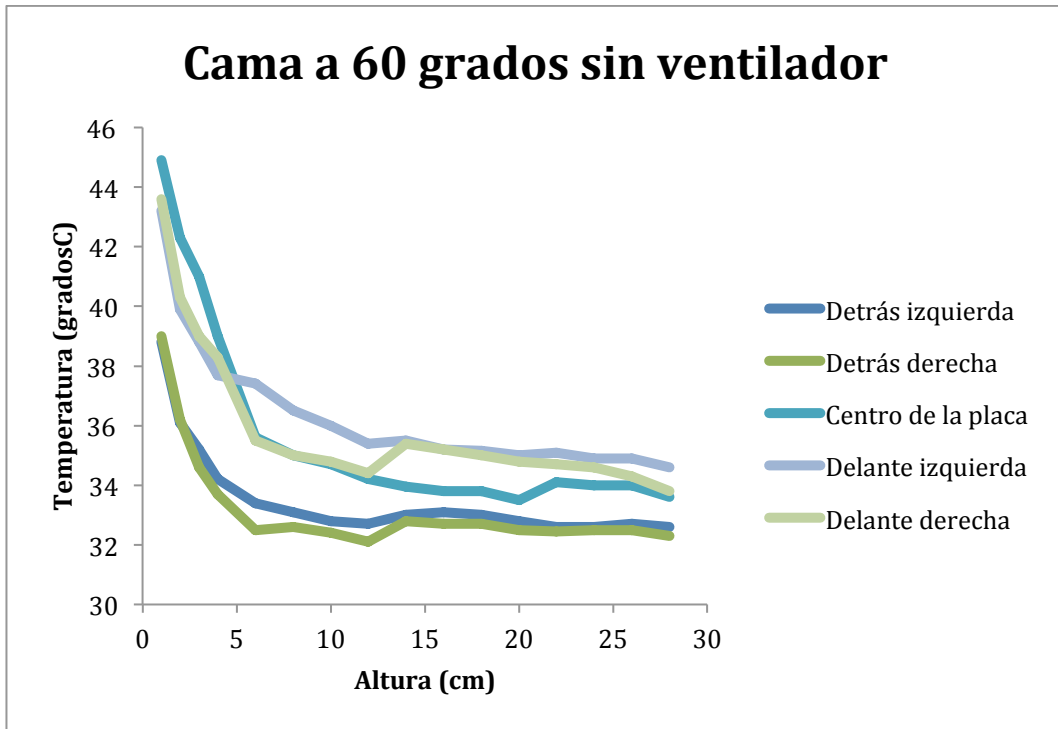
Imagen 3.2.2.2: Termopares puestos en la base plástica.

Se utilizará también un ventilador para ver si se estabilizan mejor las temperaturas. Los resultados se muestran a continuación.

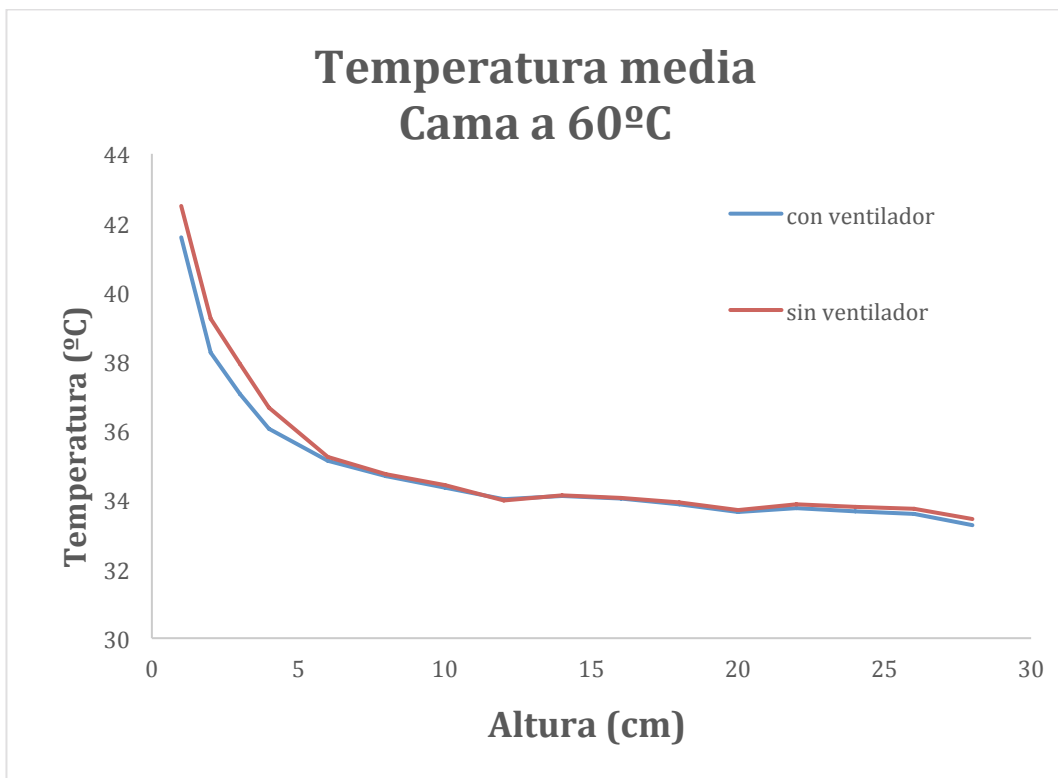
### 3.3.2.1 Cama a 60 grados



Gráfica 3.3.2.1: Temperatura-altura en cámara de impresión cama a 60° con ventilador.



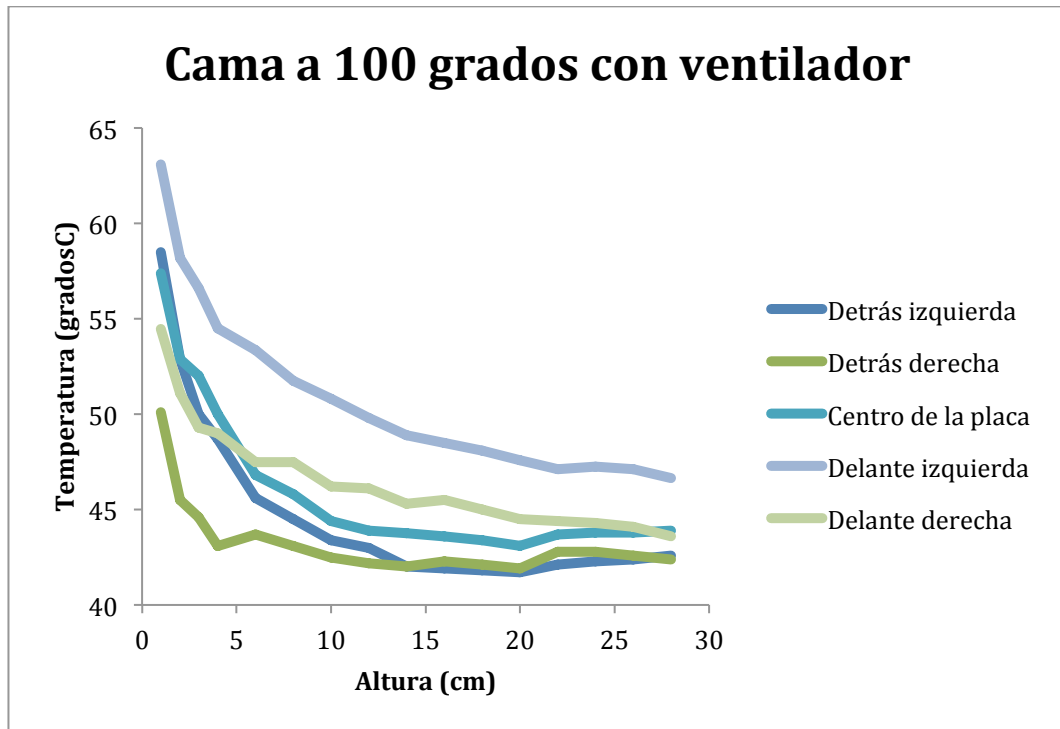
Gráfica 3.3.2.1: Temperatura-altura en cámara de impresión cama a 60° sin ventilador.



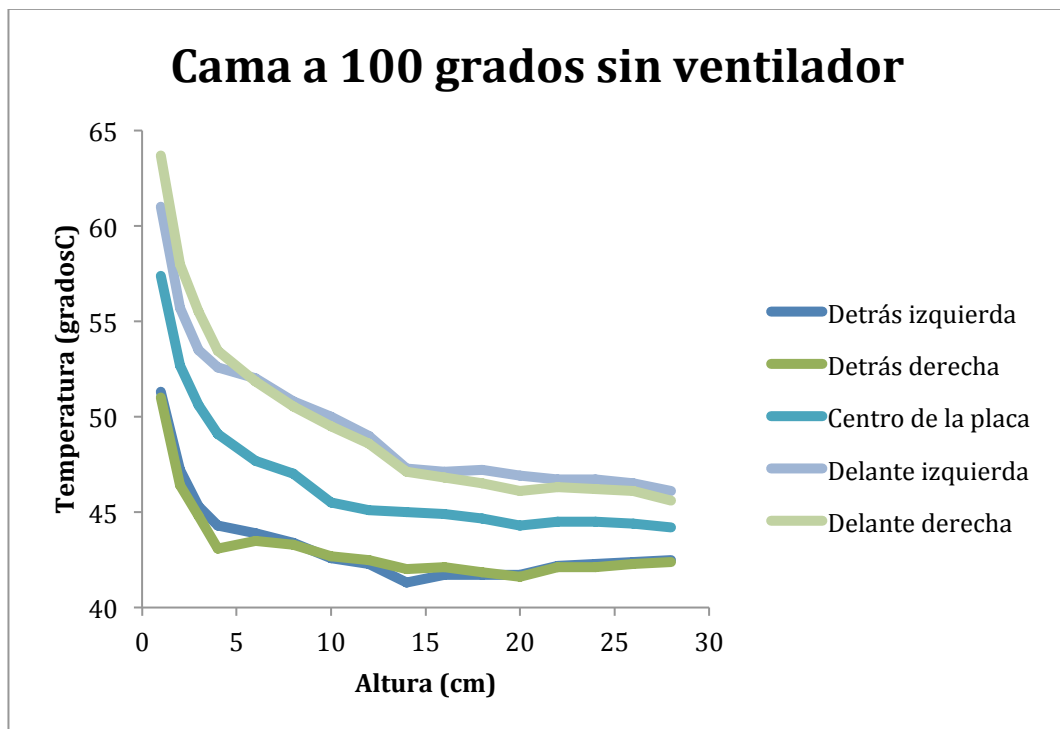
Gráfica 3.3.2.1: Temperatura media-altura en cámara de impresión cama a 60°.



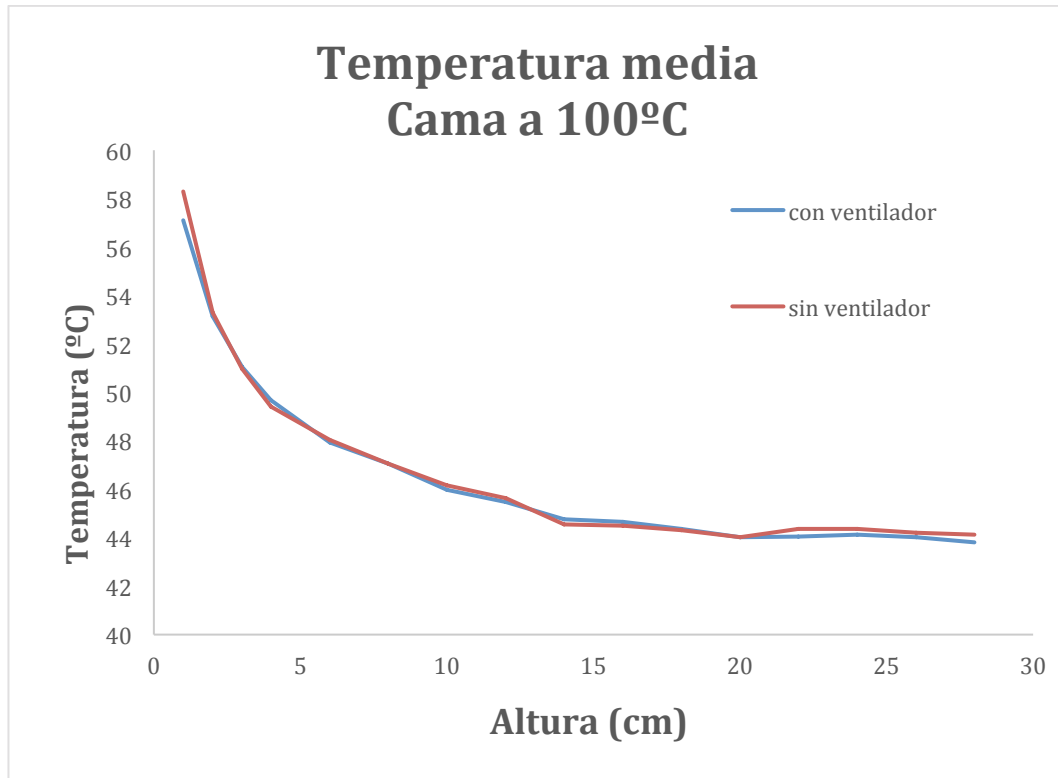
3.3.2.2. Cama a 100 grados



Gráfica 3.3.2.2: Temperatura-altura en cámara de impresión cama a 100° con ventilador.



Gráfica 3.3.2.2: Temperatura-altura en cámara de impresión cama a 100° sin ventilador.



Gráfica 3.3.2.2: Temperatura media-altura en cámara de impresión cama a 100° .

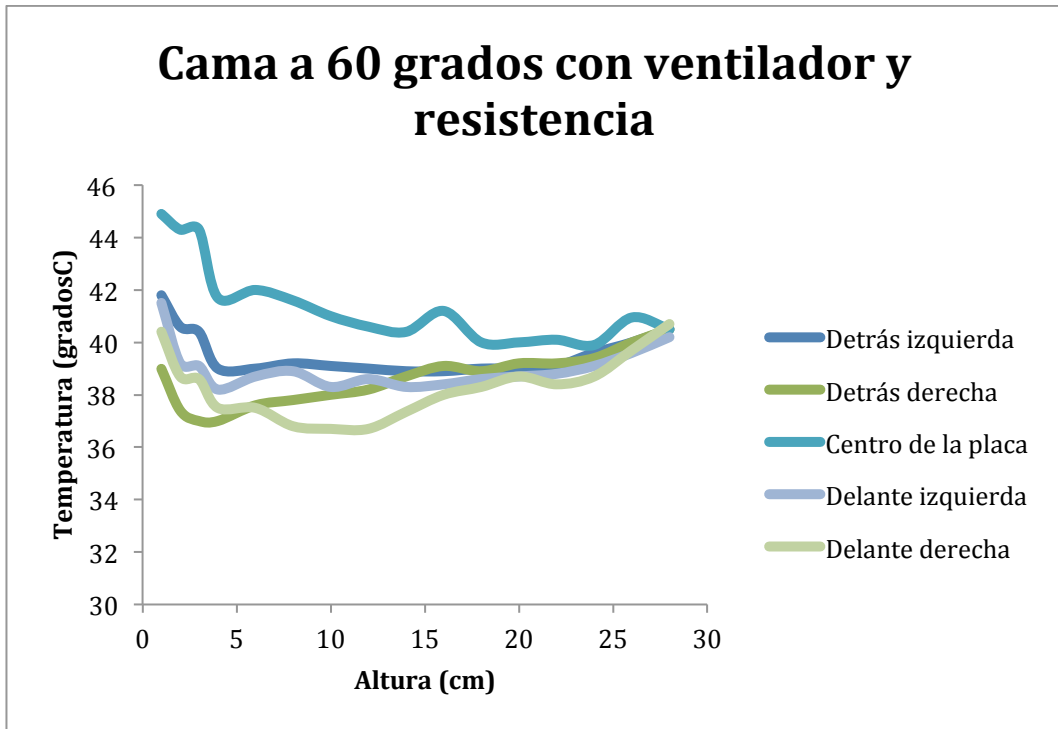
Con los cerramientos alcanzamos unas temperaturas más altas que imprimiendo al aire, sin embargo, no se consiguen unas temperaturas uniformes. Sí conseguimos temperaturas bastante altas sobre todo hasta los 50 primeros milímetros desde la placa de impresión pero aún así es insuficiente para los objetivos que tenemos.

Nuestro objetivo es alcanzar hasta 60 grados en toda la cámara de manera estable, para ello vamos a necesitar la incorporación del cerramiento superior sin fugas y de una resistencia que nos dé ese calor que nos falta aún para estabilizar toda la cámara.

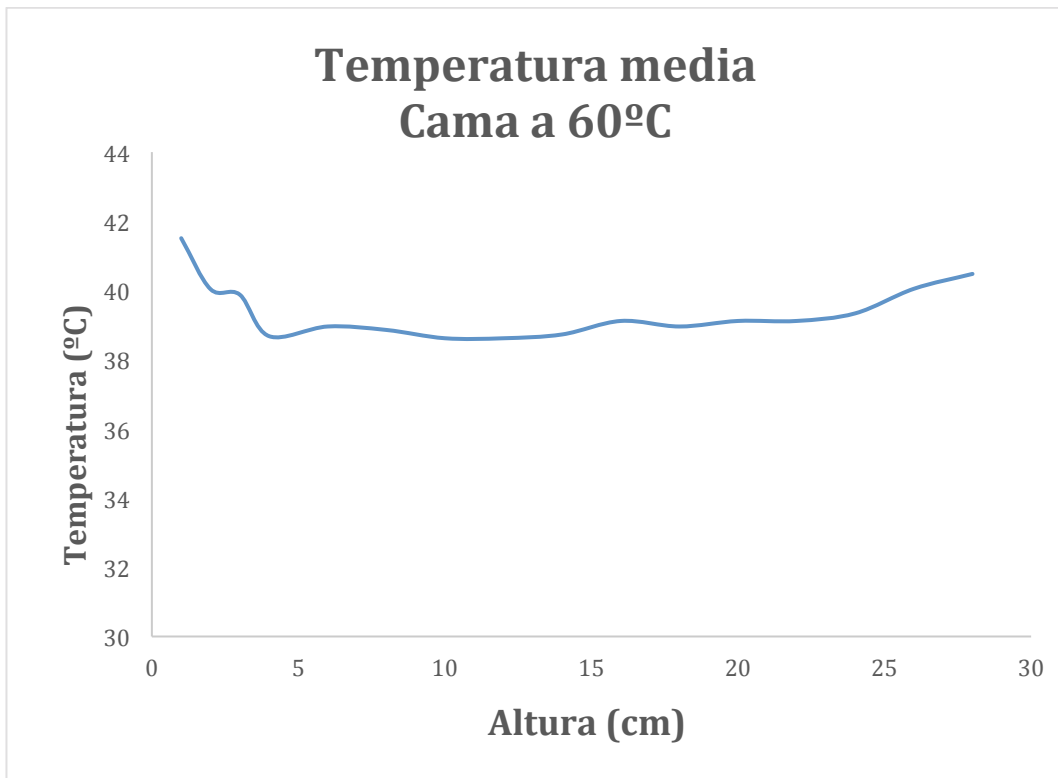
### 3.2.3 Temperatura de la cámara con todos los diseños

Una vez se incorpora el cerramiento específico, junto con la resistencia y el ventilador realizamos el mismo experimento que en el punto 3.2.2.

Los resultados que se alcanzan son:



Gráfica 3.2.3.1: Temperatura-altura en cámara de impresión cama a 60° con ventilador y resistencia.

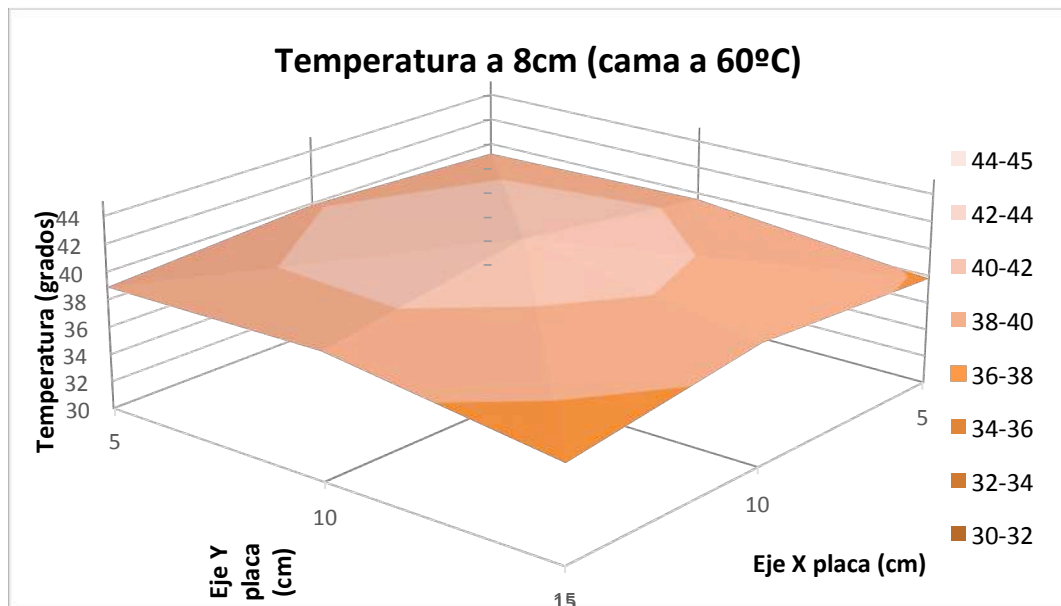


Gráfica 3.2.3.2: Temperatura media-altura en cámara de impresión cama a 60° con ventilador y resistencia.

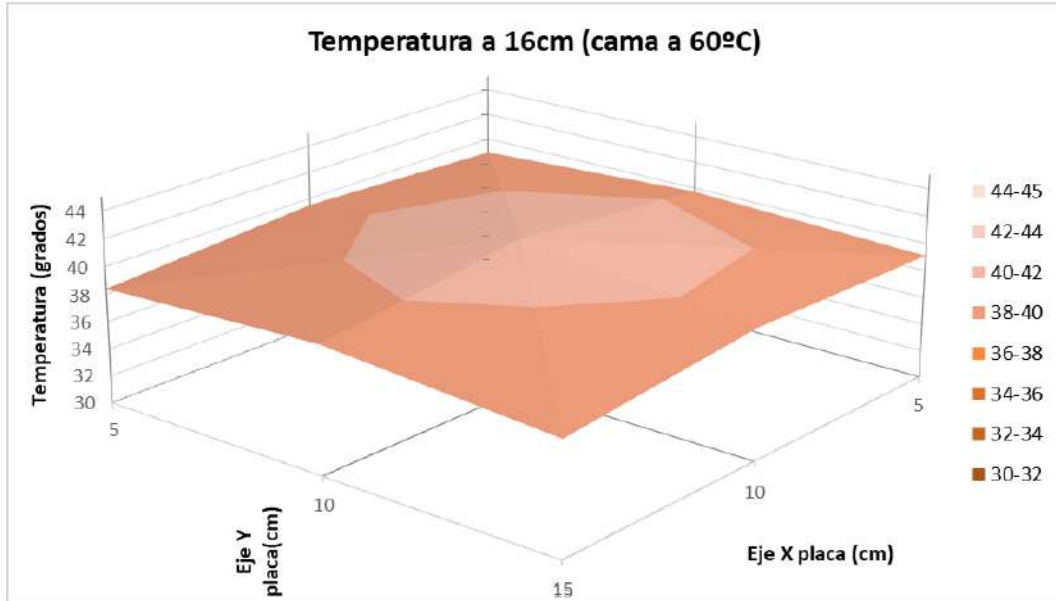
El experimento no es del todo realista, puesto que está realizado con la placa de impresión abajo del todo.

La cama empieza arriba al comienzo de la impresión y durante la impresión la extrusión del material va a ser siempre arriba del todo. Además la resistencia esta colocada en la parte superior, es por ello que en la gráfica 3.2.3.2 a gran altura aumenta la temperatura. Esto provoca que sea más fácil mantener y alcanzar las temperaturas altas que se requieren durante una impresión real. Esto se va a ver más claro en las gráficas posteriores (gráficas 3.2.3.3, 3.2.3.4 y 3.2.3.5), en ellas se observa que las temperaturas por toda la placa son más estables cuando la altura es mayor, y por tanto, en una impresión real en donde el material se extruye en la parte más alta, las temperaturas serán homogéneas.

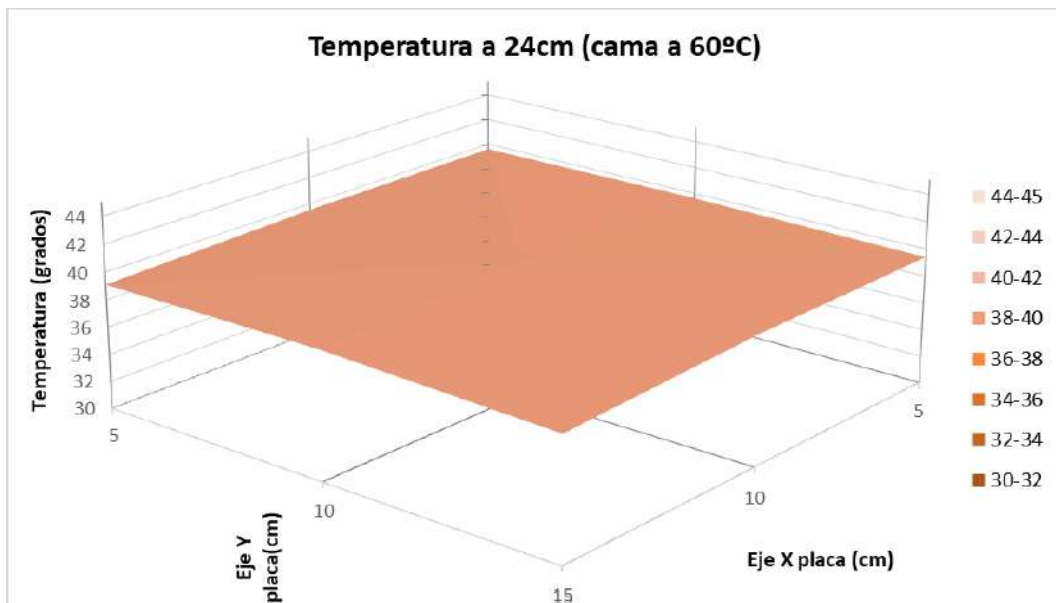
Para que se vea la uniformidad de manera más representativa se van a mostrar continuación varias representaciones 3D de las temperaturas sobre el área de la placa. Esta representación se va a hacer en tres alturas distintas, en  $z=8\text{cm}$ ,  $z=16$  y  $z=24$ , con el objetivo de analizar la homogeneidad de las temperaturas con la altura.



Gráfica 3.2.3.3: Temperatura sobre la placa a una altura de 8cm.



Gráfica 3.2.3.4: Temperatura sobre la placa a una altura de 16cm.



Gráfica 3.2.3.5: Temperatura sobre la placa a una altura de 24cm.

En vista a todos los datos que he recogido en los experimentos en el laboratorio, puedo afirmar que con las modificaciones introducidas por nosotros en la impresora, hemos conseguido que se alcancen temperaturas uniformes en la cámara de impresión, de esta forma podemos imprimir piezas a una temperatura constante durante todo el tiempo de su formación.

### 3.3 Consecuencias

El primer objetivo lo hemos alcanzado. Se ha conseguido que en la cámara de impresión se mantenga la temperatura homogénea y alta.

Una vez resuelto podremos analizar la resistencia mecánica y la precisión dimensional de las piezas.

Dependiendo del material que escojamos para la pieza debemos elegir una temperatura en la cámara de impresión u otra. Las limitaciones que existen son la temperatura máxima que pueden soportar los componentes de la Ultimaker y la temperatura que al imprimir puede provocar deformaciones o cambios en la pieza durante su formación.

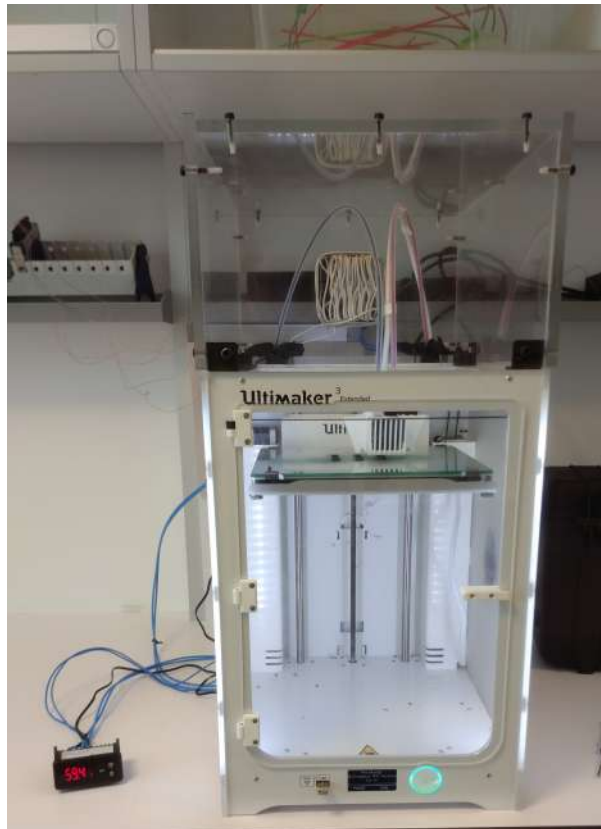


Imagen 3.3: Impresora funcionando con control de temperatura.

Teniendo en cuenta estas limitaciones debemos intentar conseguir que el tiempo de unión entre capas de material por encima de su temperatura de transición vítrea sea lo mas grande posible (2.1.3) y para ello controlaremos la temperatura de la cámara durante la impresión.

## 4. Ensayos

Para analizar la influencia de la temperatura ambiente de impresión en la resistencia mecánica y en la precisión dimensional de las piezas, se van a medir y a ensayar a flexión unas probetas impresas a distinta temperatura ambiente de impresión. Las probetas van a ser exactamente iguales, mismas dimensiones y parámetros exceptuando la temperatura de la cámara de impresión.

### 4.1 Probetas

Imprimiremos dieciséis probetas prismáticas de ABS HI (propiedades en anexo 2) de volumen teórico 40x10x150mm. Las probetas se van a imprimir en vertical, es decir, las uniones entre capas son las que van a dictaminar la resistencia de la probeta.

Los parámetros de impresión más importantes de las probetas son:

- Altura de capa: 0,2mm. Buscamos que la impresión sea lenta pero de buena calidad.
- Altura de capa inicial: 0,27mm.
- Grosor de la pared: 1,3mm.
- Densidad de relleno: 30%.
- Temperatura de impresión: 235°C.
- Temperatura de la placa de impresión: 80°C.
- Flujo: 100%.
- Velocidad de impresión: 55mm/s.
- Tipo de adherencia en la placa de impresión: Laca de pegado Dimafix.

Dentro de las dieciséis probetas totales, se van a dividir las mismas en:

- Cuatro probetas impresas en el centro de la placa, sin cerramientos y por tanto a temperatura ambiente de 21°C aproximadamente.
- Cuatro probetas impresas en el centro de la placa elegida una temperatura de la cámara de 40°C.
- Cuatro probetas impresas en el centro de la placa elegida una temperatura de la cámara de 60°C.

- Cuatro probetas impresas en las cuatro esquinas de la placa elegida una temperatura de la cámara de 60°C. Las compararemos con las impresas en el centro de la placa.

Se eligen distintas temperaturas de impresión para poder analizar la resistencia mecánica y su precisión con la temperatura. También se ha decidido realizar probetas en las distintas posiciones de la placa de impresión para observar si su posición en la cámara afecta a su resistencia mecánica o a su precisión dimensional.



Imagen 4.1.1: Probetas impresas a lo largo de la placa.



## 4.2 Definición del ensayo

Es muy importante que durante los ensayos la realización sea de igual forma para todas las probetas, con el fin de minimizar los errores que podamos cometer y para que la comparación posterior sea posible.

### 4.2.1 Ensayo a flexión

La forma más precisa de medir la resistencia de la unión entre capas sería hacer un ensayo de tracción, como no disponemos de una máquina de ensayos se ha decidido ensayarlo a flexión de la manera explicada posteriormente, ya que es representativo de lo que queremos demostrar.

Se van a empotrar las probetas en uno de sus extremos, en el otro extremo se ejercerá una fuerza ascendente perpendicular hasta que la probeta rompa. Previsiblemente romperá en el empotramiento debido a que es la zona más crítica porque su tensión es máxima.

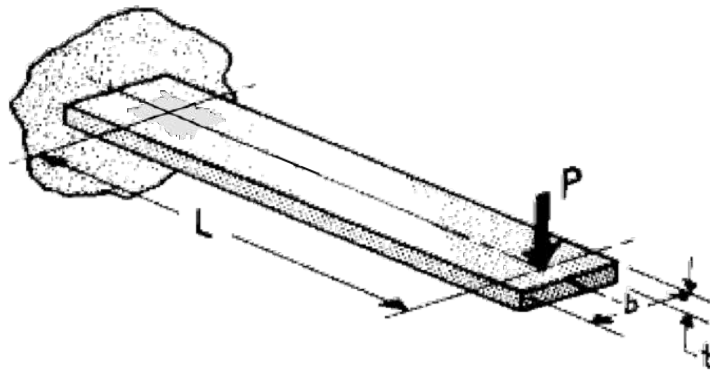


Imagen 4.2.1.1: Probeta empotrada. (Asignatura diseño avanzado de máquinas. Prácticas de extensometría. Universidad de Valladolid).

La distancia L escogida en las probetas es de 100mm, y los valores de b y t son 40 y 10mm, respectivamente.

Para medir la fuerza P que se alcanza hasta que rompe la probeta vamos a utilizar un dinamómetro “Handifor” que tiene una precisión de  $\pm 5\text{N}$ . Durante el ensayo se va a utilizar una mordaza que hará de actuador ejerciendo la fuerza sobre la probeta.



De cada tipo de probeta se van a empotrar dos de ellas por el lado inferior al impreso y dos por el superior.

La parte superior de las probetas es más propensa a ser menos resistente, sobretodo en las piezas impresas a temperatura ambiente, debido a la diferencia de temperaturas a la que se forma cada parte. En los resultados se definirá como empotramiento inferior cuando empotremos la probeta por el lado más cercano a la placa, y empotramiento superior cuando lo empotremos por el lado mas alejado.

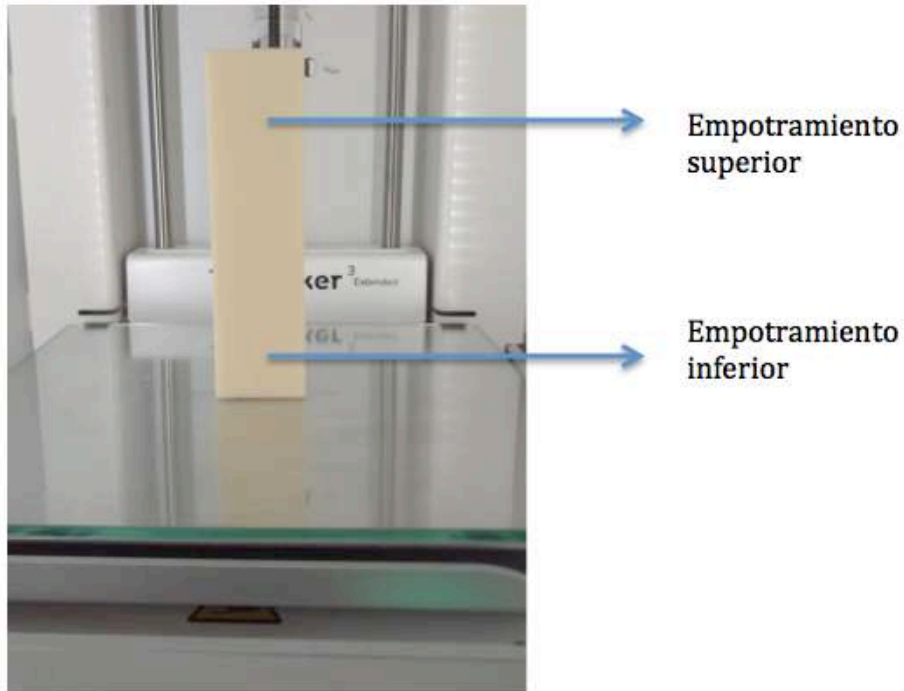


Imagen 4.2.2.3: Probeta impresa en el centro de la placa.

#### 4.2.2 Ensayo dimensional

En cuanto a la precisión dimensional de las probetas, se van a comparar las dimensiones reales y teóricas (10x40x150mm) de las mismas.

Para medir las dimensiones reales vamos a utilizar un pie de rey analógico de la marca "Métrica" el cual tiene una precisión de  $\pm 0,05\text{mm}$ .

Para la comprobar las dimensiones de las probetas se van a hacer 4 medidas a lo largo de la probeta en las 3 dimensiones que queremos medir, por ejemplo, si se va a medir el eje Z se medirán los valores en  $y=0,5\text{cm}$ ,  $y=1,5\text{cm}$ ,  $y=2,5\text{cm}$  e  $y=3,5\text{cm}$ . Una vez tenemos las 4 medidas haremos la media y es el valor que escogeremos como medida real de la probeta.

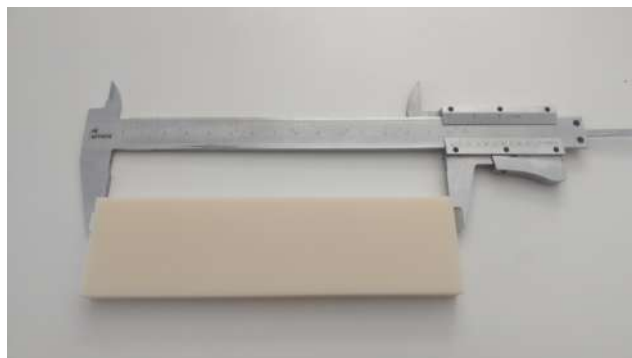


Imagen 4.2.2: Medida en  $y=1,5\text{cm}$  del eje Z

Para que se entienda el procedimiento se va a explicar con un ejemplo el ensayo hecho para la probeta N°1 (4.4.3).

| Eje      | Dimensiones medidas (mm) | Dimensiones reales (mm) |
|----------|--------------------------|-------------------------|
| <b>x</b> | 10,5                     | 10,5                    |
|          | 10,5                     |                         |
|          | 10,45                    |                         |
|          | 10,55                    |                         |
| <b>y</b> | 40,85                    | 40,8                    |
|          | 40,8                     |                         |
|          | 40,75                    |                         |
|          | 40,8                     |                         |
| <b>z</b> | 150,4                    | 150,3                   |
|          | 150,2                    |                         |
|          | 150,2                    |                         |
|          | 150,4                    |                         |

Gráfica 4.2.3: Medidas de la probeta N°1.

Este procedimiento es el que se llevará a cabo para medir todas las probetas.

### 4.3 Resistencia teórica de las probetas

Con el fin de poder hacernos una idea de las fuerzas que soportan las probetas durante su ensayo se va a realizar una aproximación teórica.

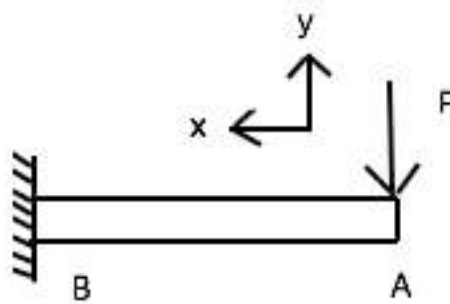


Imagen 4.3.1: Probeta empotrada.

La distancia entre el empotramiento y la fuerza es de 100mm. La sección de la probeta es rectangular de 40x10mm, con un relleno interno del 30% y una pared de 1,3mm.



Imagen 4.3.2: Sección de la probeta.

Para calcular su momento de inercia de área utilizamos la aproximación de que toda la superficie de relleno esta colocada de forma homogénea por la probeta, es decir, que la superficie interior está formada por un rectángulo de área un 30% de la real.

$$I_z = \frac{bt^3}{12} - \frac{(b-2,6)(t-2,6)^3}{12} + 0,3 \frac{(b-2,6)(t-2,6)^3}{12} = 2449,27mm^4$$

Los valores de las reacciones en B son:

$$V_B = F$$

$$M_{z_B} = FL$$

Realizamos la suposición de que el esfuerzo axial es despreciable, y por tanto:

$$\sigma = \frac{M_z y}{I_z}$$

El ABS HI tiene una resistencia teórica a flexión de 59 Mpa, la fuerza máxima que podría soportar la probeta estará donde se produzca el momento máximo (empotramiento).

$$\sigma = \frac{M_z y}{I_z} = \frac{F L y}{I_z}$$

$$F_{max} = \frac{\sigma I_z}{L y} = \frac{59 \times 2449,27}{100 \times 5} = 289 \text{ N}$$

Obviamente en ningún caso vamos alcanzar este valor teórico, las resistencia de las piezas impresas de forma vertical dependen de la calidad de las uniones entre capas y el valor teórico está caracterizado para un material homogéneo.

Lo que se quiere con esta resolución es que se entiendan las fuerzas que se forman durante el ensayo en la probeta. La realidad es que la calidad de la unión entre capas es la que dictamina la resistencia real de la probeta ensayada en nuestro caso, debido a la forma de impresión de las probetas.

## 4.4 Resultados

En los siguientes apartados se muestran los resultados de los ensayos de las probetas (4.1) de dimensiones teóricas 10x40x150mm.

| Probeta nº | Ubicación en la placa       | Tipo de empotramiento | Temperatura de la cámara (°C) |
|------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1          | Central                     | Superior              | 21                            |
| 2          | Central                     | Superior              | 21                            |
| 3          | Central                     | Inferior              | 21                            |
| 4          | Central                     | Inferior              | 21                            |
| 5          | Central                     | Superior              | 40                            |
| 6          | Central                     | Superior              | 40                            |
| 7          | Central                     | Inferior              | 40                            |
| 8          | Central                     | Inferior              | 40                            |
| 9          | Central                     | Superior              | 60                            |
| 10         | Central                     | Superior              | 60                            |
| 11         | Central                     | Inferior              | 60                            |
| 12         | Central                     | Inferior              | 60                            |
| 13         | Esquina trasera derecha     | Superior              | 60                            |
| 14         | Esquina trasera izquierda   | Superior              | 60                            |
| 15         | Esquina delantera derecha   | Superior              | 60                            |
| 16         | Esquina delantera izquierda | Superior              | 60                            |

Tabla 4.4: Numeración y características de las probetas.

### 4.4.1 Defectos de las probetas

Una vez se han impreso todas las probetas, a nivel visual podemos encontrar diferencias entre las mismas.



Imagen 4.4.1: Probetas de lado, de izquierda a derecha fabricadas a 21°C, 40°C y 60°C respectivamente.

Se observa que la probeta impresa a temperatura ambiente presenta entallas. Esto es debido al alto coeficiente de contracción del ABS. La presencia de estas entallas no nos va a permitir realizar los ensayos de forma realista en este tipo de probetas, debido a que el factor de concentración de cargas aumenta y la resistencia de la probeta disminuye.

El resto de probetas no presentan ningún tipo de entalla que pueda afectar a su resistencia mecánica.

#### 4.4.2 Resistencia mecánica

| Probeta nº | Fuerza máxima hasta rotura (N) | Tensión máxima hasta rotura (MPa) |
|------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1          | 5                              | 1,02                              |
| 2          | 5                              | 1,02                              |
| 3          | 10                             | 2,04                              |
| 4          | 10                             | 2,04                              |
| 5          | 90                             | 18,37                             |
| 6          | 85                             | 17,35                             |
| 7          | 115                            | 23,48                             |
| 8          | 95                             | 19,39                             |
| 9          | 120                            | 24,50                             |
| 10         | 125                            | 25,52                             |
| 11         | 125                            | 25,52                             |
| 12         | 130                            | 26,54                             |
| 13         | 135                            | 27,56                             |
| 14         | 110                            | 22,46                             |
| 15         | 115                            | 23,48                             |
| 16         | 120                            | 24,50                             |

Tabla 4.4.2.1: Fuerza y tensión máxima soportada por las probetas.

| Probeta nº  | Fuerza media máxima hasta rotura (N) | Tensión media máxima hasta rotura (MPa) |
|-------------|--------------------------------------|---|
| 1,2,3,4     | 7,5                                  | 1,53                                    |
| 5,6,7,8     | 97,5                                 | 19,90                                   |
| 9,10,11,12  | 125                                  | 25,52                                   |
| 13,14,15,16 | 120                                  | 24,50                                   |

Tabla 4.4.2.2: Fuerza y tensión máxima media soportada por las probetas.



La fuerza de rotura y por tanto la tensión máxima aumenta con la temperatura de la cámara de impresión. Siendo muy notable la diferencia respecto de las probetas impresas a temperatura ambiente, esto es debido a las entallas que presentaban las mismas y a la mejora de la resistencia mecánica con la temperatura.

La resistencia de las probetas empotradas de forma superior es menor que las empotradas de forma inferior, esto es muy visible en las probetas a temperatura ambiente y menos visible en las probetas impresas a 40 y 60°C, esto es debido a la homogeneidad de las temperaturas en toda la cámara.

En cuanto a la comparación entre las probetas impresas a lo largo de la placa podemos apreciar una reducción muy pequeña entre la fuerza de rotura en las probetas impresas en las esquinas respecto a las impresas en el centro. La diferencia media entre ambas es de 5N, un valor muy pequeño teniendo en cuenta que el error del dinamómetro es  $\pm 5N$ , podemos afirmar por tanto que la posición de las probetas en la cámara de impresión no afecta a su resistencia mecánica.

Por último podemos comprobar que en ningún caso se alcanzan las tensiones máximas teóricas del material (59 MPa), debido a que ese valor está caracterizado para un material homogéneo, y en nuestro caso la calidad de la unión entre capas es la que dictamina el valor de la resistencia.

Se confirma entonces que aumentando la temperatura de la cámara conseguimos aumentar la resistencia mecánica de las piezas, ya que mejoramos la unión entre churros del material, esto, como ya explicamos (2.1.3) es debido a que se consigue aumentar el tiempo de difusión.

#### 4.4.3 Precisión dimensional

| Probeta<br>nº | Dimensiones reales (mm) |
|---------------|-------------------------|
| 1             | 10,5x40,8x150,3         |
| 2             | 10,5x40,6x150,2         |
| 3             | 10,5x40,5x150,2         |
| 4             | 10,4x40,5x150,2         |
| 5             | 10,4x40,5x149,9         |
| 6             | 10,5x40,5x149,7         |
| 7             | 10,4x40,4x149,9         |
| 8             | 10,5x40,5x149,8         |

|           |                 |
|-----------|-----------------|
| <b>9</b>  | 10,3x40,4x149,9 |
| <b>10</b> | 10,4x40,5x149,9 |
| <b>11</b> | 10,4x40,5x149,8 |
| <b>12</b> | 10,6x40,6x150,0 |
| <b>13</b> | 10,4x40,6x149,8 |
| <b>14</b> | 10,4x40,4x149,9 |
| <b>15</b> | 10,3x40,5x150,0 |
| <b>16</b> | 10,5x40,5x149,9 |

Tabla 4.4.3.1: Dimensiones reales de las probetas.

| <b>Probeta nº</b>  | <b>Dimensiones reales medias (mm)</b> |
|--------------------|---------------------------------------|
| <b>1,2,3,4</b>     | 10,475x40,600x150,225                 |
| <b>5,6,7,8</b>     | 10,450x40,475x149,825                 |
| <b>9,10,11,12</b>  | 10,425x40,500x149,900                 |
| <b>13,14,15,16</b> | 10,400x40,500x149,900                 |

Tabla 4.4.3.2: Dimensiones reales medias de las probetas.

La precisión dimensional depende de: la contracción del plástico extruido, de la presión de la boquilla sobre el material y de otros factores.

La contracción del plástico es un factor importante, aumentando la temperatura de la cámara evitamos la contracción brusca del material al salir, esto disminuye las tensiones y alabeos durante la formación de las piezas, lo que ayuda a evitar la formación de grietas u otras malformaciones. La contracción de las piezas esta afectada por su coeficiente de dilatación cúbica, este es un valor específico del material y depende del cambio de su volumen ante la variación de la temperatura.

La presión de la boquilla sobre el material deforma el chorro que sale, lo que provoca un aumento de su anchura y determina que en los extremos de las piezas exista una sobredimensión.

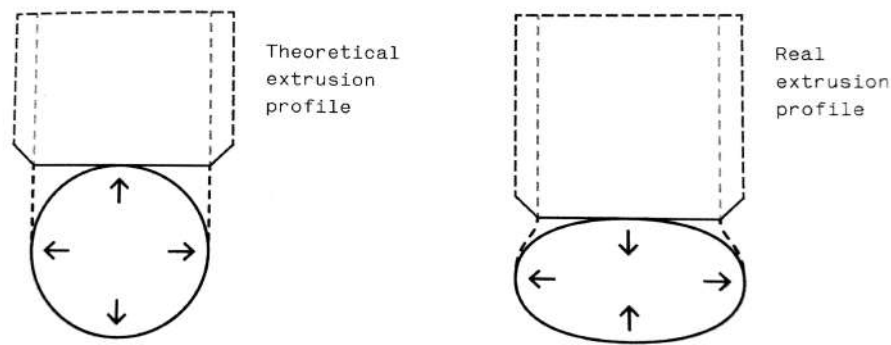


Imagen 4.4.3: Presión de la boquilla sobre el chorro extruido. (The 3D Printing Handbook, technologies, design and applications. Redwood B, Schöffner F, Garret B; 2017).

Los otros factores que pueden afectar a la precisión dimensional son la precisión de la máquina y los propios parámetros de la fabricación, como la temperatura de extrusión, la altura de capa o la velocidad del ventilador entre muchos otros, estos factores no van a afectar a la comparación entre nuestras probetas, puesto que todas ellas están impresas con los mismos parámetros.

Se puede comprobar en las gráficas 4.4.3.1 y 4.4.3.2 que los valores exceden entre 0,4 y 0,65mm del valor real en la anchura y largura de las probetas. Esta sobredimensión es debida principalmente a la presión que ejerce la boquilla sobre el material, para compensar estos efectos debemos modificar el parámetro de expansión horizontal del programa laminador (1.2.1).

Podemos observar también en las gráficas que aumentando la temperatura de la cámara, varían un poco los valores entre probetas en las tres direcciones de las mismas. La diferencia en altura de las probetas impresas con y sin control de temperatura las podemos achacar a que, en las probetas impresas a temperatura ambiente existen entallas, estas entallas son huecos pequeños que sumados entre todos provocan una sobredimensión. En cuanto a las diferencias en el resto de direcciones, los valores distantes son del orden de  $\pm 0,1\text{mm}$  en el mayor de los casos, no podemos definir que esta diferencia sea por la contracción gradual provocada en las probetas.

Es por tanto que no podemos concluir que un aumento de la temperatura de ambiente de impresión mejore la precisión dimensional de las piezas, aunque si podemos afirmar que mejora la calidad de las mismas al ayudar a evitar la formación de grietas y otros defectos en la pieza.



## 5. Conclusiones

En primer lugar se ha conseguido mantener en la cámara de la impresora una temperatura homogénea, esto significa que durante la fabricación de las piezas se puede escoger el valor de la temperatura que se quiera, teniendo por tanto el control de un parámetro clave más de los que teníamos al principio.

En segundo lugar, no podemos concluir que el control de temperatura mejore la precisión dimensional de las piezas, aunque si podemos afirmar que se pueden evitar la formación de entallas y otros defectos en las piezas impresas con control de temperatura, gracias a la contracción gradual provocada por el aumento de la temperatura de la cámara.

Y en último lugar, se puede confirmar que la resistencia mecánica de las piezas aumenta con el incremento de la temperatura de la cámara, puesto que se mejora la unión entre capas del material.

Los resultados por tanto de la realización del trabajo de fin de grado son satisfactorios, hemos comprobado que podemos mejorar la resistencia mecánica de las piezas y hemos analizado la precisión dimensional de las mismas, teniendo en cuenta la influencia de la temperatura de la cámara de impresión, por lo que hemos logrado el objetivo del trabajo.



## Bibliografía

- [1] Kai Chua C, Fai Leong K; 3D printing and additive manufacturing; Londres; 2017.
- [2] Callister WD; Introducción a la ciencia e Ingeniería de materiales; Barcelona 1996; tomo 2.
- [3] Seppala J.E, Migler K.D. Infrared thermography of welding zones produced by polymer extrusión additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 12. 2016; 71-76.
- [4] Coogan T.J, Kazmer D.O. Bond and part strength in fused deposition modeling. *Prototyping journal*. 2017; 414-422.
- [5] Ultimaker. Ultimaker Materials.  
<https://ultimaker.com/en/products/materials>. (10 de mayo del 2018)
- [6] Smarfill. SmartMaterials.  
<https://smartmaterials3d.com/es/smartfil-especiales/22.smartfil-hi-high-impact.html>  
(20 de junio del 2018)
- [7] Universidad de Valladolid. Asignatura diseño avanzado de máquinas. Prácticas de extensometría.
- [8] Redwood B, Schöffner F, Garret B; The 3d Printing Handbook, technologies, design and applications; Amsterdam; 2017.





## Anexos

### Anexo 1. Características Ultimaker Extended 3

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y PROPIEDADES DE ULTIMAKER 3 Extended</b> |   |
|--|---|
| Tecnología   | Fabricación con Filamento Fundido (FFF)                         |
| Cabezal de impresión   | Doble extrusor, con mecanismo retráctil en el segundo extrusor. |
|  | Extrusores fácilmente intercambiables.                          |
| Bandeja de impresión   | Boquilla Izquierda: 213 x 213 x 300 mm.                         |
|  | Boquilla Derecha: 213 x 213 x 300 mm.                           |
|  | Doble extrusor: 197 x 215 x 300 mm.                             |
| Diámetro del filamento   | 2.85mm.   |
| Resolución de capa   | Boquilla 0.4mm: 20-200 micras                                   |
| Precisión X, Y, Z  | 12.5, 12.5, 2.5 micras  |
| Velocidad recorrido del cabezal  | 30 – 300 mm/s.  |
| Velocidad del flujo de material  | 0.40: 16mm <sup>3</sup> /s                                      |
| Materiales Ultimaker   | PLA, PVA, ABS, CPE y Nylon                                      |
| Diámetro de boquilla   | 0.4mm.  |
| Temperatura de boquilla  | 180 – 280 °C  |
| Temperatura bandeja de impresión                                       | 20 – 100 °C   |
| Tiempo de calentamiento de boquilla                                    | < 2 minutos   |
| Tiempo de calentamiento bandeja  | < 4 minutos (20 – > 60 °C)                                      |
| Nivel de ruido   | 50 dBA  |
| Cambio de boquilla extrusor  | Sistema push & clic: fácilmente intercambiables                 |
| Sistema de Filamento   | Abierto, con soporte para 2 bobinas de 750g incluido.           |
|  | Sistema NFC para detectar automáticamente el tipo de material   |
| Conectividad   | WiFi, Ethernet y USB  |
| Nivelación de bandeja de impresión                                     | Sistema de nivelación automático                                |
| Cámara de vídeo  | Integrada   |

| <b>DIMENSIONES FÍSICAS</b>        |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| Impresora con accesorios montados | 49,3 x 33,8 x 68,8 cm. |
| Impresora sin accesorios montados | 35,3 x 33,8 x 48,8 cm. |
| Peso Neto                         | 11,3 Kg.               |

| <b>REQUISITOS ELÉCTRICOS</b> |                |
|------------------------------|----------------|
| Input                        | 100 – 240V     |
|                              | 4A, 50-60Hz    |
|                              | 221 W max.     |
| Output                       | 24 V DC, 9.2 A |

| <b>CONDICIONES AMBIENTALES</b>   |   |
|----------------------------------|---|
| Condiciones de trabajo ambiental | 15 – 32 °C, 10 – 90% de humedad relativa sin condensación.                                  |
|                                  | Consulte las especificaciones técnicas de material para las optimas condiciones de trabajo. |
| Condiciones de almacenamiento    | 0 – 32 °C   |

Tabla anexo 1: Propiedades de la impresora Ultimaker Extended 3

## Anexo 2. Propiedades de los filamentos

PLA (Ácido Poliláctico) Ultimaker

| Características mecánicas               | Valor típico          | Método de ensayo |
|---|-----------------------|------------------|
| Módulo de elasticidad a la tracción     | 2346,5 MPa            | ISO 527          |
| Esfuerzo de tracción a la deformación   | 49,5 MPa              | ISO 527          |
| Esfuerzo de tracción a la rotura        | 45,6 MPa              | ISO 527          |
| Alargamiento a la deformación           | 3,3 %                 | ISO 527          |
| Alargamiento a la rotura                | 5,2 %                 | ISO 527          |
| Resistencia a la flexión                | 103,0 MPa             | ISO 178          |
| Módulo de flexión                       | 3150,0 MPa            | ISO 178          |
| Resistencia a la prueba de impacto Izod | 5,1 KJ/m <sup>2</sup> | ISO 180          |
| Dureza                                  | 83 (Shore D)          | Durómetro        |

| Características térmicas       | Valor típico  | Método de ensayo |
|--------------------------------|---------------|------------------|
| Índice de fluidez (MFR)        | 6,09 g/10 min | ISO 1133         |
| Transición vítrea              | 60 °C         | ISO 306          |
| Temperatura de fusión          | 145-160 °C    | ISO 296          |
| Temperatura de impresión       | 200-220 °C    | Dato             |
| Temperatura placa de impresión | 60 °C         | Dato             |

Tabla anexo 2.1: Características PLA

ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) Ultimaker

| Características mecánicas               | Valor típico           | Método de ensayo |
|---|------------------------|------------------|
| Módulo de elasticidad a la tracción     | 1681,5 MPa             | ISO 527          |
| Esfuerzo de tracción a la deformación   | 39,0 Mpa               | ISO 527          |
| Esfuerzo de tracción a la rotura        | 33,9 Mpa               | ISO 527          |
| Alargamiento a la deformación           | 3,5 %                  | ISO 527          |
| Alargamiento a la rotura                | 4,8 %                  | ISO 527          |
| Resistencia a la flexión                | 70,5 Mpa               | ISO 178          |
| Módulo de flexión                       | 2070,0 Mpa             | ISO 178          |
| Resistencia a la prueba de impacto Izod | 10,5 KJ/m <sup>2</sup> | ISO 180          |
| Dureza                                  | 76 (Shore D)           | Durómetro        |

| Características térmicas       | Valor típico | Método de ensayo |
|--------------------------------|--------------|------------------|
| Índice de fluidez (MFR)        | 41 g/10 min  | ISO 1133         |
| Transición vítrea              | 97 °C        | ISO 306          |
| Temperatura de fusión          | 225-245 °C   | ISO 296          |
| Temperatura de impresión       | 230-260 °C   | Dato             |
| Temperatura placa de impresión | 80 °C        | Dato             |

Tabla anexo 2.2.1: Características ABS

ABS HI (acrilonitrilo butadieno estireno) Smartfil

| Características mecánicas               | Valor típico         | Método de ensayo |
|---|----------------------|------------------|
| Esfuerzo de tracción a la deformación   | 39,0 Mpa             | ISO 527          |
| Esfuerzo de tracción a la rotura        | 40 Mpa               | ISO 527          |
| Resistencia a la flexión                | 59 Mpa               | ISO 178          |
| Módulo de flexión                       | 2000,0 Mpa           | ISO 178          |
| Resistencia a la prueba de impacto Izod | 31 KJ/m <sup>2</sup> | ISO 179          |
| Dureza                                  | 98 R                 | ISO 2039         |

| Características térmicas       | Valor típico | Método de ensayo |
|--------------------------------|--------------|------------------|
| Transición vítrea              | 94 °C        | ISO 306          |
| Temperatura de fusión          | 225-245 °C   | ISO 296          |
| Temperatura de impresión       | 230-250 °C   | Dato             |
| Temperatura placa de impresión | 80-100 °C    | Dato             |

Tabla anexo 2.2.2: Características ABS HI

PVA (Polivinilo de alcohol) Ultimaker

| Características térmicas       | Valor típico   | Método de ensayo |
|--------------------------------|----------------|------------------|
| Índice de fluidez (MFR)        | 17-21 g/10 min | ISO 1133         |
| Transición vítrea              | 60,2 °C        | ISO 306          |
| Temperatura de fusión          | 163 °C         | ISO 11357        |
| Temperatura de impresión       | 190-220 °C     | Dato             |
| Temperatura placa de impresión | 60 °C          | Dato             |

Tabla anexo 2.3: Características PVA

## TPU (Elastómero termoplástico) Ultimaker

| Características mecánicas               | Valor típico           | Método de ensayo |
|---|------------------------|------------------|
| Módulo de elasticidad a la tracción     | 26 MPa                 | ASTM D638        |
| Esfuerzo de tracción a la deformación   | 8,6 MPa                | ASTM D638        |
| Esfuerzo de tracción a la rotura        | 39 MPa                 | ASTM D638        |
| Alargamiento a la deformación           | 55 %                   | ASTM D638        |
| Alargamiento a la rotura                | 580 %                  | ASTM D638        |
| Resistencia a la flexión                | 4,3 MPa                | ISO 178          |
| Módulo de flexión                       | 78,7 MPa               | ISO 178          |
| Resistencia a la prueba de impacto Izod | 34,4 KJ/m <sup>2</sup> | ISO 180          |
| Dureza                                  | 46 (Shore D)           | Durómetro        |

| Características térmicas       | Valor típico  | Método de ensayo |
|--------------------------------|---------------|------------------|
| Índice de fluidez (MFR)        | 15,9 g/10 min | ISO 1133         |
| Transición vítrea              | -24 °C        | DSC              |
| Temperatura de fusión          | 220 °C        | DSC              |
| Temperatura de impresión       | 225-245 °C    | Dato             |
| Temperatura placa de impresión | 70 °C         | Dato             |

Tabla anexo 2.4: Características TPU

## Nailon Ultimaker

| Características mecánicas               | Valor típico           | Método de ensayo |
|---|------------------------|------------------|
| Módulo de elasticidad a la tracción     | 579 MPa                | ISO 527          |
| Esfuerzo de tracción a la deformación   | 27,8 Mpa               | ISO 527          |
| Esfuerzo de tracción a la rotura        | 34,4 Mpa               | ISO 527          |
| Alargamiento a la deformación           | 20 %                   | ISO 527          |
| Alargamiento a la rotura                | 210 %                  | ISO 527          |
| Resistencia a la flexión                | 24 Mpa                 | ISO 178          |
| Módulo de flexión                       | 463,5 Mpa              | ISO 178          |
| Resistencia a la prueba de impacto Izod | 34,4 KJ/m <sup>2</sup> | ISO 180          |
| Dureza                                  | 74 (Shore D)           | Durómetro        |

| Características térmicas       | Valor típico | Método de ensayo |
|--------------------------------|--------------|------------------|
| Índice de fluidez (MFR)        | 6,2 g/10 min | ISO 1133         |
| Transición vítrea              | 50 °C        |                  |
| Temperatura de fusión          | 185-195 °C   | ISO 11357        |
| Temperatura de impresión       | 240-260 °C   | Dato             |
| Temperatura placa de impresión | 60 °C        | Dato             |

Tabla anexo 2.5: Características Nailon

### Anexo 3. Planos de los cerramientos superior y frontal

Se adjuntan a continuación los distintos planos de las planchas que forman los cerramientos frontal y superior.

Las planchas del cerramiento superior junto con tornillo, arandelas, tuercas y escuadras forman la estructura superior completa.

La plancha del cerramiento frontal junto con las agarraderas formadas por piezas impresas, tornillos y tuercas forman el cerramiento completo.





D

C

B

A

4

4

3

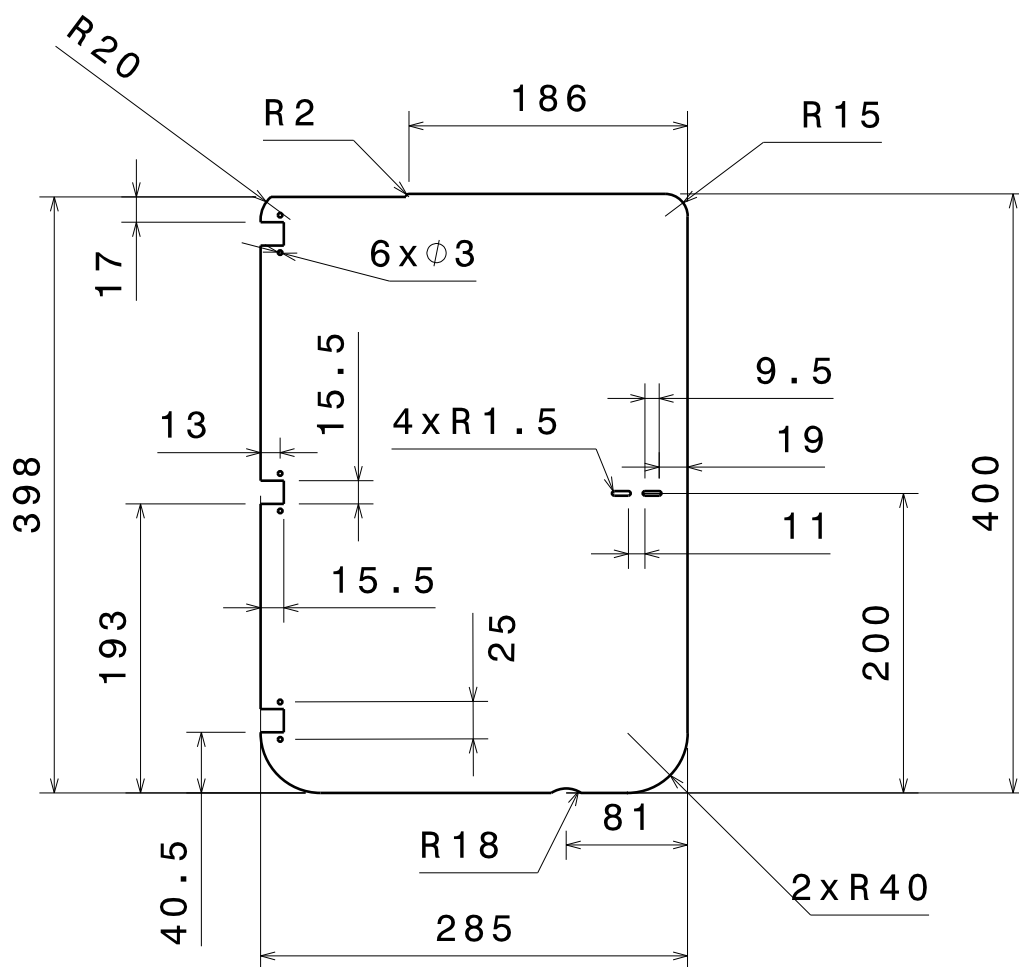
3

2

2

1

1



Tolerancias generales ISO 2768-mK

DISEÑADO POR:

Eduardo

FECHA:

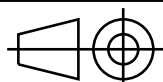
15/06/2018

REVISADO POR:

Eduardo

TAMAÑO

A4



CERRAMIENTO FRONTAL

TFG EDUARDO VALVERDE

ESCALA

1:5

Numero de piezas:

1

MATERIAL:

Metacrilato transparente espesor 3mm

HOJA

1/1

|   |   |
|---|---|
| I | - |
| H | - |
| G | - |
| F | - |
| E | - |
| D | - |
| C | - |
| B | - |
| A | - |

D

A



D

C

B

A

4

4

266

5 x M5

15

10

30

3

3

2 x Ø 5.5

2 x R4

2

2

286

326

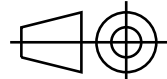
Tolerancias generales ISO 2768-mK

DISEÑADO POR:  
Eduardo

FECHA:  
15/06/2018

REVISADO POR:  
Eduardo

TAMAÑO  
A4



ESCALA  
1:2

Numero de piezas:  
1

**PLANCHA DELANTERA**

**TFG EDUARDO VALVERDE**

MATERIAL:  
Metacrilato transparente espesor 10mm

HOJA  
1 / 1

|   |   |
|---|---|
| I | - |
| H | - |
| G | - |
| F | - |
| E | - |
| D | - |
| C | - |
| B | - |
| A | - |

1

1

D

A



D

C

B

A

4

4

3

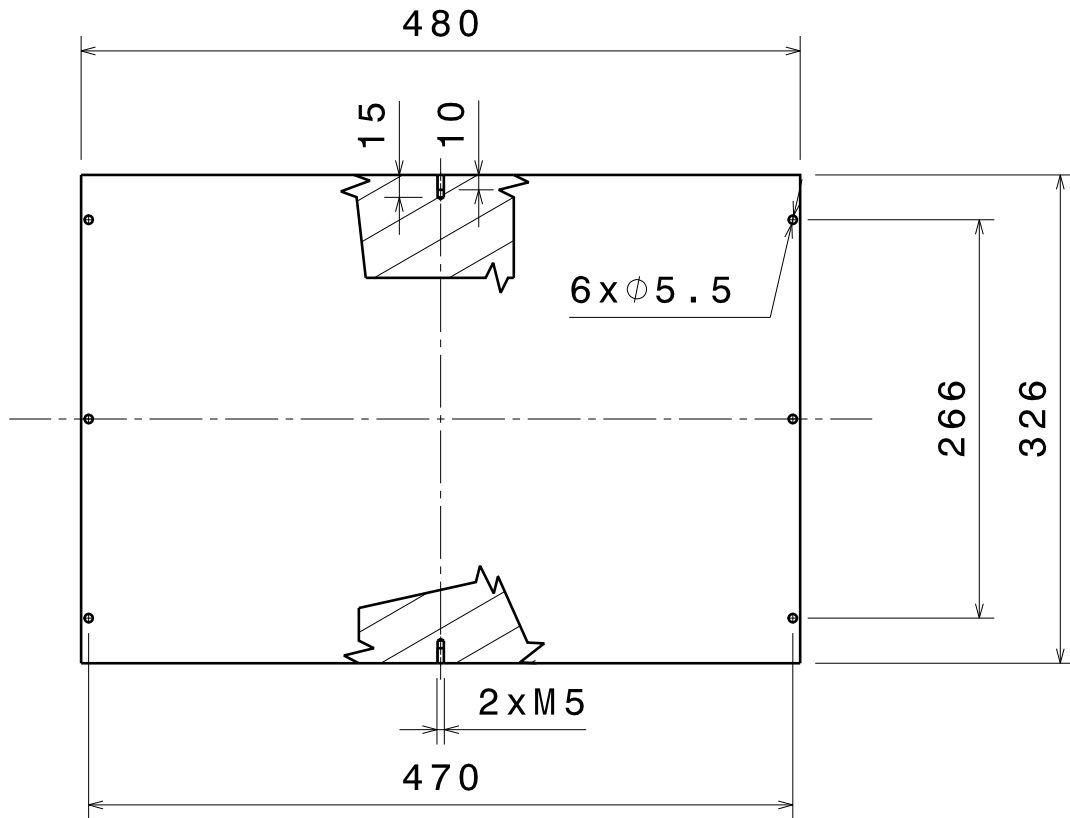
3

2

2

1

1



Tolerancias generales ISO 2768-mK

DISEÑADO POR:

Eduardo

FECHA:

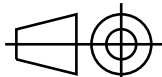
15/06/2018

REVISADO POR:

Eduardo

TAMAÑO

A4



# PLANCHA SUPERIOR

## TFG EDUARDO VALVERDE

ESCALA

1:5

Numero de piezas:

1

Material

Metacrilato transparente espesor 10mm

HOJA

1/1

I

-

H

-

G

-

F

-

E

-

D

-

C

-

B

-

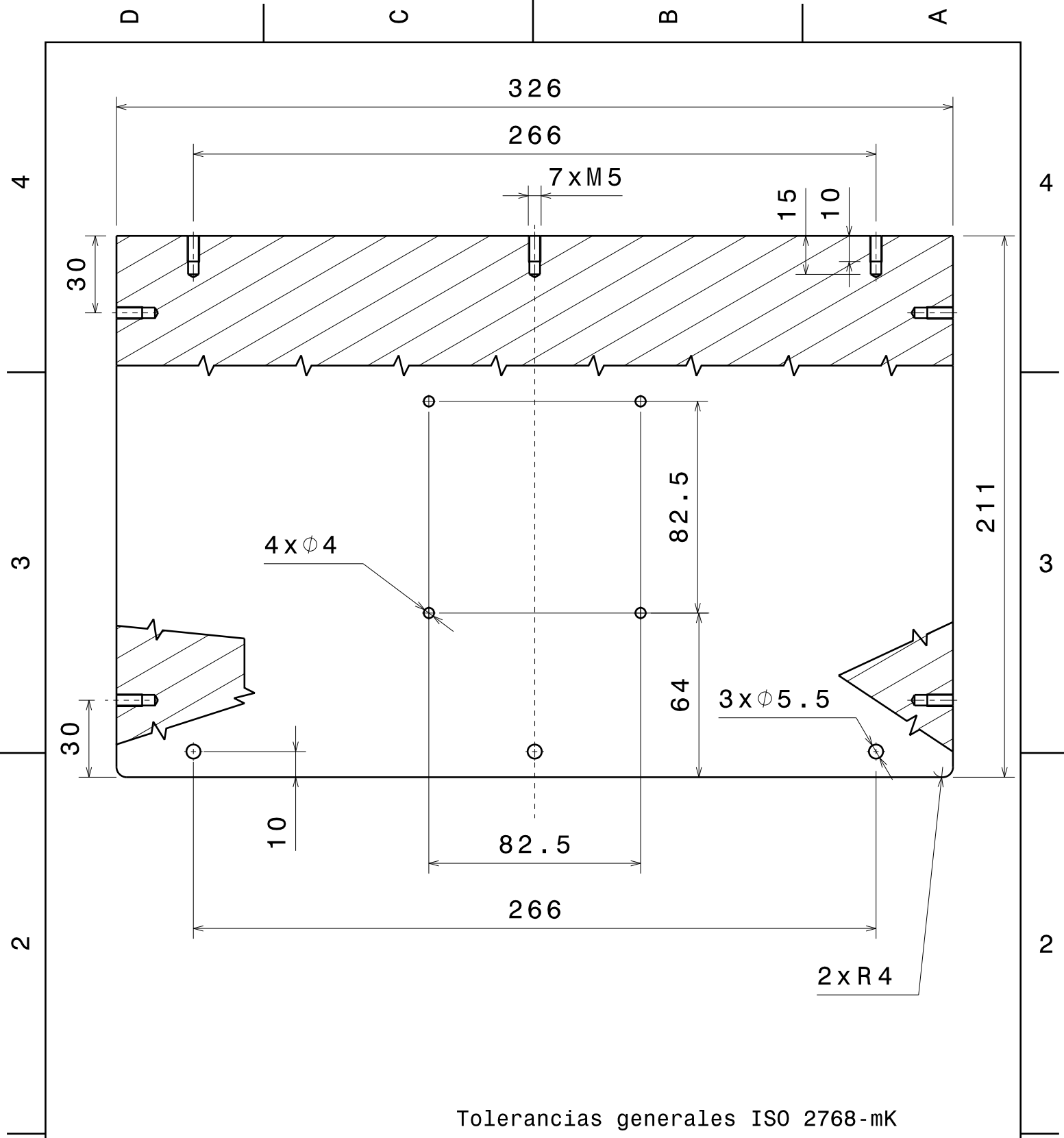
A

-

D

A



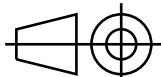


Tolerancias generales ISO 2768-mK

DISEÑADO POR:  
**Eduardo**  
FECHA:  
**15/06/2018**

REVISADO POR:  
**Eduardo**

TAMAÑO  
**A4**



ESCALA  
**1:2**

Numero de piezas:  
**1**

**PLANCHA TRASERA**

**TFG EDUARDO VALVERDE**

Material  
**Metacrilato transparente espesor 10mm**

HOJA  
**1 / 1**

|   |   |
|---|---|
| I | - |
| H | - |
| G | - |
| F | - |
| E | - |
| D | - |
| C | - |
| B | - |
| A | - |





D

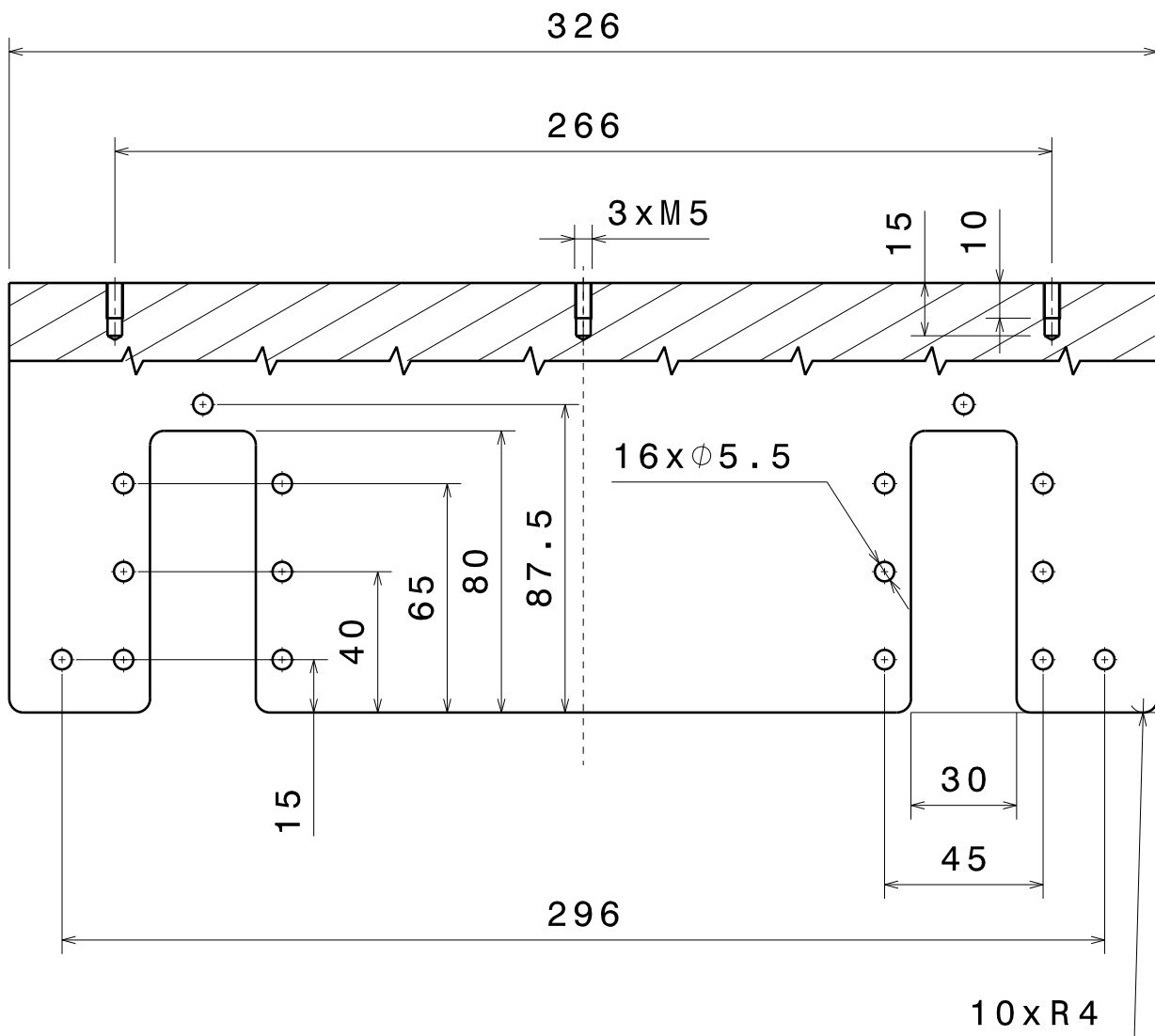
C

B

A

4

4



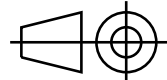
Tolerancias generales ISO 2768-mK

DISEÑADO POR:  
Eduardo

FECHA:  
15/06/2018

REVISADO POR:  
Eduardo

TAMAÑO  
A4



ESCALA  
1:2

Numero de piezas:  
1

# PLANCHA INFERIOR

## TFG EDUARDO VALVERDE

Material  
Metacrilato transparente espesor 10mm

HOJA  
1/1

|   |   |
|---|---|
| I | - |
| H | - |
| G | - |
| F | - |
| E | - |
| D | - |
| C | - |
| B | - |
| A | - |

D

A

1

1

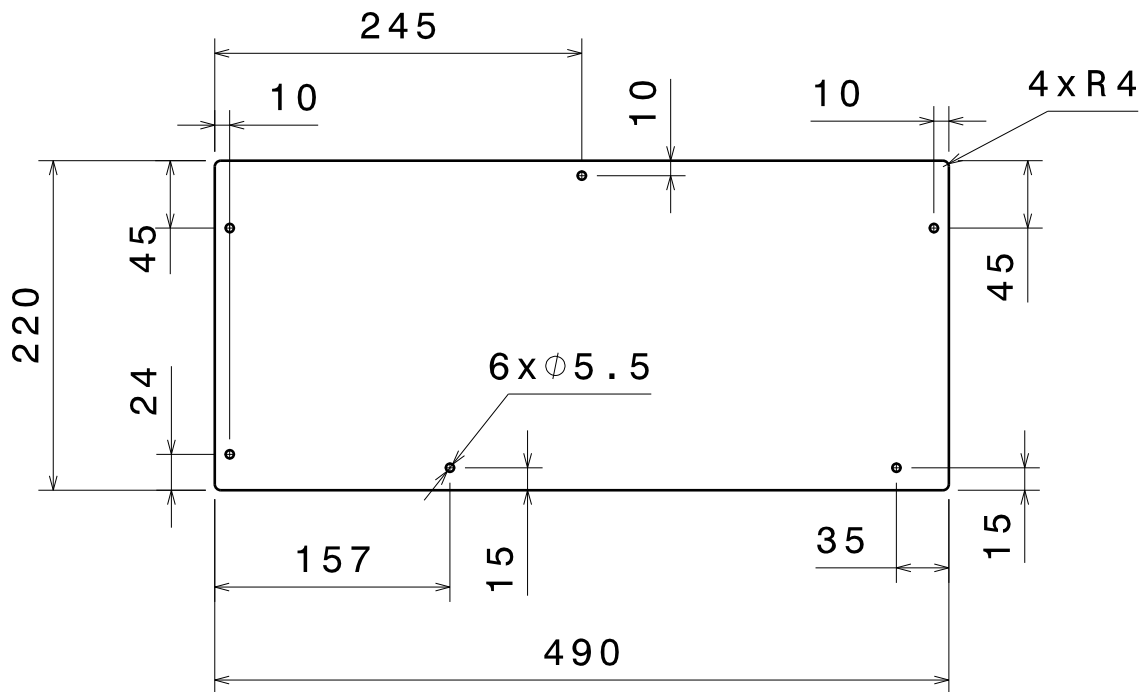


D

C

B

A



Tolerancias generales ISO 2768-mK

DISEÑADO POR:

Eduardo

FECHA:

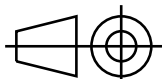
15/06/2018

REVISADO POR:

Eduardo

TAMAÑO

A4



PLANCHA LATERAL

TFG EDUARDO VALVERDE

ESCALA

1:5

Numero de piezas:

2

MATERIAL:

Metacrilato transparente espesor 10mm

HOJA

1/1

I -

H -

G -

F -

E -

D -

C -

B -

A -

D

A

