

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA  
INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE GRADO

*REDISEÑO Y FABRICACIÓN  
ALTERNATIVO DE FUSIBLE  
MECÁNICO PARA MAQUINA DE  
ELECTROEROSIÓN*

**Alumno/Alumna:** <González, Marín, Guillermo>

**Director/Directora:** <Plaza, Pascual, Soraya>

**Curso:** <2018-2019>

**Fecha:** <Bilbao, 20, junio, 2019>

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA  
ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

## ÍNDICE GENERAL

MEMORIA.....	3
1. Introducción.....	3
2. Contexto.....	4
2.1. La electroerosión.....	4
2.2. La máquina de W.E.D.M. ....	5
2.3. Motivación del proyecto.....	7
3. Objetivos y alcance del trabajo.....	8
3.1. Objetivos .....	8
3.2. Alcance.....	8
4. Beneficios que aporta el trabajo.....	9
4.1. Beneficios Técnicos .....	9
4.2. Beneficios Económicos .....	9
5. Fusibles mecánicos actuales.....	10
5.1. Dimensiones de los fusibles mecánicos originales y forma de trabajo .....	10
5.2. Identificación del material y sus propiedades.....	11
6. Análisis de procesos alternativos.....	16
6.1. Procesos de moldeo .....	16
6.1.1. Moldeo por inyección.....	16
6.1.2. Moldeo por compresión.....	17
6.1.3. Moldeo por transferencia.....	18
6.1.4. Colado simple.....	19
6.2. Impresión 3D.....	19
6.2.1. Estereolitografía.....	20
6.2.2. Moldeado por deposición fundida.....	20
6.2.3. Proceso de fabricación mediante tecnología <i>Polyjet</i> .....	21
6.2.4. Proceso de fabricación mediante inyección de aglutinante.....	22
6.2.5. Proceso de fabricación mediante sinterizado selectivo.....	23
6.3. Ponderación de las variables .....	24
6.3.1. Comparación entre procesos de moldeo y de impresión .....	24

6.3.2. Comparación de los procesos de impresión .....	25
6.3.2. Comparación de los materiales de impresión.....	27
7. Impresión mediante F.D.M. ....	30
7.1. Parámetros de impresión.....	30
7.2. El warping.....	33
8. Descripción de los fusibles de A.B.S. PLUS.....	34
8.1. Propiedades del A.B.S. PLUS .....	34
8.2. Modificaciones en el diseño .....	36
METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROYO DEL TRABAJO.....	38
9. Descripción de las fases y diagrama de Gantt.....	38
10. Descripción de los equipos utilizados.....	40
11. Exposición de los resultados .....	45
11.1. Control de Calidad .....	45
11.2. Comprobación de funcionamiento .....	46
ASPECTOS ECONÓMICOS.....	49
12. Descripción del presupuesto.....	49
13. Análisis de rentabilidad .....	51
CONCLUSIONES.....	52
BIBLIOGRAFÍA .....	53
ANEXOS.....	57
Anexo I: Planos del fusible cuadrado.....	57
Anexo II: Planos del fusible rectangular .....	58
Anexo III: Planos de la impresora Dimension sst 1200es.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Definición visual del gap.</i> [1]	5
<i>Figura 2: Corte mediante W.E.D.M.</i> [4]	6
<i>Figura 3: Máquina de corte por hilo ONA-AX3.</i>	6
<i>Figura 4: Células de carga superior e inferior.</i> [5]	7
<i>Figura 5: Izq) Cabezal inferior. Drch) Cabezal superior.</i>	10
<i>Figura 6: Dimensiones principales de los fusibles.</i>	11
<i>Figura 7: Estructura del epoxi novolac.</i> [10]	12
<i>Figura 8: Dimensiones de las probetas de tracción.</i>	14
<i>Figura 9: Proceso de fabricación de las probetas de tracción.</i>	14
<i>Figura 10: Ensayo de tracción.</i>	15
<i>Figura 11: Esquema del moldeo por inyección.</i> [13]	17
<i>Figura 12: Esquema del moldeo por compresión.</i> [14]	18
<i>Figura 13: Esquema del moldeo por transferencia.</i> [15]	18
<i>Figura 14: Esquema del proceso de colado.</i> [17]	19
<i>Figura 15: Esquema del proceso SLA.</i> [21]	20
<i>Figura 16: Esquema del proceso FDM.</i> [21]	21
<i>Figura 17: Esquema del proceso PJ.</i> [21]	22
<i>Figura 18: Esquema del proceso BJ.</i> [21]	23
<i>Figura 19: Esquema del proceso LS.</i> [21]	24
<i>Figura 20: Empezando desde la "a" piezas fabricadas en: A.B.S. PLUS, T.P.U., P.L.A., P.E.T., Nylon, A.S.A., P.C., Polipropileno, P.V.A. y Onyx.</i> [22]	29
<i>Figura 21: Variación de la estructura interior.</i>	31
<i>Figura 22: Pieza de ABS PLUS afectada por el warping.</i>	33
<i>Figura 23: Probetas de A.B.S. PLUS.</i>	34
<i>Figura 24: Fusible superior en marfil y en negro.</i>	36
<i>Figura 25: Fusible mecánico deformado.</i>	36
<i>Figura 26: Fusibles mecánicos en A.B.S. PLUS.</i>	37
<i>Figura 27: Máquina Avatar 375 FT-IR ThermoNicolet.</i>	40
<i>Figura 28: Máquina TGA Q50.</i>	40
<i>Figura 29: Máquina Instron 5565.</i>	41
<i>Figura 30: Impresora Dimension sst 1200es.</i>	41
<i>Figura 31: Máquina C.M.M. ZEISS MC 850.</i>	43
<i>Figura 32: Máquina W.E.D.M. ONA AX-3.</i>	44
<i>Figura 33: Dimensiones sometidas al control de calidad.</i>	45
<i>Figura 34: Izq) Fusibles originales. Drch) Fusibles actuales.</i>	47
<i>Figura 35: Simulación de carga.</i>	47
<i>Figura 36: Corte con fusibles de A.B.S. PLUS.</i>	48

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1: Resultados del análisis espectrométrico.</i> .....	12
<i>Gráfico 2: Resultados del análisis T.G.A.</i> .....	13
<i>Gráfico 3: Diagrama esfuerzo de tracción-deformación del epoxi novolac.</i> .....	15
<i>Gráfico 4: Diagrama esfuerzo de tracción-deformación del A.B.S. PLUS húmedo.</i> .....	34
<i>Gráfico 5: Diagrama esfuerzo de tracción-deformación del A.B.S. PLUS sin humedecer.</i> .....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Resultado de los ensayos.....</i>	15
<i>Tabla 2: Aspectos analizados y sus ponderaciones.....</i>	25
<i>Tabla 3: Resultados de la comparación entre moldeo e impresión 3D.....</i>	25
<i>Tabla 4: Aspectos analizados y sus ponderaciones dentro de la impresión 3D.....</i>	26
<i>Tabla 5: Resultados de la comparación entre procesos de impresión.....</i>	27
<i>Tabla 6: Resolución y espesor de capa seleccionados.....</i>	30
<i>Tabla 7: Resultado de ambos ensayos.....</i>	35
<i>Tabla 8: Diagrama de Gantt.....</i>	39
<i>Tabla 9: Características técnicas de la impresora Dimension sst 1200es.....</i>	42
<i>Tabla 10: Características técnicas de la máquina C.M.M ZEISS MC 850.....</i>	43
<i>Tabla 11: Características técnicas de la máquina de W.E.D.M. ONA AX-3.....</i>	44
<i>Tabla 12: Control de calidad del fusible cuadrado.....</i>	46
<i>Tabla 13: Control de calidad del fusible rectangular.....</i>	46
<i>Tabla 14: Presupuesto del proyecto.....</i>	50
<i>Tabla 15: Análisis de rentabilidad del proyecto.....</i>	51

## ACRÓNIMOS:

<b>E.C.M.</b>	Electro Chemical Machining
<b>L.B.M.</b>	Laser Beam Machining
<b>A.W.J.M.</b>	Abrasive Water Jet Machining
<b>U.S.M.</b>	Ultrasonic Machining
<b>E.D.M.</b>	Electrical Discharge Machining
<b>S.E.D.M.</b>	Sinking Electrical Discharge Machining
<b>W.E.D.M.</b>	Wire Electrical Discharge Machining
<b>H.S.M.</b>	High Speed Machining
<b>C.N.C.</b>	Control Numérico Computarizado
<b>A.B.S. PLUS</b>	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
<b>T.G.A.</b>	Thermogravimetric Analysis
<b>S.L.A.</b>	Stereolithography Apparatus
<b>F.D.M.</b>	Fused Deposition Modelling
<b>P.J.</b>	Photopolymer Jetting
<b>B.J.</b>	Binder Jetting
<b>L.S.</b>	Laser Sintering
<b>C.M.M.</b>	Coordinate Measuring Machine
<b>T.P.U.</b>	Thermoplastic Polyurethane
<b>P.L.A.</b>	Polylactic Acid
<b>P.E.T.</b>	Polyethylene Terephthalate
<b>P.E.T.G.</b>	Polyethylene Terephthalate Glycol
<b>A.S.A.</b>	Acrilonitrilo Estireno Acrilato
<b>P.C.</b>	Polycarbonate
<b>P.V.A.</b>	Polyvinil Acetate
<b>C.A.D.</b>	Computer Aided Design

## Resumen

Este trabajo de fin de grado describe el procedimiento seguido a la hora de fabricar fusibles mecánicos para una máquina de electroerosión. En él, se estudia diversos métodos de fabricación y se analiza las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Además, se describe la metodología que se ha seguido para identificar el material original y como se han obtenido las propiedades mecánicas del mismo. De esta manera, se examinan diversos materiales, seleccionando finalmente el que mejor se ajusta a los requisitos.

El fin de este proyecto es fabricar fusibles mecánicos funcionales al menor coste posible usando las herramientas disponibles en el taller.

**Palabras clave:** Fusible mecánico, impresión 3D, F.D.M., A.B.S. PLUS.

## Laburpena

Gradu amaierako lan honetan elektroerrosio makina batek erabiltzen dituen fusible mekanikoen ekoizte prozedura deskribatzen da. Bertan, ekoizpen metodo ezberdinak zehaztuko dira bakoitzaren abantaila eta eragozpenak aztertuz.

Gainera, jatorrizko materialaren identifikazio prozesua garatzeko erabilitako metodologia azalduko da, ala nola bere propietate mekanikoen eskuratzeko prozesua. Modu honetan, material ezberdinak aztertuko dira makinaren beharizanetara hobeto moldatzen dena aukeratuz.

Lan honen xede nagusia tailerrean eskura ditugun erremintak erabilia fusible mekaniko funtzionalak ekoiztea da, ahalik eta kostu txikienarekin.

**Hitz gakoak:** Fusible mekanikoa, 3D inprimaketa, F.D.M., A.B.S. PLUS.

## Abstract

In the following final degree project, the procedure followed to manufacture mechanical fuses for an electrical discharge machine is described. Moreover, various manufacturing methods are analyzed, showing the advantages and disadvantages of each of them.

Furthermore, the methodology followed when identifying the original material as the one followed to obtain its mechanical properties are described. Different materials are examined and the one that best suits the requirements is selected.

The purpose is to manufacture functional mechanical fuses at a lower cost using the tools available in the workshop.

**Key words:** Mechanical fuses, 3D printing, F.D.M., A.B.S. PLUS.

# MEMORIA

---

## 1. Introducción

Una de las incidencias más comunes y habituales en la máquina de electroerosión es la rotura de los fusibles mecánicos. Esta circunstancia, extorsiona el desarrollo de los quehaceres diarios del taller e incide económicamente en los presupuestos anuales del departamento de Mecánica.

Este trabajo ha sido realizado por el alumno de cuarto año de grado Guillermo González Marín y ha sido dirigido por la profesora Soraya Plaza Pascual.

Con el objetivo de minimizar el impacto a todos los niveles, tanto económico como en tiempo de espera, causados por la rotura de estos elementos se ha realizado un estudio de posibles alternativas que permitan fabricar los fusibles usando las maquinas disponibles en el taller.

Para ello, se estudian diversos métodos de fabricación de polímeros entre los que se diferencian los de moldeo y los de impresión 3D. Una vez escogido el método idóneo, se analizan los materiales compatibles y se descartan los que no cumplan con las características necesarias, en base a las obtenidas del material original.

Asimismo se realiza un rediseño en los nuevos fusibles para que su comportamiento sea lo más semejante a los originales.

Por último, se comprueba que estos nuevos fusibles se ajustan perfectamente a la máquina para detectar posibles errores de fabricación.

## 2. Contexto

El desarrollo industrial provoca que cada vez más, las empresas busquen productos con mayor valor añadido, usando materiales de altas prestaciones. Generalmente, estos materiales suelen ser difíciles de mecanizar a través de procesos convencionales de arranque de viruta como el torneado o el fresado, lo que ha provocado el auge de otro tipo de procesos que se adaptan mejor a este nicho de mercado.

A diferencia estos, los procesos alternativos se caracterizan por no tener tasas de arranque elevadas ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) lo que conlleva un alto consumo energético en proporción al material arrancado. Sin embargo, gracias a que la tasa de arranque es baja se pueden obtener una precisión elevada incluso en geometrías complejas (de micras), logrando productos de muy alto valor añadido. Dentro de estos procesos no convencionales se encuentran el E.C.M., L.B.M., A.W.J.M., U.S.M... entre otros, aunque este documento se centra en exclusiva en el E.D.M.

### 2.1. La electroerosión

La E.D.M. es un proceso no convencional de mecanizado por arranque de material que se realiza por medio de descargas eléctricas controladas entre dos elementos conductores, el útil de arranque (electrodo) y el material a conformar (la pieza) en presencia de un fluido dieléctrico.

Aunque el flujo de electrones libres que se genera al introducir una corriente eléctrica en un material conductor no produzca ninguna modificación aparente en el estado del material, al aumentar la intensidad de esta se puede apreciar un aumento de la temperatura. La electroerosión se basa en este principio, de forma que concentrando ese gradiente de temperatura en una superficie muy pequeña se pueden alcanzar temperaturas capaces de sublimar el material.

A diferencia de otros procesos de mecanizado, este proceso extrae el material sin contacto físico entre pieza y útil de arranque. A este espacio se le denomina *gap* y es ocupado por el dieléctrico. El valor del *gap* es un parámetro muy importante a la hora de mecanizar, ya que un *gap* pequeño o inexistente causa situaciones de cortocircuito produciendo descargas descontroladas que pueden degradar tanto el electrodo como la pieza, mientras que un *gap* demasiado grande no garantiza la sucesión estable de descargas.

Un factor a tener en cuenta es que la erosión ocurre en ambos sentidos, en la pieza y en el electrodo. La erosión en el electrodo se denomina desgaste y se procura minimizar para poder alargar la vida del útil de arranque. Debido a que el cátodo (+) se desgasta menos que el ánodo (-), lo común es usar el electrodo como cátodo, aunque dependiendo del proceso que se quiera realizar y la precisión que se quiera obtener es posible invertir la polaridad.

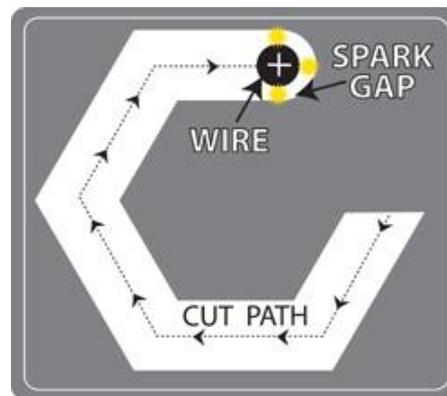


Figura 1: Definición visual del gap. [1]

Dentro de la E.D.M. se pueden diferenciar dos ramas, la S.E.D.M. y la W.E.D.M. Aunque sus campos de aplicación están claramente diferenciados, a día de hoy cuando se habla de E.D.M. se suele hacer referencia al corte por hilo. Esto es debido a que el mercado demanda procesos con los que poder mecanizar materiales extra duros a gran precisión mientras que la implantación del proceso de H.S.M. en la industria de moldes y matrices ha desplazado a la S.E.D.M. a un segundo lugar.

## 2.2. La máquina de W.E.D.M.

La base del W.E.D.M. es generar la geometría deseada a partir del movimiento relativo entre la pieza a mecanizar y un hilo de material conductor, el electrodo. Este hilo se encuentra en posición vertical y genera una geometría pasante en la pieza. El filamento, que inicialmente está enrollado en una bobina, se conecta en el cabezal superior de la máquina mediante un sistema de ruedas. A continuación, este hilo se enhebra en el cabezal inferior, por donde es expulsado hacia el sumidero. [1], [2], [3]

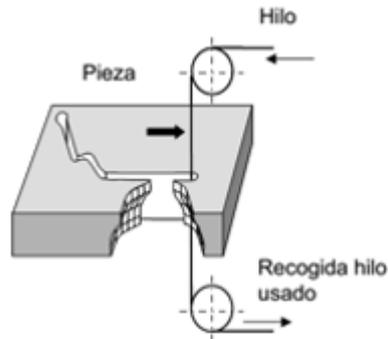


Figura 2: Corte mediante W.E.D.M. [4]

La máquina de W.E.D.M. entorno a la cual se desarrolla este trabajo (figura 3) dispone de cinco ejes para generar el movimiento relativo necesario entre hilo y pieza. El cabezal superior puede moverse en los tres ejes principales del espacio (X, Y, Z) con la posibilidad de inclinar el hilo (U, V) hasta un máximo de  $\pm 8^\circ/250$  mm. Cuando la erosión se produce con el hilo inclinado se le denomina corte cónico, siendo más habitual usar el corte vertical siendo este considerado tipo de corte normal.



Figura 3: Máquina de corte por hilo ONA-AX3.

Tanto el cabezal superior como el inferior son muy susceptibles a colisiones ya que la más mínima desviación provoca pérdida de precisión en la máquina. Para evitar este fenómeno, se dispone de un sistema anticolidión por células de carga que protege ambos cabezales frente a choques o fuerzas indebidas. Estas células son un elemento de sacrificio fabricadas usando un polímero rígido. Como se puede apreciar en la figura 4, la maquina dispone de dos células de carga diferentes, un tipo para cada cabezal. El

cabezal superior tiene dos células rectangulares mientras que en el inferior hay una sola de forma cuadrada. En ambos casos la rotura ocurre en zonas controladas mediante cavidades que hacen a su vez de concentradores de tensiones.

Para que el sistema detecte que la célula de carga está rota se dispone de una protección eléctrica en ambos cabezales. Al colisionar, la protección eléctrica cierra el circuito avisando al control. El C.N.C. da el mensaje de alarma, informando de la rotura del fusible y bloqueando todos los motores por precaución, evitando así daños mayores en los cabezales y en la mecánica de precisión.

La función de estas células es similar a la de un fusible en un circuito eléctrico, por ello coloquialmente se les conoce como fusibles mecánicos. [5]

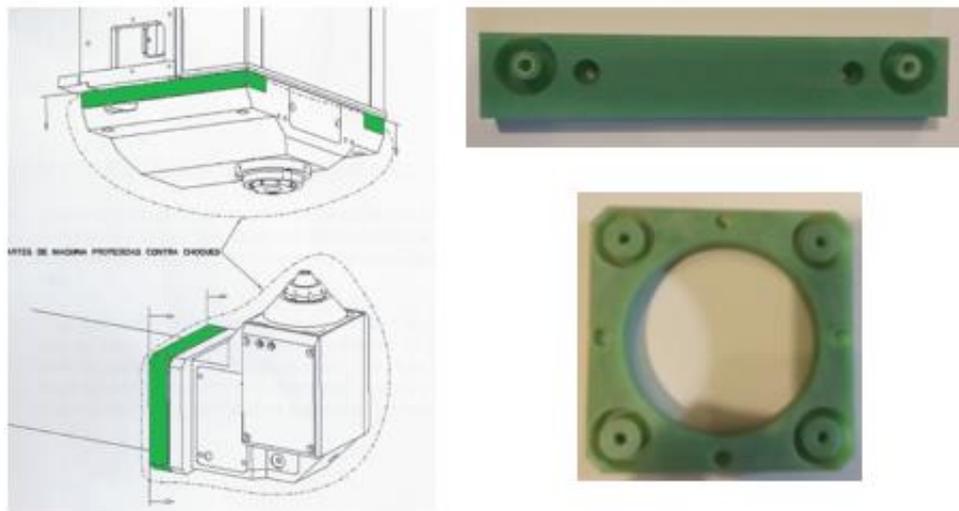


Figura 4: Células de carga superior e inferior. [5]

### 2.3. Motivación del proyecto

Dado que el tener la maquina parada por avería además de no generar ganancia genera gasto y descontento, es uno de los factores que más influye en la productividad. Debido a la fragilidad de estos elementos, muchas de las averías tienen su origen en la ruptura de las células de carga. Por lo tanto, encontrar una manera de minimizar el coste de los fusibles y el tiempo de su sustitución se vuelve fundamental cuando se pretende maximizar la productividad.

## 3. Objetivos y alcance del trabajo

### 3.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es lograr fabricar unos fusibles mecánicos con características similares a las originales usando los medios disponibles. Para ello hay que centrarse en los siguientes pasos (objetivos secundarios):

- Estudiar el fusible mecánico original: Se determinará el material con el que se fabrican los fusibles originales así como sus propiedades mecánicas, con el fin de distanciarnos lo mínimo posible de estos valores. Esto se realizará a través de un análisis espectrométrico, un T.G.A. y un ensayo de tracción.

- Seleccionar el proceso de fabricación y material a utilizar: Se valorarán los pros y los contras de cada proceso y material y se seleccionará el que ofrezca propiedades similares a los originales. Se realizará una comparación entre los procesos de moldeo y los de impresión seguida de un estudio de los materiales compatibles con el proceso seleccionado.

- Realizar mejoras en el diseño inicial y detectar posibles errores cometidos durante el proceso de fabricación: Se someterán a los nuevos fusibles a un control de calidad para corroborar que se encuentran dentro de las tolerancias requeridas y se realizarán cambios en el diseño que mejoren el resultado final.

Como objetivo personal se destaca la capacidad de aprender a usar diferentes máquinas y software e igualmente poner en práctica en un supuesto real los conocimientos adquiridos durante el grado en ingeniería de tecnología industrial.

### 3.2. Alcance

Cumpliendo estos objetivos se logrará una mayor autonomía, obteniendo de esta forma, una menor dependencia hacia los proveedores en lo que a fungibles se refiere y logrando una mayor comodidad y celeridad a la hora de efectuar la reparación de un fusible roto.

## 4. Beneficios que aporta el trabajo

Este trabajo fin de grado aportara beneficios tanto técnicos como económicos.

### 4.1. Beneficios Técnicos

En primer lugar, el *know-how* adquirido durante todo el proceso podrá ser aprovechado en el futuro a la hora de fabricar fusibles. Los futuros alumnos tendrán la capacidad de fabricar ellos mismos recambios y podrán ampliar el conocimiento en el funcionamiento de estos elementos de protección.

En segundo lugar, se obtendrán datos de diferentes polímeros y sus propiedades mecánicas que pueden servir como base para futuros proyectos.

### 4.2. Beneficios Económicos

Al fabricar los fusibles mecánicos en el propio taller se conseguirá un abaratamiento en el precio final de cada fusible, logrando un importante ahorro final en materiales fungibles (avería típica, frecuente y costosa del taller de Mecánica).

Por último, el poder disponer de la maquina antes, después de cada avería los proyectos se podrán entregar con mayor celeridad y de esta manera la productividad de la maquina se verá aumentada.

## 5. Fusibles mecánicos actuales

Para poder iniciar este trabajo es imprescindible disponer de un conocimiento exhaustivo de los fusibles originales, tanto del material como de las dimensiones y forma de trabajar de los mismos. Se pretende lograr unos nuevos fusibles que se comporten de forma similar a los actuales.

### 5.1. Dimensiones de los fusibles mecánicos originales y forma de trabajo

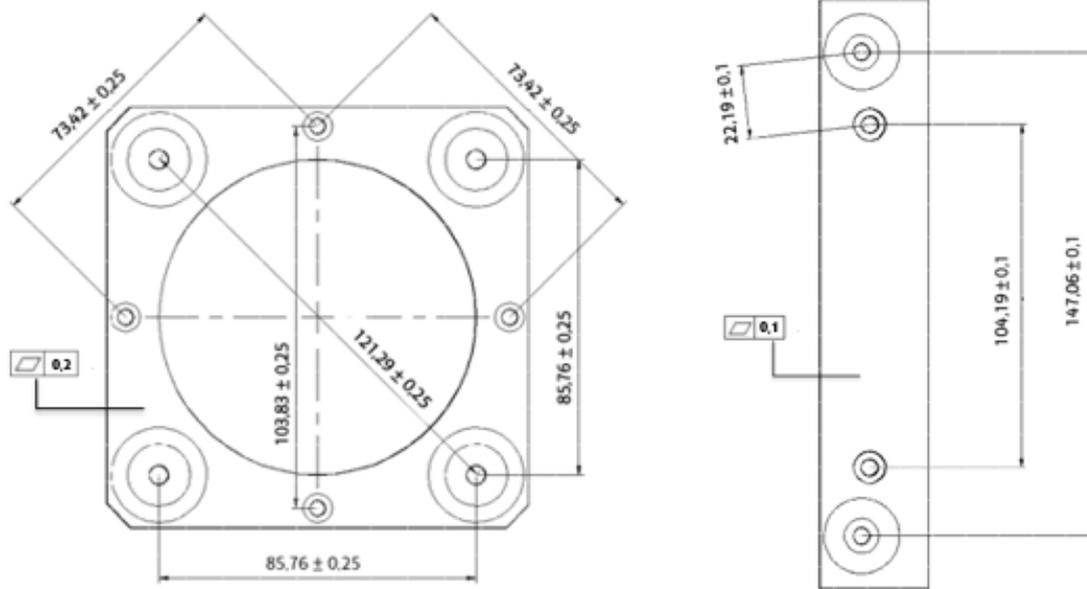
La máquina dispone de dos tipos diferentes de fusibles; los dos superiores, rectangulares, y el inferior de forma cuadrada.



*Figura 5: Izq) Cabezal inferior. Drch) Cabezal superior.*

Como se puede observar en la *figura 6*, las dimensiones más importantes de los fusibles son tanto las distancias entre los ejes de los tornillos como la planitud de la cara en contacto con el cabezal. En ambos modelos se aprecian dos tipos diferentes de orificios para tornillos.

Los orificios que disponen de una cavidad mayor para que la cabeza de los tornillos amarre mejor, sirven para sujetar los fusibles al elemento fijo. Para el fusible cuadrado son necesarios cuatro tornillos de métrica cuatro y para el rectangular dos de métrica cinco.



*Figura 6: Dimensiones principales de los fusibles*

Los demás orificios (fácilmente identificables puesto que se encuentran en unos cilindros que actúan como concentradores de tensiones), sirven para sujetar el cabezal a los fusibles. Los tornillos colocados en ellos transmiten las cargas absorbidas por los cabezales a los fusibles, produciendo la rotura. Esta se da en la base de todos los cilindros simultáneamente. Se utilizan cuatro tornillos de métrica cinco en el caso del fusible cuadrado y dos de métrica seis en el caso del rectangular. Los orificios del fusible rectangular están roscados hasta la mitad de su longitud, para garantizar un mejor agarre ya que soportan todo el peso del cabezal superior.

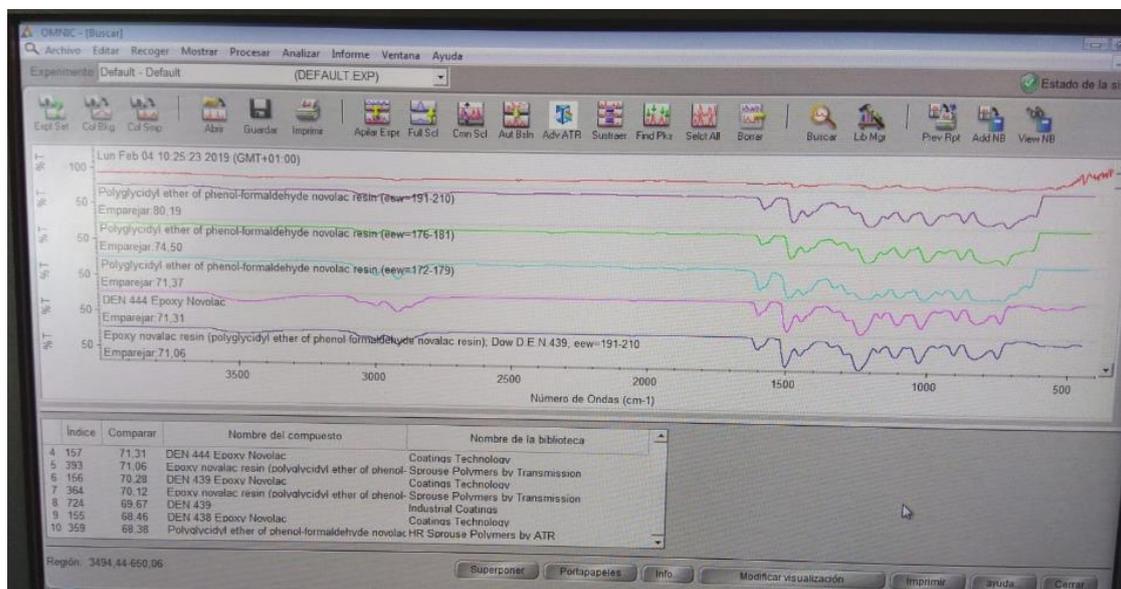
El orificio central en el fusible cuadrado tiene dos razones de ser. Un mejor apoyo en el eje redondo hueco con el que está en contacto (el elemento fijo) y la necesidad de poder conectar los tubos de aire y agua con el cabezal inferior y poder expulsar el hilo erosionado al sumidero. De no existir la apertura circular y ser la pieza maciza, no sería posible efectuar la necesaria conexión entre el cabezal inferior y los tubos ubicado en el interior del eje.

## 5.2. Identificación del material y sus propiedades

Para tener conocimiento del tipo de polímero que utiliza la maquina se ha realizado un análisis espectrométrico. Este proceso consiste en atacar un analito, una muestra de no

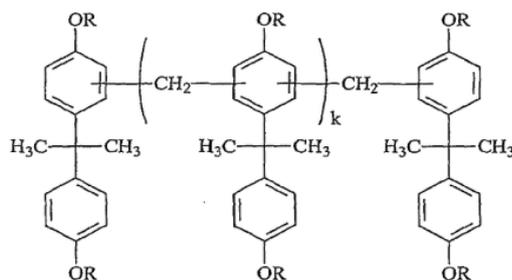
más de 10 mm del cual se pretende conocer su composición, con un haz de radiación electromagnética controlada. Es necesario realizar un estudio sin ninguna muestra en la cámara, que servirá de base para el análisis posterior. [6]

Los resultados del *gráfico 1*, aprecian vibraciones en el tramo comprendido entre 3000  $\text{cm}^{-1}$  y 1600  $\text{cm}^{-1}$  así como a los 750  $\text{cm}^{-1}$ . El material con un mayor grado de compatibilidad (71, 31%) es el DEN 444 epoxi novolac.



*Gráfico 1: Resultados del análisis espectrométrico.*

Lo que diferencia una resina epoxi novolac de una resina epoxi convencional es la adición de fenólicos que al reaccionar con los formaldeídos de la propia resina ofrecen un mayor grado de reticulación, lo que aumenta la cantidad de uniones tridimensionales que presenta. De esta manera se aumenta la resistencia al calor, a la corrosión y a la abrasión, así como la dureza de la propia resina, aunque pierde flexibilidad y es más frágil. [7], [8], [9]

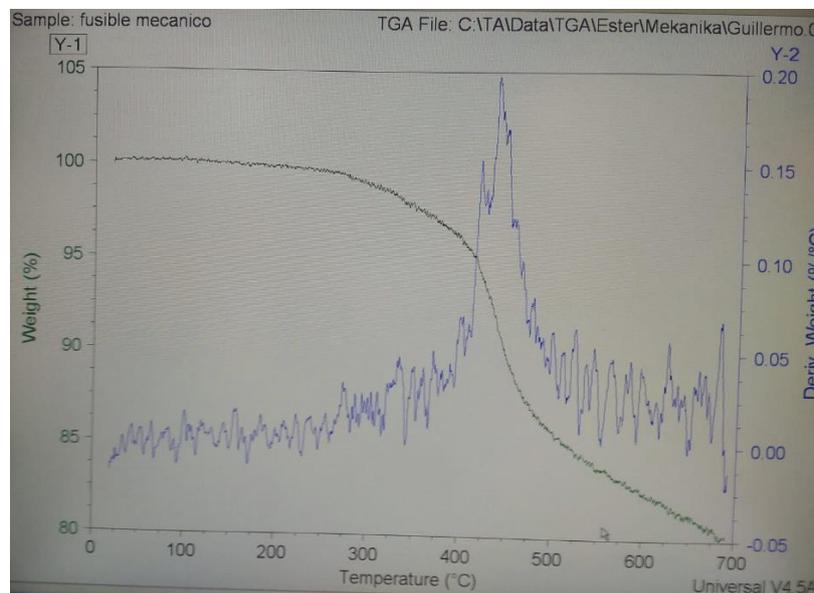


*Figura 7: Estructura del epoxi novolac.* [10]

Teniendo en cuenta que los fusiles deben ser frágiles, ya que si se deforman sin romper la maquina perdería precisión, los resultados obtenidos concuerdan con lo esperado.

Para corroborar la presunción de que la pieza pueda contener fibras en su interior que mejoren sus propiedades mecánicas se ha realizado un T.G.A. Este método consiste en medir en una atmósfera definida la masa de una muestra mientras esta se calienta o se enfría. También permite medir eventos térmicos que no provocan un cambio de masa, como la fusión, la transición vítrea u otro tipo de transiciones de fase sólido-sólido.

[11]

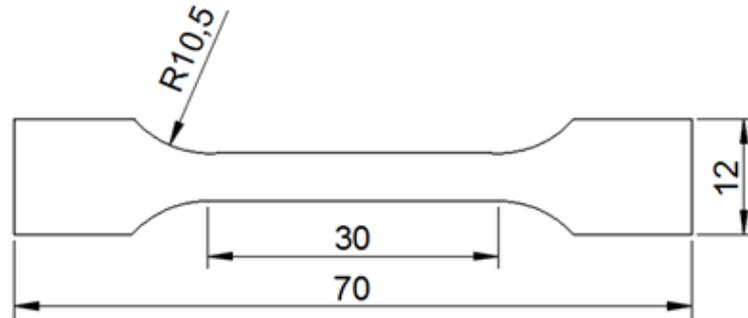


*Gráfico 2: Resultados del análisis T.G.A.*

Al observar los resultados obtenidos en el *gráfico 2*, en el que se comparan el porcentaje de masa perdido por cada grado aumentado, se constata que sobre los 700°C el porcentaje de masa habría descendido un 20%, quedando en ese momento tan solo las fibras. Por lo tanto, el 80% de la masa de los fusibles está formada por estas, confirmándose consecuentemente su existencia en el interior del fusible. Respecto al material de las fibras lo más seguro es que se trate de fibras Kevlar, ya que se usan comúnmente junto al epoxi novolac.

Para calcular la resistencia a tracción del material se fabricaron seis probetas y se sometieron a un ensayo de tracción. Para poder ensayar estas probetas se debería seguir la norma I.S.O. 527 aunque como no se disponía de un macizo que cumpliera con las dimensiones requeridas se optó por ensayarlas fuera de norma. Las dimensiones de las probetas se pueden apreciar en la *figura 8*, donde se comprueba que el radio de

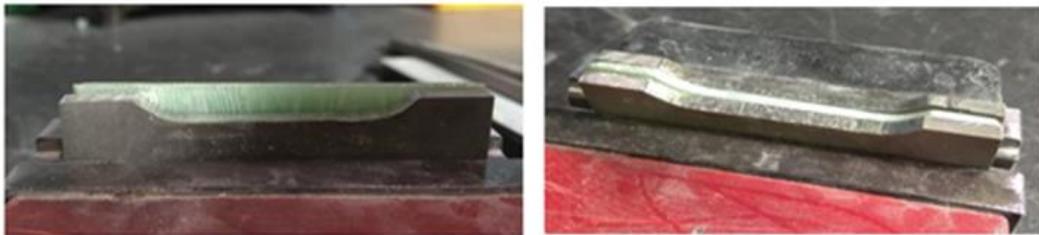
curvatura es mucho mayor al espesor del alma, evitando así posibles concentradores de tensiones. El espesor de las probetas es de 2mm.



*Figura 8: Dimensiones de las probetas de tracción.*

Con objeto de fabricar las probetas a ensayar, se han mecanizado dos probetas en acero F114 que servirán de plantilla para las probetas de epoxi novolac. Las 6 probetas se obtuvieron siguiendo el procedimiento que se aprecia en la *figura 9*. [12]

Para simular el hecho de que trabajan sumergidas en un tanque de agua, se introdujeron en un recipiente con agua durante una semana ya que la humedad puede variar sus propiedades.



*Figura 9: Proceso de fabricación de las probetas de tracción.*

El ensayo de tracción se llevó a cabo con una precarga de 10 N - 50 N. Como se muestra en la *figura 10* las probetas rompieron de manera poco habitual. Si se tratase de una rotura frágil la superficie de rotura formaría un ángulo de 90° respecto a la longitud del alma, mientras que ante una rotura dúctil este sería de 45°. Sin embargo, se puede observar una rotura casi paralela. El causante de este fenómeno es la rotura fibra-matriz, que provoca el destense de la fibra afectada, produciendo una rotura escalonada como la que refleja la *figura 10*.



Figura 10: Ensayo de tracción.

El gráfico 3, muestra la notable diferencia entre los ensayos 1 y 4 respecto al resto. Por lo tanto, los resultados obtenidos de estos dos ensayos se han descartado por no representar el comportamiento real del material.

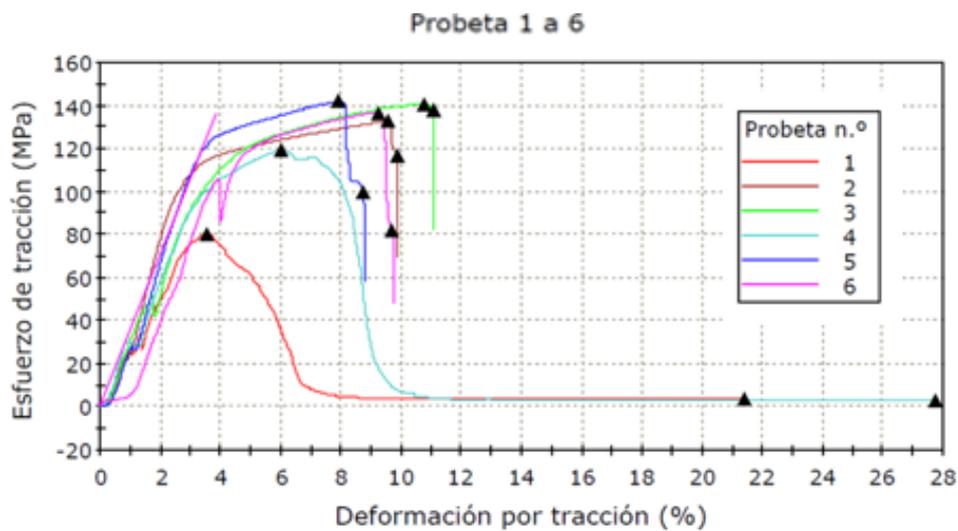


Gráfico 3: Diagrama esfuerzo de tracción-deformación del epoxy novolac.

De este grafico se obtienen el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo de rotura y el módulo de Young. Los valores que se muestran en la tabla 1 son los valores medios de los ensayos 2, 3, 5 y 6, que servirán de base a la hora de seleccionar el material a utilizar en la fabricación.

Esfuerzo de Fluencia (Pendiente 0)	Esfuerzo de Rotura (Estándar)	Módulo de Young (10N-50N)
137,99 MPa	99,627 MPa	3555,693 MPa

Tabla 1: Resultado de los ensayos.

## 6. Análisis de procesos alternativos

Una vez conocidas las propiedades de la célula de carga original, se deben valorar diferentes procesos de fabricación que cumplan con los requisitos necesarios para un correcto funcionamiento del elemento. Nos centraremos en los procesos para materiales poliméricos y composites para alejarnos lo menos posible del modelo original. Estos métodos podemos agruparlos en dos categorías, los procesos de moldeo y los de impresión 3D.

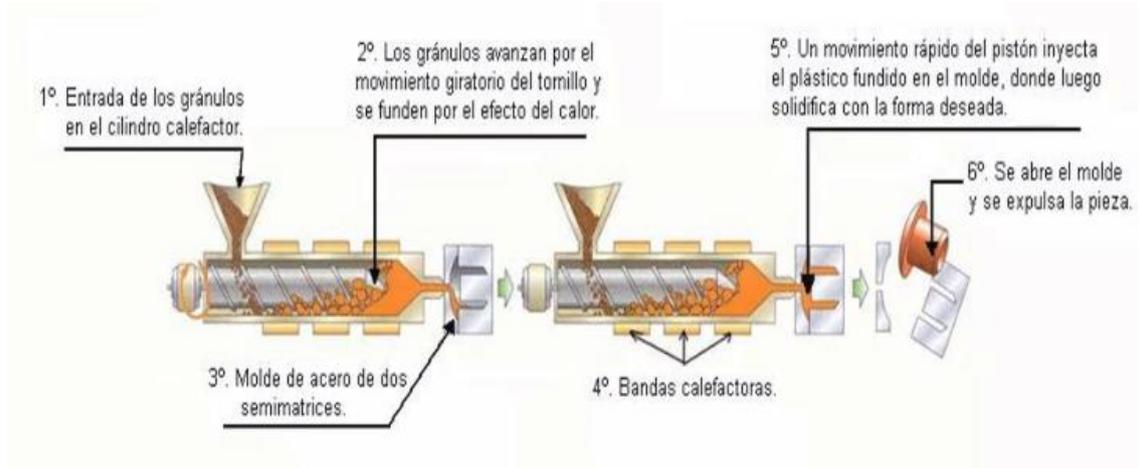
### 6.1. Procesos de moldeo

Estos procesos se caracterizan por deformar un polímero caliente bajo presión, usando moldes para generar las geometrías deseadas. Podemos destacar cuatro técnicas que pueden ser usadas para fabricar las células de carga:

#### 6.1.1. Moldeo por inyección

Consiste en fundir un material granulado en una cámara, el cual es introducido en un molde contiguo y frío a presión a través de un orificio pequeño llamado compuerta. Se usa un husillo como pistón para asegurarse de que los gránulos de material fundidos (la carga) penetran en todas las cavidades del molde. Es importante mantener la presión lo más constante posible durante el empacamiento. Cuando toda la geometría está rellena, se retrae el husillo y se sella. Tanto la presión como la temperatura disminuyen progresivamente hasta que la pieza enfríe y haya curado. Con este cambio de temperatura el material tiende a contraer, especialmente los polímeros, debido a que son altamente sensibles a cambios en las relaciones de temperatura-presión-volumen. Con el fin de minimizar este efecto es importante conocer los valores de temperatura de fusión y presión de cada material. Finalmente, la pieza se obtiene al retirar el molde y extraer de la cavidad la pieza moldeada.

Para lograr un proceso de inyección eficiente, primero hay que diferenciar el tipo de polímero que se quiere usar (un polímero amorfo se comporta muy diferente a uno semicristalino). Como los enlaces covalentes de los polímeros semicristalinos son más resistentes a la influencia del calor que los de los polímeros amorfos, estos últimos fluirán con mayor facilidad por el molde.



*Figura 11: Esquema del moldeo por inyección. [13]*

Sin embargo, para poder fabricar el fusible mediante este método se necesita un molde adecuado a la geometría. Estos moldes suelen ser fabricados de aceros de altas resistencias para soportar altas presiones sin deformarse, puesto que el mínimo defecto afectará a la pieza a conformar.

### 6.1.2. Moldeo por compresión

Este segundo método es muy similar al anterior. En este caso, la carga es depositada en un molde abierto, que al cerrarse y presionarse produce la deformación. Una vez el polímero haya curado se separan las dos mitades del molde y se extrae la pieza. Es importante conocer las temperaturas y presiones de cada polímero ya que si presionamos el molde demasiado o a una temperatura demasiado baja podemos deformarlo. Un factor clave en este proceso es que la cantidad de masa de material antes y después del proceso es la misma puesto que apenas se genera residuo. De esta manera los desechos generados son más bajos que los del proceso anterior. El grado de reticulación de cada polímero juega un factor importante a la hora de usar este método, ya que cuanto mayor sea este, más presión habrá que ejercer para lograr la misma deformación, y por tanto su coste aumentará.

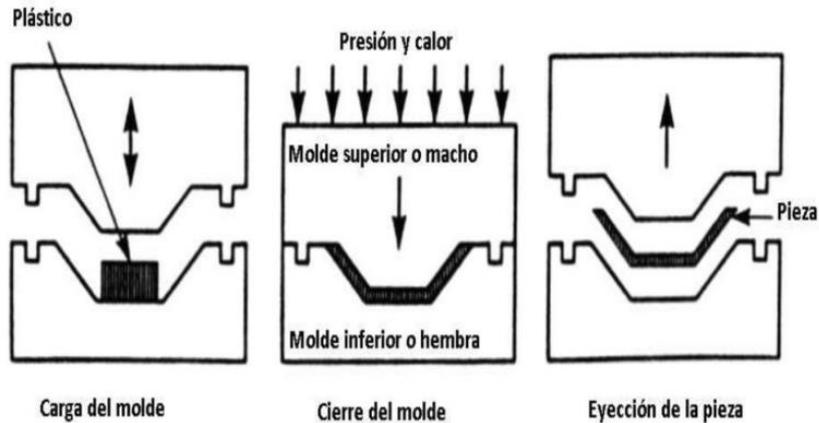


Figura 12: Esquema del moldeo por compresión. [14]

Este proceso está limitado a polímeros termoestables, entre los que podemos encontrar resinas epoxicas, resinas fenolformaldeido o resinas de vinilester. El abanico de materiales disponibles disminuye debido a la complejidad de deformar polímeros semicristalinos.

### 6.1.3. Moldeo por transferencia

Este es un proceso intermedio entre la inyección y la compresión. Al igual que en el proceso de inyección la carga es colocada en una cavidad contigua al molde en vez de en el molde directamente y mediante la presión de un pistón hidráulico es forzada a fluir a través de unos canales llamados bebederos. El tiempo de ciclo de moldeo por transferencia suele ser más corto que en los casos anteriores ya que hay mejor transferencia de calor al introducir la carga por los canales, disminuyendo el tiempo de curado. La pieza es expulsada del molde usando unas espigas extractoras.

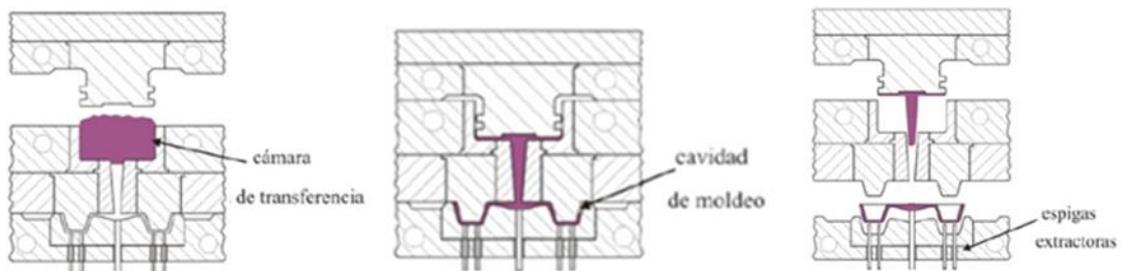


Figura 13: Esquema del moldeo por transferencia. [15]

Al igual que el moldeo por compresión este proceso también está limitado a polímeros termoestables, pero ofrece la ventaja de poder reducir considerablemente el tiempo de curado. [16]

#### 6.1.4. Colado simple

A diferencia de los procesos expuestos hasta el momento, el colado es una técnica de moldeo sin presión externa (solo actúa la presión atmosférica). La carga es vertida directamente al molde, donde se deja curar. A este proceso se le llama colado simple. Este método puede ser usado tanto para polímeros cristalinos como para amorfos. A diferencia de los semicristalinos que se dejan curar al aire, en el caso de los amorfos es recomendable ayudarse de un baño o un rociado de agua.

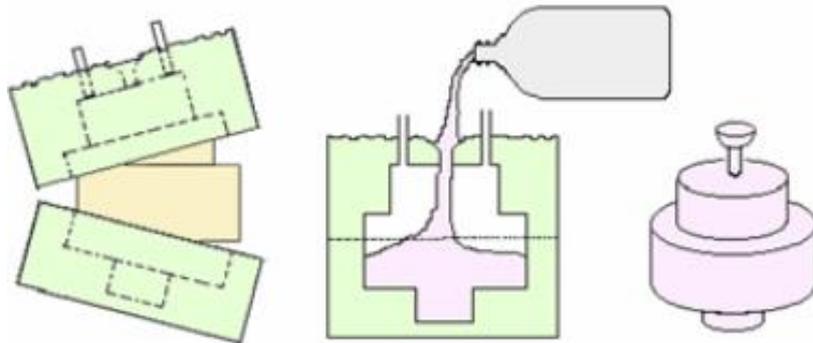


Figura 14: Esquema del proceso de colado. [17]

Este proceso es el más barato de los expuestos hasta ahora, porque los moldes son de aluminio por no tener que soportar presiones tan altas aunque presenta el mismo problema que los demás métodos de moldeo: la fabricación de los moldes que resulta caro. [18], [19], [20]

## 6.2. Impresión 3D

La fabricación de piezas mediante impresión 3D se encuentra dentro del grupo de fabricación aditiva que tanta popularidad está adquiriendo en los últimos años. Este proceso, transforma un modelo C.A.D. (en formato *.stl*) a piezas tridimensionales funcionales y duraderas mediante la deposición del material capa a capa. Para lograr las geometrías deseadas el cabezal superior se mueve en los ejes X e Y dejando caer el material de forma vertical. Este proceso se da de abajo hacia arriba pudiéndose fabricar

durante la impresión estructuras de soporte para asegurar la estabilidad de la pieza. Estas estructuras suelen ser de un material más barato que el de la propia pieza, puesto que serán retiradas en el pos procesamiento mediante la inmersión de la pieza en sosa caustica. Dependiendo de cómo es depositado el material y el proceso de curado se distinguen diferentes técnicas como la S.L.A., el F.D.M., el P.J., el B.J. y el L.S.

### 6.2.1 Estereolitografía

Este proceso, también conocido como fabricación óptica, foto-solidificación o S.L.A., consiste en solidificar capa a capa una resina fotosensible en estado líquido usando un láser ultravioleta mediante un proceso denominado fotopolimerización. De esta forma, cada capa queda unida a la inmediatamente inferior, formando la pieza. Es necesario un material de soporte para evitar que la pieza venza y se mueva.

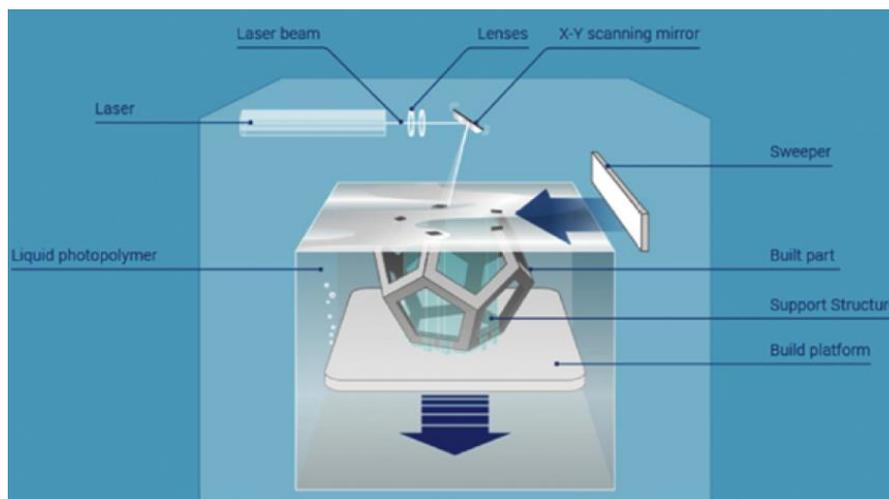


Figura 15: Esquema del proceso SLA. [21]

Mediante este proceso se pueden lograr tolerancias de  $\pm 0.15\text{mm}$  para un tamaño mínimo de detalle de  $0.1\text{mm}$  logrando así geometrías muy precisas. Aun así, debido al proceso de fotopolimerización las propiedades mecánicas de la pieza no perduraran en el tiempo por lo que es importante estudiar este fenómeno previamente.

### 6.2.2. Moldeado por deposición fundida

A diferencia de la S.L.A., la materia prima se encuentra almacenada en rollos que atraviesan una boquilla a una temperatura superior a la de fusión del material. El

material fundido (debe ser un termoplástico) es depositado formando finos hilos que van conformando las diferentes capas horizontales. Al enfriarse, estas solidifican, generando la geometría deseada. Al igual que en el caso anterior, es imprescindible disponer de material de soporte para evitar que la pieza se desplome durante su confección. Este proceso también es conocido como F.D.M.

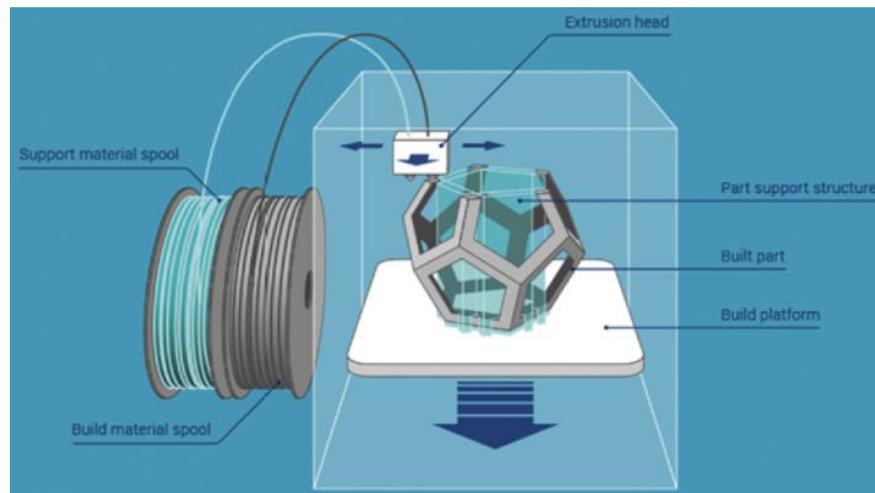


Figura 16: Esquema del proceso FDM. [21]

En este caso se sacrifican ligeramente la precisión en aras a lograr piezas duraderas y con buenas propiedades mecánicas. Aunque las tolerancias ( $\pm 0.178\text{mm}$ ) y dimensiones mínimas de los detalles ( $0.178\text{mm}$ ) aumenten un poco se ve compensado con la capacidad de poder obtener materiales a muy bajo costo.

### 6.2.3. Proceso de fabricación mediante tecnología *Polyjet*

Este proceso, conocido como P.J., se encuentra a medio camino de los dos anteriores. La resina fotosensible en vez de encontrarse en estado líquido en el tanque es depositada de forma similar al proceso de F.D.M., si bien en vez de estar enrollada suele presentarse en polvo. Es curada de la misma manera que en el proceso S.L.A., mediante un láser ultravioleta, logrando un mejor curado y al igual que en los anteriores procesos es necesario disponer de material de soporte.

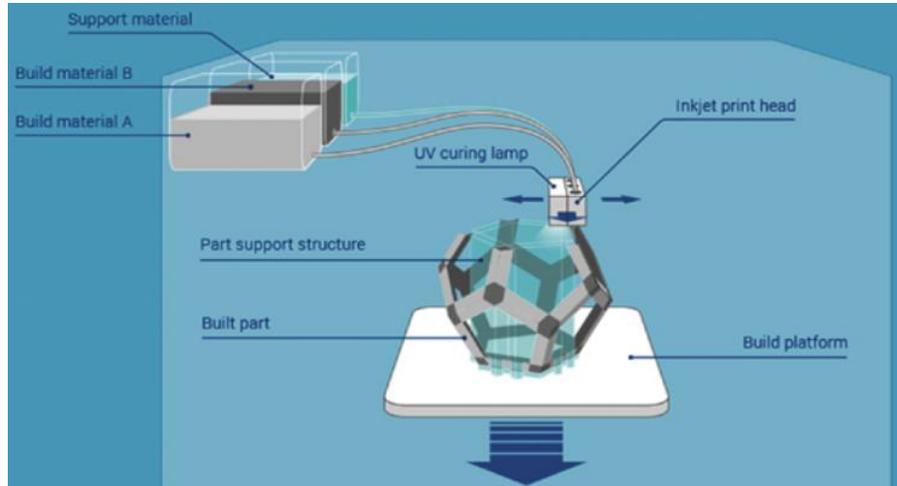


Figura 17: Esquema del proceso PJ. [21]

Con el P.J. se obtienen resultados similares al S.L.A. ya que al usar el mismo tipo de materiales las propiedades mecánicas son parecidas y tampoco perduran en el tiempo. Aun así, se pueden lograr tolerancias de  $\pm 0.025\text{mm}$  para un tamaño mínimo de detalle de  $0.15\text{mm}$  logrando geometrías mucho más precisas, aunque se sacrifique el tamaño de los detalles.

#### 6.2.4. Proceso de fabricación mediante inyección de aglutinante

El B.J. se usa para lograr materiales compuestos cerámico-poliméricos. En el tanque se dispone de una capa de polvo cerámico (*powder*) y desde el cabezal se deposita un líquido polimérico (*binder*) en los puntos donde se desea obtener la pieza. Después de compactar cada capa con un rodillo se polimeriza sobre los  $40^{\circ}\text{C}$  logrando la pieza deseada. Este método no requiere de material de soporte ya que la misma cama de *powder* cumple esta función. Aun así, hay que tener en cuenta que el costo de material de soporte es invertido en el polvo sobrante, por lo que no supondrá ni una ventaja ni una desventaja a la hora de evaluarlos.

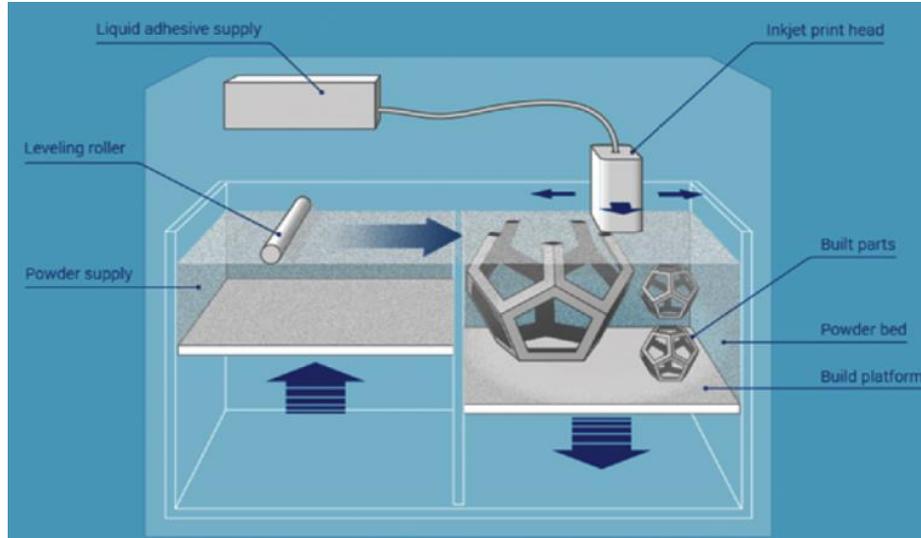
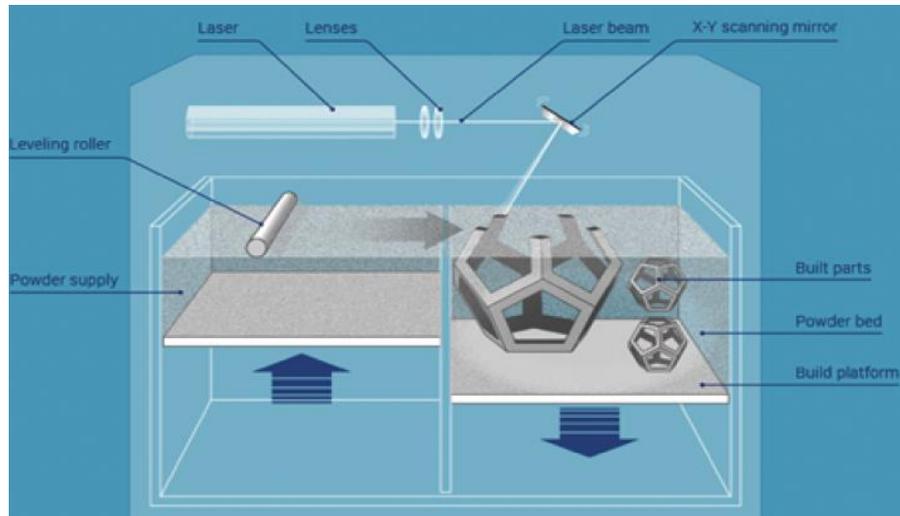


Figura 18: Esquema del proceso BJ. [21]

Es el proceso de impresión más rápido y se obtienen piezas con una precisión suficiente, tolerancias de  $\pm 0.13\text{mm}$  para un tamaño mínimo de detalle de  $0.1\text{mm}$ . Aun así, al combinarse con materiales cerámicos los resultados suelen ser demasiado frágiles y por lo tanto es posible que no cumplan las necesidades especificadas.

#### 6.2.5. Proceso de fabricación mediante sinterizado selectivo

Mediante el proceso L.S, además de polímeros también se puede lograr objetos cerámicos o vidrios, o una combinación de cualquiera de ellos, aumentando enormemente el abanico de materiales. Al tener tantas combinaciones se pueden lograr piezas muy variadas por lo que es ideal para hacer prototipos. Este caso es muy similar al supuesto anterior donde el *powder* (ya sea polvo polimérico, cerámico o vidrioso) se encuentra desde el inicio en el tanque, aunque en vez de inyectarle el *binder* en las zonas seleccionadas se calientan mediante un láser de  $\text{CO}_2$ . De esta forma se logra la fusión obteniendo la pieza tridimensional. Al igual que en el caso anterior, el polvo hará de material de soporte y es necesario un rodillo que compacte el polvo para evitar porosidades en el resultado final.



*Figura 19: Esquema del proceso LS. [21]*

Con este proceso no se obtienen los mejores acabados y es el más lento y costoso de los métodos de impresión, pudiendo lograrse con todo y con ello propiedades mecánicas similares a las obtenidas mediante los procesos de moldeo. Es idóneo para series de piezas cortas siempre que cumplan con un tamaño mínimo de detalle de 0.15mm, con una tolerancia de  $\pm 0.25$ mm. [21]

### 6.3. Ponderación de las variables

Debido a la gran cantidad de opciones de las que se dispone, primero se compararán los procesos de moldeo con los de impresión. A continuación, se seleccionará el tipo de proceso más conveniente según los requisitos que se buscan y para terminar, se seleccionará el material que se adecue más al material de partida (epoxi novolac)

#### 6.3.1. Comparación entre procesos de moldeo y de impresión

Para esta clasificación se tendrán en cuenta los siguientes aspectos que serán puntuados del 1 al 5 (siendo el 1 muy alto y el 5 muy bajo):

Inversión inicial	Coste por pieza	Tiempo por pieza	Abanico de materiales	Complejidad del proceso
40%	15%	15%	20%	10%

*Tabla 2: Aspectos analizados y sus ponderaciones.*

En nuestro caso, como el volumen de fabricación no va a ser muy elevado, priorizaremos procesos con poca inversión inicial, dejando el coste y tiempo de fabricación por unidad en un segundo plano. El abanico de materiales también ha de ser tenido en cuenta, ya que proporcionara mayor flexibilidad a la hora de encontrar un material que se amolde a los requisitos. Por último, se tendrá en cuenta la complejidad del proceso (un proceso simple será más fácil de comprender y ejecutar).

	Inversión inicial	Coste por pieza	Tiempo por pieza	Abanico de materiales	Complejidad del proceso	TOTAL
Procesos de moldeo	1	3	4	3	3	<b>2.35</b>
Proceso de impresión	3	4	4	2	5	<b>3.30</b>

*Tabla 3: Resultados de la comparación entre moldeo e impresión 3D.*

Como se puede apreciar los procesos de moldeo no son adecuados ya que el costo de los moldes penaliza mucho la inversión inicial. Este tipo de procesos son más adecuados cuando lo que se pretende es fabricar a mayor escala, ya que la inversión se ve rentabilizada. Por lo tanto, a partir de este momento el proyecto se centrará en los procesos de impresión 3D.

### 6.3.2. Comparación de los procesos de impresión

Los aspectos a analizar son similares a los analizados en el apartado anterior, sumándole algunos relacionados con las geometrías buscadas. Las puntuaciones se mantendrán iguales siendo el 1 muy alto y el 5 muy bajo:

Coste por pieza	Tiempo por pieza	Abanico de materiales	Definición de detalles	Acabado superficial	Tolerancias	Resistencia mecánica alcanzable
20%	15%	15%	10%	5%	15%	20%

*Tabla 4: Aspectos analizados y sus ponderaciones dentro de la impresión 3D.*

En este caso se priorizará el coste por pieza y la resistencia mecánica alcanzable, ya que el principal objetivo es lograr una pieza útil con un coste inferior al original. El tiempo necesario para la fabricación también es importante cuando se pretende lograr mayor agilidad a la hora de recambiar la pieza y minimizar el tiempo de maquina parada. El abanico de materiales y tolerancias mínimas no deben ser menospreciadas, para disponer de más opciones en el futuro y lograr piezas con la menor cantidad de error posible. Por último se tendrá en cuenta la capacidad a la hora de generar detalles y el acabado superficial, ya que sumado a malas tolerancias puede resultar que la pieza no encaje adecuadamente.

	S.L.A.	F.D.M.	P.J.	B.J.	L.S.
Coste por pieza	3	5	3	4	3
Tiempo por pieza	3	4	3	5	1
Abanico de materiales	2	3	2	1	5
Definición de detalles	3	2	3	3	2
Acabado superficial	3	2	3	2	1
Tolerancias	3	2	5	3	1
Resistencia mecánica	2	4	2	1	5

<b>TOTAL</b>	2.65	3.45	2.95	2.75	2.90
--------------	------	------	------	------	------

*Tabla 5: Resultados de la comparación entre procesos de impresión.*

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se aprecia que el proceso FDM se impone claramente, debido a la capacidad de lograr piezas de buenas propiedades mecánicas a bajo coste. Al sacrificar definición y tolerancias, será imprescindible chequear la pieza mediante una máquina de medición por coordenadas o CMM para comprobar que el error es admisible.

### 6.3.2. Comparación de los materiales de impresión

Una vez elegido el proceso de fabricación el proyecto se centrará en elegir el material adecuado para lo que se comparará diferentes opciones.

- **A.B.S. PLUS:** Uno de los polímeros usados en la industria de la impresión 3D desde el comienzo gracias a las buenas propiedades mecánicas y su bajo precio. Además, a diferencia de la mayoría de los polímeros aguanta muy bien el calor. Sin embargo, es muy sensible al *warping* (explicado en el apartado 7.2.) y no es recomendable usarlo en exteriores debido a su poca resistencia frente a la radiación ultravioleta del sol.

- **T.P.U.:** Aunque el poliuretano termoplástico sea un material que absorba los impactos queda completamente descartado ya que es muy flexible. Por lo tanto, no servirá para el propósito que estamos buscando.

- **P.L.A.:** Al igual que el A.B.S. PLUS, el ácido poliláctico es un material muy usado en la industria debido a las propiedades que ofrece y su bajo costo. Sin embargo, es un material biodegradable y se disuelve fácilmente en el agua. Como nuestra pieza trabajará sumergida en un tanque de agua deshechamos este material.

- **P.E.T. o P.E.T.G.:** El tereftalato de polietileno o tereftalato de polietileno con glicol modificado es conocido por ser el material del que están hechas la mayoría de las botellas de plástico del mercado. No ofrece buen acabado superficial cuando es usado en impresión, ya que es común encontrar finos hilos en la superficie. Es un polímero resistente al agua con buenas propiedades mecánicas, aunque si se pretende sumergir

en agua este debe ser tratado posteriormente ya que es muy susceptible a sufrir hidrólisis.

- **Nylon:** Este polímero sintético del grupo de las poliamidas es un material flexible, por lo que se descarta su uso al igual como en el caso del T.P.U. Otro de sus problemas es su sensibilidad al agua, pudiendo también sufrir de hidrólisis.

- **A.S.A.:** Este material surgió como alternativa al A.B.S. PLUS con el objetivo de solucionar su carencia ante la radiación ultravioleta. Ofrece propiedades mecánicas buenas, incluso superiores a las del A.B.S. PLUS sin embargo es bastante más caro. Además, requiere de un espacio bien ventilado y conocimientos sobre la impresión 3D ya que es difícil trabajar con él y la hora de fundirse desprende gases potencialmente peligrosos.

- **P.C.:** El policarbonato ofrece buenas propiedades mecánicas tanto al impacto como a la fatiga, aunque es propenso a absorber la humedad. Esta humedad es muy perjudicial si no se controla, ya que acabaría afectando al material en forma de hidrólisis.

- **Polipropileno:** Al igual que el T.P.U. y el Nylon, es un material muy flexible, por lo que queda descartado.

- **P.V.A.:** Aunque el acetato de polivinilo es el material que mejores propiedades mecánicas ofrece de entre los aquí mencionados es muy sensible al agua, ya que se disuelve con facilidad. Por ello, lo más común usarlo como material de soporte para poder ser extraído fácilmente con ayuda de agua.

- **Onyx:** Material fácil de reconocer gracias a su acabado mate negro. Originalmente este material era un nylon técnico de altas propiedades el cual fue cargado con pequeñas hebras de fibra de carbono, lo que aumenta su rigidez 3,5 veces la del Nylon convencional. Aunque presente buenas propiedades mecánicas, al igual que el Nylon puede llegar a sufrir de hidrólisis.

Todos estos materiales podrían ser combinados con fibras de vidrio, carbono o Kevlar. Sin embargo, debido a la forma de las piezas, no es posible orientar las fibras en la dirección de trabajo, por lo que no influyen en el comportamiento de la pieza. La rotura se produce en la intercara entre las diferentes capas del material a la misma tensión se

añadan o no fibras lo que provoca que en este caso añadirlas sea indiferente. [22], [23], [24]



*Figura 20: Empezando desde la “a” piezas fabricadas en: A.B.S. PLUS, T.P.U., P.L.A., P.E.T., Nylon, A.S.A., P.C., Polipropileno, P.V.A. y Onyx. [22]*

Los materiales flexibles y los sensibles al agua quedan descartados, ya que son propiedades opuestas a las precisadas por las piezas. Por lo tanto, tanto el T.P.U., el Nylon y el polipropileno como el P.L.A., el P.E.T., el P.C. y el Onyx no son materiales válidos. [25]

Debido a la ubicación de la impresora, (un sótano), usar un material que desprende gases potencialmente peligrosos puede suponer un peligro. Asimismo, al trabajar las piezas en el mismo sótano, estas no se verán afectadas por la radiación solar haciendo a el A.B.S. PLUS finalmente el material idóneo para el proyecto.

## 7. Impresión mediante F.D.M.

Una vez seleccionado el proceso de fabricación y el material a utilizar el siguiente paso es comprobar que lo supuesto en anteriores apartados puede llevarse a cabo de forma práctica. Para ello, lo primero es comprobar que la maquina F.D.M. de la que disponemos es capaz de generar fusibles con las prestaciones necesarias. Para comprobarlo se fabricarán unas muestras con las que corroborar que cumplen lo estipulado. Estas muestras se fabricarán con forma de probeta de tracción, exactamente de las mismas dimensiones que las ensayadas anteriormente, permitiendo comparar estos resultados con los obtenidos de los ensayos del epoxi novolac.

### 7.1. Parámetros de impresión

Con el fin de obtener un resultado óptimo es necesario conocer los parámetros que permite modificar la impresora. Un mal uso puede influir en las propiedades mecánicas del material, obteniendo resultados completamente inservibles.

La impresora usada durante el proyecto permite modificar los siguientes parámetros:

**a) Selección de la resolución de capa:** El primer parámetro que pide el programa es la resolución y grosor de pared que se desea usar (objetivo: alta resolución y mínimo grosor) para minimizar la probabilidad de la aparición de poros. Estos poros disminuyen las propiedades mecánicas cuya al influencia se ve aumentada al trabajar sumergidos en agua, ya que se puede colar en ellos.

- Valores ofrecidos por la máquina:

Resolución de capa	Grosor de pared
0,254mm	0,914mm

*Tabla 6: Resolución y espesor de capa seleccionados*

Estos parámetros hacen que el tiempo de impresión se vea aumentado, pero es necesario si se quiere que los fusibles sean realmente funcionales.

**b) Selección de la estructura interior:** El segundo parámetro que se ofrece define el interior de la pieza.

- Se disponen de tres opciones:

- Sólido: Ofrece la capacidad de generar elementos más sólidos y duraderos rellenando el interior de la pieza en un 100%.
- Dispersión de alta densidad: Proceso intermedio entre los otros dos, lo que lo dota de gran polivalencia. El interior estará tan solo rellenado en un 70%.
- Dispersión de baja densidad: Ofrece dos variantes de relleno, en forma de panal o cordado. En este caso el interior será prácticamente hueco, ofreciendo una densidad de únicamente el 40%.

Cuanto mayor sea la densidad seleccionada el tiempo de impresión y la cantidad de materia prima a utilizar aumentarán. Aun así, como el objetivo es lograr una pieza lo más maciza posible, se ha seleccionado la primera opción.



*Figura 21: Variación de la estructura interior.*

c) **Selección del tipo de soporte:** El proceso F.D.M. requiere de material de soporte. En el caso de las probetas, no será necesario, ya que son geometrías macizas de 2mm de espesor. Sin embargo tendrá que tenerse en cuenta a la hora de fabricar las células, puesto que al tener cavidades de diferentes espesores será necesario el uso de este material para lograr la geometría deseada.

- Se disponen de tres opciones:
  - Básico: El material de soporte se mantiene en el mínimo posible, solo siendo utilizado para asegurar voladizos. Está formado a base de cordado de baja densidad.
  - Inteligente: Proceso intermedio entre los otros dos. Coloca el material de soporte de manera inteligente, con mayor densidad en la parte inferior y mayor dispersión en la superior. De esta manera se busca maximizar la eficiencia del material utilizado.
  - Completo: Rodea la pieza al 100% asegurando que la pieza queda inmóvil.

En este caso, el material de soporte solo es necesario para garantizar la geometría de las cavidades que presentan los fusibles, por lo que la segunda opción es más que suficiente, logrando ahorrar tanto tiempo como materia prima sin sacrificar demasiado a cambio.

**d) Selección de la orientación de las capas:** La selección de la orientación de fabricación influye considerablemente en las siguientes características de la pieza a imprimir:

- **Velocidad de impresión:** La máquina trabaja más rápido moviéndose en el plano X-Y que en el eje Z. Por lo tanto, si lo que se busca en velocidad es recomendable colocar las caras con mayor superficie paralelas a la base de la impresora.

- **Resistencia:** Esta varía dependiendo la dirección en la que se calcule puesto que la pieza ofrece menor resistencia entre capas que en dirección a estas, ya que las uniones entre capas son más fáciles de romper. Por ello es conveniente orientar la pieza de forma que la dirección de trabajo sea la dirección en la que mayor resistencia ofrece la pieza.

- **Acabado superficial:** Al igual que ocurre con la resistencia la orientación juega un papel importante si se pretende lograr superficies lisas. Usando el ejemplo de un cilindro, este tendrá mejor acabado superficial si se coloca en posición vertical, que colocándolo de lado.

- **Reparación de los errores en el archivo .stl:** En algunas ocasiones el archivo .stl puede tener pequeños defectos aunque no se puedan apreciar a simple vista. El programa dispone de la capacidad de detectar y corregir estos errores, aunque la capacidad de corrección depende de la orientación en la que se encuentren.

Como las células trabajan en dirección al eje de las cavidades, lo ideal es poder colocar los ejes de estos paralelos a la base de la impresora. Sin embargo, las piezas quedan en una posición de demasiada esbeltez, dificultando su fabricación. Por lo tanto, se han colocado las caras de mayor superficie paralelas a la base de la impresora, con el fin de disminuir el tiempo de fabricación. [26]

## 7.2. El warping

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, el A.B.S PLUS es muy susceptible de sufrir de este fenómeno, por lo que se debe intentar minimizar este riesgo lo máximo posible.

La causa de este fenómeno es la contracción del material al enfriarse y entrar en contacto con la temperatura ambiente que pueden producirle deformaciones.



*Figura 22: Pieza de ABS PLUS afectada por el warping.*

Piezas esbeltas o de con una gran superficie, esquinas con ángulos agudos o una nivelación incorrecta de la impresora multiplican la probabilidad de sufrir este fenómeno. Abrir la puerta de la impresora antes de la finalización del proceso de impresión también puede causar daños, ya que el generar un flujo de aire frío contribuye a la aparición de este fenómeno.

Para evitar errores en la fabricación debidos al *warping* se recomienda seguir las siguientes indicaciones:

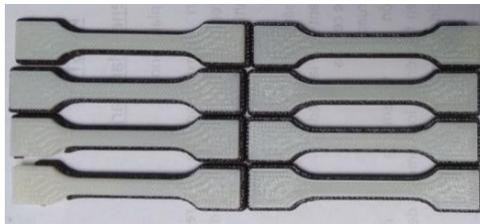
- **Calibrar correctamente la impresora:** Una buena calibración asegura una perfecta adherencia entre el material y la base, evitando posibles despegues.
- **Usar una impresora con base calefactora:** La velocidad de enfriamiento exterior es más moderada, permitiendo un enfriamiento homogéneo.
- **Redondear las esquinas:** De no ser posible añadir unos soportes circulares en las esquinas que se cortarán al terminar la pieza.
- **Precalentar la impresora:** El tiempo puede variar desde quince minutos a una hora dependiendo de la situación.

La posición de las piezas en la base a la hora de imprimir los fusibles también influye a la hora de controlar el *warping*. Las piezas colocadas en los bordes de la base son más susceptibles a sufrir el fenómeno que las colocadas en el centro que apenas lo sufren. Todo ello además tiene relación con posibles corrientes de aire frío provenientes del exterior de la máquina. [\[27\]](#), [\[28\]](#)

## 8. Descripción de los fusibles de A.B.S. PLUS

### 8.1. Propiedades del A.B.S. PLUS

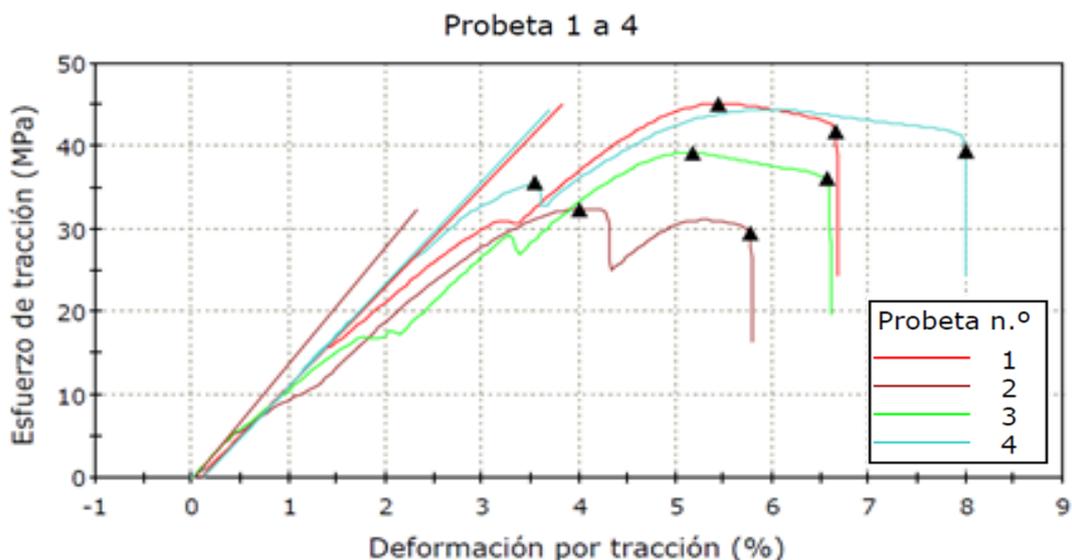
Para identificar las propiedades mecánicas del material de impresión se ha optado por realizar dos ensayos de tracción. Las probetas utilizadas deben tener las mismas dimensiones que las de epoxi novolac ensayadas con anterioridad, con el fin de poder comparar los resultados.



*Figura 23: Probetas de A.B.S. PLUS.*

Se han realizado dos ensayos a tracción de cuatro probetas cada uno, el primero con las probetas húmedas (al igual que el material original) y el otro sin humedad. De esta forma, además de poder compararse los dos materiales se puede cuantificar el efecto de la inserción de las moléculas de agua en los poros que se crean en la pieza durante la impresión.

Los ensayos se han realizado con una precarga de 10 N - 50 N, produciéndose una rotura similar en todas las probetas.



*Gráfico 4: Diagrama esfuerzo de tracción-deformación del A.B.S. PLUS húmedo.*

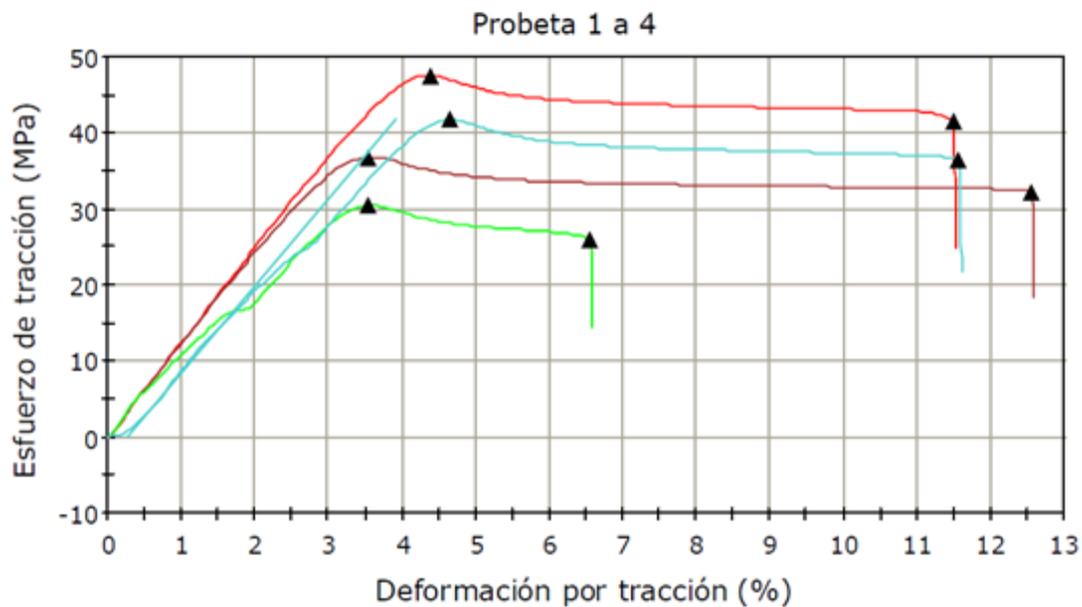


Gráfico 5: Diagrama esfuerzo de tracción-deformación del A.B.S. PLUS sin humedecer.

De esta manera se comparan el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo de rotura y el módulo de Young de ambos ensayos.

La siguiente tabla (tabla 7) muestra los valores medios de los ensayos de donde se obtienen las siguientes conclusiones:

El A.B.S. PLUS húmedo dispone de peores propiedades mecánicas que el seco. Sin embargo, la influencia de los poros, aunque notoria es controlada, ya que siempre se da sobre los 30 MPa por lo que no deberían de suponer ningún problema serio. En el caso de que de que esto suponga un problema a futuro, bastaría con meter las piezas en un baño maría de acetona. Este proceso cierra los poros superficiales, impidiendo que el agua entre al interior.

	Esfuerzo de Fluencia (Pendiente 0)	Esfuerzo de Rotura (Estándar)	Módulo de Young (10N-50N)
<b>A.B.S. PLUS húmedo</b>	39,95 MPa	39,045 MPa	1246,301 MPa
<b>A.B.S. PLUS seco</b>	42,039 MPa	36,691 MPa	1145,107 MPa

Tabla 7: Resultado de ambos ensayos.

Como dato adicional destacar que el material se ofrece en una amplia gama de colores entre los que se encuentran el marfil, el blanco, el negro, el rojo, el verde oliva, el nectarina, el amarillo fluorescente, el azul o el gris.



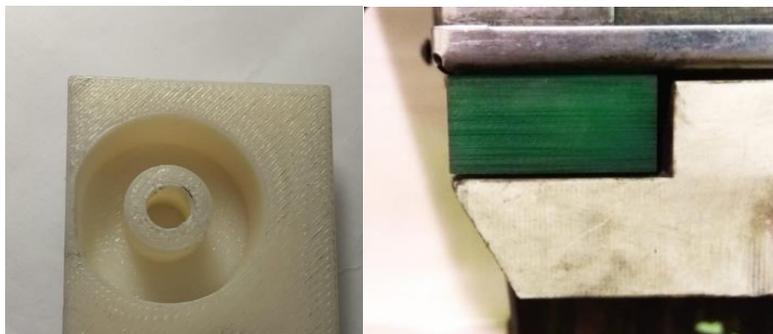
*Figura 24: Fusible superior en marfil y en negro.*

## 8.2. Modificaciones en el diseño

Con el fin de facilitar el proceso de fabricación y superar las limitaciones supuestas por este, se ha optado por realizar un rediseño de los fusibles. Estos cambios en el diseño se dan en el fusible rectangular y no influyen en el comportamiento final de la pieza.

- **Aumento de 0,5 mm del ancho del fusible rectangular:** En el caso del fusible rectangular, hay un punto donde la distancia entre la cara lateral y la del cilindro interior de los concentradores de tensiones es demasiado pequeña, 0,7mm.

Como se aprecia en la *figura 25*, si se imprimen los fusibles rectangulares sin realizar ningún tipo de modificación, la forma cilíndrica de los concentradores de tensiones se deforma.



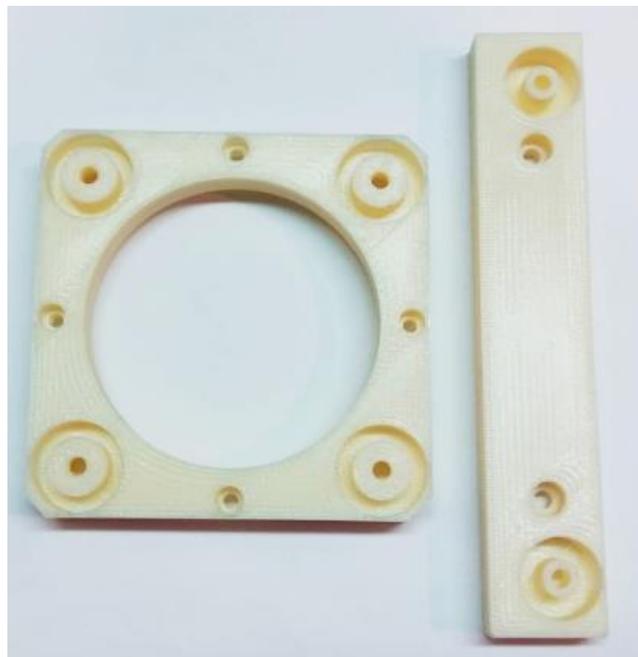
*Figura 25: Fusible mecánico deformado.*

Para evitar posibles problemas de ajuste en la maquina se ha aumentado esta distancia 0,5mm, obteniendo fusibles un poco más anchos. Este cambio no representa ningún problema de ajuste, ya que se dispone de espacio suficiente en esa dirección. (ver *figura 25*)

- **Forma los orificios para tornillos de los concentradores de tensiones:** En el diseño original, estos orificios son de forma cilíndrica de diámetro 6,7mm y se encuentran roscados hasta la mitad de su longitud. Para facilitar el proceso de roscado, se ha optado por fabricarlos con forma cónica, de 5,3mm de diámetro en el extremo roscado y 6,7 mm en el opuesto. De esta manera, al roscar el orificio con un tornillo métrica 6, la rosca queda tan solo en la mitad estrecha, simulando el cilindro original.

El proceso de roscado se puede hacer de manera manual, puesto que el material es blando y se rosca con facilidad. Aun así, es necesario tener sumo cuidado, ya que es la zona de trabajo más sensible a roturas de todo el fusible.

Una vez realizadas todas las modificaciones el resultado es el que se muestra en la *figura 26*.



*Figura 26: Fusibles mecánicos en A.B.S. PLUS.*

## METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROJO DEL TRABAJO

---

### 9. Descripción de las fases y diagrama de Gantt

Para poder realizar este proyecto con éxito se ha separado el trabajo en distintas fases a modo de guía y a lo largo del proceso de fabricación de los nuevos fusibles. El llevarlo a cabo de manera ordenada permite gestionar adecuadamente el tiempo, pudiendo centrarse exclusivamente en los mejores resultados a largo plazo.

- **Fase 1: Búsqueda bibliográfica:** Fase centrada en la búsqueda de información sobre los diversos procesos para así poder disponer de la máxima documentación posible, clave a la hora de valorar los pros y los contras de cada proceso y poder tomar una mejor decisión.
- **Fase 2: Recopilación de información sobre los fusibles originales:** Mediante un análisis espectrométrico, y un T.G.A. se obtiene el material original de los fusibles. A continuación, se realiza un ensayo a tracción para evaluar el comportamiento de los fusibles. De esta manera se identifican las cualidades que debe de tener el fusible mecánico a fabricar.
- **Fase 3: Comparación entre el material original y los disponibles:** Una vez seleccionado el material se comprueba que tiene un comportamiento similar a el material original. Para ello se han realizado dos ensayos de tracción y se han comparado los datos con los obtenidos en la fase 2.
- **Fase 4: Considerar mejoras respecto al diseño original:** Mediante un programa C.A.D. dibujar los planos de los fusibles a imprimir. Aprovechar este proceso para insertar cambios que puedan ayudar tanto en el proceso de fabricación como durante la vida útil del elemento.
- **Fase 5: Impresión de las piezas y control de calidad:** Selección de parámetros idóneos para la impresión. Tras realizar este proceso, verificar que las dimensiones de los nuevos fusibles entran dentro de tolerancia respecto a los originales. Para ello se palparon diversos puntos de ambos fusibles mediante una máquina de C.M.M. De esta manera se garantiza un correcto ajuste en la máquina.
- **Fase 6: Comprobación experimental de los resultados:** Comprobación experimental de la correcta funcionalidad de los fusibles.
- **Fase 7: Escritura del informe:** Proceso de redacción del informe.

<b>REDISEÑO Y FABRICACIÓN ALTERNATIVO DE FUSIBLE MECÁNICO PARA MAQUINA DE ELECTROEROSIÓN</b>			ENE. 2019							FEB. 2019							MAR. 2019							ABR. 2019							MAY. 2019							JUN. 2019			
			W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15	W16	W17	W18	W19	W20	W21	W22	W23	W24																			
<b>Fase 1</b>	Acciones	Fecha Inicio	Fecha Fin	Status																																					
	Búsqueda bibliográfica	W5	W21	Completado																																					
<b>Fase 2</b>	Recopilación de información sobre los fusibles originales	W6	W8	Completado																																					
<b>Fase 3</b>	Comparación entre el material original y los disponibles	W8	W11	Completado																																					
<b>Fase 4</b>	Considerar mejoras respecto al diseño original	W10	W17	Completado																																					
<b>Fase 5</b>	Impresión de las piezas y control de calidad	W15	W21	Completado																																					
<b>Fase 6</b>	Comprobación experimental de los resultados	W20	W24	Completado																																					
<b>Fase 7</b>	Escritura del informe	W6	W24	Completado																																					

Tabla 8: Diagrama de Gantt.

## 10. Descripción de los equipos utilizados

Para llevar a cabo el proyecto se han usado diversos equipos de alto valor. Todos ellos, listados a continuación, se encuentran en la Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao.

- **Análisis espectrométrico:** Se ha utilizado la maquina *Avatar 375 FT-IR ThermoNicolet* que se puede apreciar en la ilustración posterior. Este equipo utiliza el software *Thermo Scientific™ OMNIC™ FT-IR* para analizar los datos. De esta manera se obtienen tanto el número de onda (la cantidad de veces que vibra una onda en una unidad de longitud) como la excitación del analito a dicha onda. Los datos obtenidos se comparan con una base de datos propia del programa lo que permite identificar la composición de la muestra



*Figura 27: Máquina Avatar 375 FT-IR ThermoNicolet.*

- **Análisis T.G.A.:** En este caso se ha utilizado la maquina *TGA Q50* que se puede apreciar en la siguiente imagen. Este equipo utiliza el software *Universal Analysis 2000* para exponer los resultados en la pantalla, permitiendo estudiar a tiempo real lo que está ocurriendo dentro del horno.



*Figura 28: Máquina TGA Q50.*

- **Ensayos de tracción:** Para determinar la resistencia a tracción de ambos materiales se han realizado los ensayos en el dispositivo *Instron 5565*. Este proceso consiste en tirar de una probeta de dimensiones específicas desde los dos extremos. De esa manera se puede determinar de manera simple la reacción de una pieza del mismo material ante una situación real.



*Figura 29: Máquina Instron 5565.*

Estos ensayos están normalizados, por lo que se recomienda seguir la norma para conseguir unos resultados óptimos. En este caso se ha utilizado una precarga de 10N-50N para provocar la tensión inicial, ya que una precarga mayor generaría la rotura sin mostrar valores significativos. [29]

- **Impresora 3D:** A la hora de fabricar los fusibles se ha usado la Impresora F.D.M., modelo *Dimension sst 1200es*.



*Figura 30: Impresora Dimension sst 1200es.*

Esta impresora tiene las siguientes características técnicas:

<b>ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO</b>	
DIMENSIONES (ALTO X ANCHO X LARGO)	1143 mm x 737 mm x 838 mm
PESO	148 kg
REQUISITOS DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA	110–120 V de CA, 60 Hz, circuito exclusivo de 15 A como mínimo / 220–240 V de CA, 50/60 Hz, circuito exclusivo de 7 A como mínimo
<b>ESPECIFICACIONES AMBIENTALES</b>	
RANGO DE TEMPERATURAS DE FUNCIONAMIENTO	De 15°C a 30°C
RANGO DE HUMEDAD RELATIVA	De un 30% a un 70 %, sin condensación
EMISIÓN DE CALOR	1080 Watts (media) 1380 Watts (máxima)
CALIDAD DEL AIRE	Condiciones de calidad de aire con partículas sólidas excesivas (conductoras o no conductoras <sup>9</sup> ) pueden dañar el sistema
<b>ESPECIFICACIONES DE LA PIEZA</b>	
DIMENSIONES MAX. DE LA PIEZA (ALTO X ANCHO X LARGO)	254 x 254 x 305 mm
MATERIAL DE IMPRESIÓN	A.B.S.PLUS en marfil, blanco, negro, rojo, verde oliva, nectarina, amarillo fluorescente, azul o gris
MATERIAL DE SOPORTE	Soluble Support Technology (tecnología de soporte soluble) / Breakaway Support Technology (tecnología de ruptura de soporte)

*Tabla 9: Características técnicas de la impresora Dimension sst 1200es.*

Este equipo utiliza el software *CATALYSTEX* el cual es compatible con *Windows® XP* y *Windows Vista®*. Para ello utiliza una conexión de red *Ethernet TCP/IP 10/100Base-T*. Este software sirve para leer los archivos de las piezas a imprimir en formato *.stl*. [26]

- **Elementos de medición:** El control de calidad se ha realizado con la maquina C.M.M. *ZEISS MC 850* que presenta las siguientes características técnicas:

#### ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

DIMENSIONES (LARGO X ALTO X ANCHO)	2120 x 1560 x 2950mm
PESO APROXIMADO	4000 kg

#### ESPECIFICACIONES DE LA MESA DE TRABAJO

RECORRIDO DE AVANCE DEL EJE X	850mm
RECORRIDO DE AVANCE DEL EJE Y	1200mm
RECORRIDO DE AVANCE DEL EJE Z	600mm
TOLERANCIA APOXIMADA	0,001mm

*Tabla 10: Características técnicas de la máquina C.M.M ZEISS MC 850.*

Esta estación dispone del software de medición *ZEISS CALYPSO*. Este programa, calcula las tolerancias de forma, tamaño y posición del elemento real respecto a un plano C.A.D. (archivo *.sat*). Para ello, mide puntos mediante diferentes palpadores y los compran respecto al valor nominal de los planos. Esta medición puede ser tanto manual como en modo C.N.C. [\[30\]](#), [\[31\]](#), [\[32\]](#)



*Figura 31: Máquina C.M.M. ZEISS MC 850.*

- **Maquina W.E.D.M.:** La máquina para la cual se han fabricado los fungibles es la ONA AX-3 y presenta las siguientes características técnicas:

#### ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

DIMENSIONES (ALTO X ANCHO X LARGO)	2237 mm x 2406 mm x 2287 mm
PESO	3100 kg
CORRIENTE DE TRABAJO	25 A
DIAMETRO DEL ALAMBRE	0.15 mm

#### ESPECIFICACIONES DE LA MESA DE TRABAJO

RECORRIDO DE AVANCE DEL EJE X	400mm
RECORRIDO DE AVANCE DEL EJE Y	300mm
RECORRIDO DE AVANCE DEL EJE Z	250mm
ÁNGULO DE CORTE CÓNICO	$\pm 8.5^\circ$ / 250 mm (altura máx. Z)

#### ESPECIFICACIONES DE LA PIEZA

DIMENSIONES MAX. DE LA PIEZA (ALTO X ANCHO X PROFUNDO)	800 x 700 x 250 mm
PESO MÁXIMO	1000 kg

*Tabla 11: Características técnicas de la máquina de W.E.D.M. ONA AX-3.*

Esta máquina también ha sido usada para fabricar las probetas de acero F114 que sirvieron de plantilla para las de epoxi novolac. [5], [33]



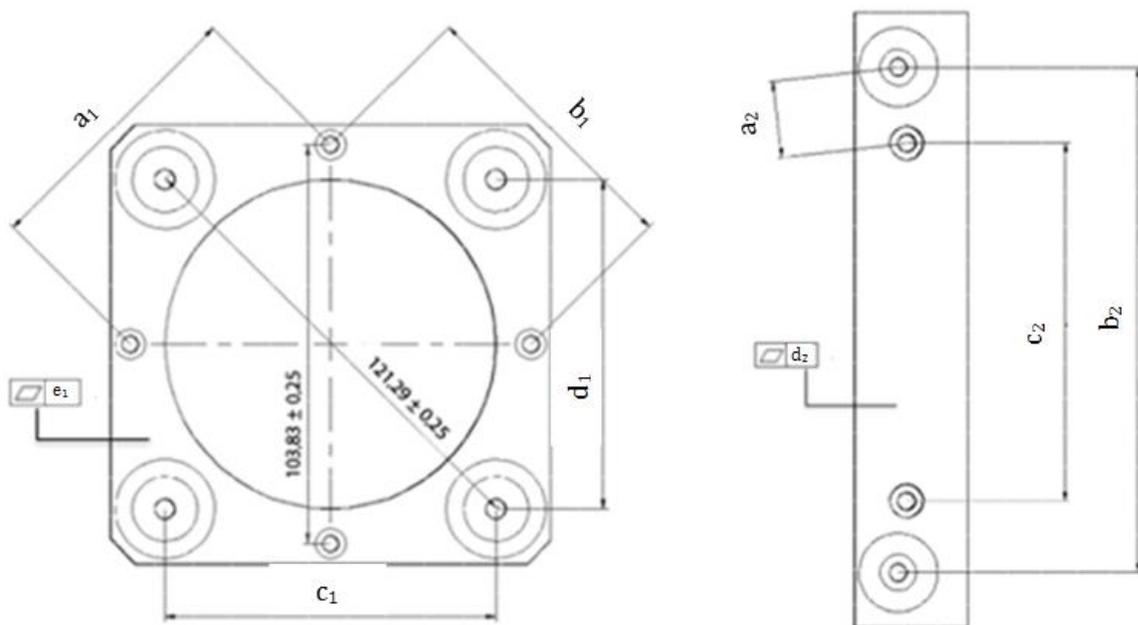
*Figura 32: Máquina W.E.D.M. ONA AX-3.*

## 11. Exposición de los resultados

Este apartado divide los resultados obtenidos en el control de calidad y los obtenidos al colocar los fusibles fabricados en la impresora en la propia máquina.

### 11.1. Control de Calidad

Antes de comprobar si las piezas son funcionales es necesario someterlas a un control de calidad. De esta manera, se puede corregir posibles errores de fabricación o de medición y asegurar que las dimensiones importantes de los fusibles (distancias entre ejes y planitud de la cara en contacto con el cabezal) están dentro de tolerancia. Este control se ha llevado a cabo en una maquina C.M.M, usando el palpador D3 L50 (diámetro 3mm, longitud 50 mm).



*Figura 33: Dimensiones sometidas al control de calidad.*

En las siguientes tablas (*tabla 12* y *tabla 13*) se muestra un análisis comparativo del valor de las cotas tanto para los fusibles originales como para los impresos. Se considerarán válidas todas aquellas cotas cuya diferencia no supere los 0,5mm.

Cota	Fusible original	Fusible impreso	Diferencia
<b>a<sub>1</sub></b>	73,528mm	73,561mm	0,033mm
<b>b<sub>1</sub></b>	73,529mm	73,091mm	0,433mm
<b>c<sub>1</sub></b>	85,982mm	85,529mm	0,453mm
<b>d<sub>1</sub></b>	86,011mm	85,606mm	0,405mm
<b>e<sub>1</sub></b>	0,171mm	0,131mm	0,04mm

*Tabla 12: Control de calidad del fusible cuadrado.*

Cota	Fusible original	Fusible impreso	Diferencia
<b>a<sub>2</sub></b>	22,131 mm	22,085 mm	0,046 mm
<b>b<sub>2</sub></b>	147,013 mm	146,79 mm	0,223 mm
<b>c<sub>2</sub></b>	103,025 mm	103,977 mm	<b>0,952 mm</b>
<b>d<sub>2</sub></b>	0,064 mm	0,1 mm	0,036 mm

*Tabla 13: Control de calidad del fusible rectangular.*

Todas las cotas menos la  $c_2$  están por debajo de la tolerancia  $\pm 0,5$  por lo que se dan por válidas. En el caso de la distancia entre tornillos del fusible rectangular,  $c_2$  el error es prácticamente el doble. Sin embargo, se comprobó experimentalmente que los tornillos encajaban a la perfección, ya que la propia cavidad ofrece una holgura de 0,5mm (el tornillo es de métrica 5 y el orificio es de diámetro 5,43). De esta manera los tornillos se pueden amoldar ofreciendo un ajuste óptimo.

## 11.2. Comprobación de funcionamiento

Una vez realizados todos los cálculos y comprobaciones necesarios para garantizar el correcto funcionamiento de los fusibles es necesario corroborar lo supuesto teóricamente con un ensayo práctico. Con este ensayo se quiere comprobar que los fusibles no sufran de falsas roturas causadas por vibraciones o debidas al propio peso de los cabezales.



*Figura 34: Izq) Fusibles originales. Drch) Fusibles actuales.*

Una vez colocados se ha verificado que soportan el peso de los cabezales sin ningún problema. A continuación, se ha inducido a los cabezales a pequeñas vibraciones y los fusibles se han mantenido en perfectas condiciones.

Con la finalidad de llevar los fusibles al límite se ha realizado una simulación de carga tanto estática como dinámica. Esta comprobación ha sido realizada en el cabezal inferior, ya que es más habitual sufrir las colisiones aquí, pero los resultados obtenidos pueden equipararse para el cabezal superior también. Para ello se ha utilizado un dinamómetro de 150 N y se han usado las funciones *step* (ensayo estático) y *jog* (ensayo dinámico) que ofrece la misma máquina.



*Figura 35: Simulación de carga.*

El fusible se comportó de manera correcta, soportando la carga sin romper y evitando deformaciones que puedan inducir error.

Por último, como los fusibles se han comportado perfectamente se ha decidido realizar un corte y comprobar su funcionamiento real. El corte se ha realizado sin ninguna complicación ofreciendo un comportamiento idéntico al de los fusibles originales.



*Figura 36: Corte con fusibles de A.B.S. PLUS.*

## ASPECTOS ECONÓMICOS

### 12. Descripción del presupuesto

La siguiente tabla (*tabla 14*) desarrolla de manera esquemática el presupuesto disponible para este proyecto:

#### HORAS DE TRABAJO

	Coste/Horas	Horas	Coste
Tutor del Trabajo	35 €/h.	15 h.	525,00 €
Alumno	15 €/h.	200 h.	3.000,00 €
		<b>COSTE TOTAL</b>	<b>3.525,00 €</b>

#### AMORTIZACIONES

	Coste/Horas	Horas	Coste
Maquinaria	80 €/h.	50 h.	4.000,00 €
Licencias	10 €/h.	130 h.	1.300,00 €
Servicio Técnico	5,5 €/h.	150.	825,00 €
		<b>COSTE TOTAL</b>	<b>6.125,00 €</b>

#### GASTOS

	Coste/Unidad	Unidades	Coste
Material	150 €/u.	1 u.	150,00 €
Material de Oficina	25 €/u.	1 u.	25,00 €
		<b>COSTE TOTAL</b>	<b>175,00 €</b>

### RESUMEN DE COSTES TOTALES

Horas de trabajo	3.525,0 €
Amortizaciones	6.125,00 €
Gastos	175,00 €
<b>TOTAL (I.V.A. incluido)*</b>	<b>9.825,00 €</b>

*Tabla 14: Presupuesto del proyecto.*

### 13. Análisis de rentabilidad

La siguiente tabla (*tabla 15*) muestra un análisis comparativo entre el coste actual de la pieza puesta en maquina frente a los costes estimados indicando además el porcentaje de ahorro estimado:

	COSTES ACTUALES	COSTES ESTIMADOS	€ AHORRO	% AHORRO
Precio unitario de fusible	190,00 €	15,00 €	175,00 €	92%
Gastos de envío	10,00 €	0,00 €	10,00 €	100%
Servicio técnico	22,00 €	22,00 €	0,00 €	0%
Coste de funcionamiento de la maquina	0,00 €	7,00 €	-7,00 €	-
<b>TOTAL</b>	<b>222,00 €</b>	<b>44,00 €</b>	<b>178,00 €</b>	<b>80,18%</b>

*Tabla 15: Análisis de rentabilidad del proyecto.*

Según cálculos estimados, el ahorro con respecto al coste actual del fusible mecánico es de un 80,18%, porcentaje mas que significativo para poner en práctica el proyecto.

## CONCLUSIONES

---

Tras la realización de este proyecto, se recogen las siguientes conclusiones.

Como se ha mencionado inicialmente, el costo económico anual destinado a la reparación y reposición de fusibles es demasiado elevado, porque la rotura de los mismos es un hecho habitual en el taller de Mecánica.

La capacidad de fabricar las células de carga en el propio taller en vez de comprarla a terceros ha reducido su coste en un 80,18%. Este ahorro es inmediato desde el momento en que se rompa el primer fusible (ahorro económico) reduciendo el tiempo de demora de entrega de los trabajos encargados (ahorro en tiempo que permite un mayor rendimiento de la máquina).

El proceso seleccionado (impresión 3D) permite disponer de los fusibles en 24 horas como máximo, desde la rotura, minimizando así los tiempos de espera. Como se ha podido comprobar la tecnología F.D.M permite fabricar elementos sin demasiada porosidad y con buenas propiedades mecánicas, factor crucial para el éxito del trabajo.

Por último, cabe recalcar que el comportamiento real de los fusibles ha superado las expectativas. El funcionamiento de estas ha resultado ser impecable e idéntico al original

En conclusión, el proyecto ha resultado ser exitoso y la puesta en práctica de los resultados obtenidos ofrecerá beneficios de manera inmediata.

## BIBLIOGRAFÍA

---

[1] Header Die and Tool. Electrical discharge machining (EDM). Available: <https://www.header.com/capabilities/edm> Visited (February 02, 2019)

[2] Ian Wright (December 15, 2017). EDM 101: Electrical Discharge Machining Basics. Available: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/10100/EDM-101-Electrical-Discharge-Machining-Basics.aspx> Visited (February 02, 2019)

[3] Pasqual Bolufer, Institut Químic de Sarrià (Universitat Ramon Llull) (December 03, 2012). Mecanizado por electroerosión. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/102921-Mecanizado-por-electroerosion.html> Visited (February 02, 2019)

[4] José Antonio Sánchez Galindez, Luis N. López de Lacalle, Aitzol Lamikiz Mentxaka (2006). Electroerosión, procesos máquinas y aplicaciones.

[5] Manual de la máquina de W.E.D.M. ONA AX-3

[6] Método espectrométrico. (2017). Wikipedia, la enciclopedia libre. Available: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9todo\\_espectrom%C3%A9trico&oldid=101673335](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%A9todo_espectrom%C3%A9trico&oldid=101673335) Visited (February 09, 2019)

[7] Mariano. (August 05, 2011). Resina epoxi | Tecnología de los Plásticos. .Resina epoxi | Tecnología de los Plásticos Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/resina-epoxi.html> Visited (February 16, 2019)

[8] Tabla comparativa de recubrimientos Epóxicos. Available: <http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/epoxicos-tabla-comparativa.php> Visited (February 16, 2019)

[9] What is the Novolac Advantage? Construction System Supply. Available: <http://csscorp.net/resources/what-is-the-novolac-advantage/> Visited (February 16, 2019)

[10] Why Novolac Epoxies? Top 10 Advantages of Novolac Epoxies | Dynesic Technologies | Advanced Sealants & Coatings | United States. Dynesic Technologies | Advanced Sealants & Coatings | United States. Available: <https://www.dynesic.com/single-post/2014/12/05/Why-Novolac-Epoxies-Top-10-Advantages-of-Novolac-Epoxies> Visited (February 16, 2019)

[11] Analizador termogravimétrico (TGA) Q50/500 – Limpieza del revestimiento de enfriamiento por agua. . TA Instruments. Available:

<https://www.tainstruments.com/tga-q50500-cleaning-the-water-cooling-jacket/?lang=es>

Visited (February 02, 2019)

[12] AENOR. Acceso de clientes. Available: <https://portal.aenormas.aenor.com> Visited (February 26, 2019)

[13] Polímeros Son moléculas gigantes de origen orgánico se obtienen mediante el proceso de polimerización ppt video online descargar. Available:

<https://slideplayer.es/slide/147473/> Visited (March 2, 2019)

[14] Fabio Jesús Vergara Buelvas. (23:45:25 UTC). Moldeo por compresion. Educación. Available: <https://es.slideshare.net/faveger/moldeo-por-compresion> Visited (March 2, 2019)

[15] Tema 6 Moldeo por Compresion. Available: <http://iq.ua.es/TPO/Tema6.pdf> Visited (March 02, 2019)

[16] Daniel Aldama. Moldeo Por Transferencia. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=NqflSxYsPUk> Visited (March 2, 2019)

[17] Unknown. (May 15, 2014). Molde y conformación de plásticos y materiales compuestos: clases de molde. Molde y conformación de plásticos y materiales compuestos. Available: <http://moldexunipaz.blogspot.com/2014/05/clases-de-molde.html> Visited (March 02, 2019)

[18] Robert A. Malloy (2010) Plastic Part Design for Injection Molding Editorial: Hanser Gardner

[19] Dominick Rosato (1997) Plastics Processing Data Handbook Editorial Chapman&Hall

[20] Richardson & Lokensgard (1999) Industria del Plástico. Plástico Industrial Ediciones Paraninfo.

[21] David Torreblanca Díaz (2016) Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos Available:

<https://revistas.upb.edu.co/index.php/iconofacto/article/view/6864> Visited (March 03, 2019)

[22] Ultimate 3D Printing Material Properties Table. Available: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/> Visited (March 16, 2019)

[23] ONYX. 3D para Todos - Tresdp . Available: <https://tresdp.com/onyx/> Visited (March 16, 2019)

[24] MarkForged presenta su nuevo filamento Onyx con fibra de carbono para mejorar acabados con sus impresoras 3D - Impresoras 3D. Imprimalia 3D. Available: <http://imprimalia3d.com/noticias/2016/06/28/006461/markforged-presenta-su-nuevo-filamento-onyx-fibra-carbono-mejorar> Visited (March 16, 2019)

[25] Hidrólisis. (May 29, 2017). Available: <https://todoenpolimeros.com/2017/05/29/hidrolisis/> Visited (March 17, 2019)

[26] Manual de la impresora Dimension sst 1200es

[27] impresoras3d.com. (December 31, 1969). El warping: Qué es y cómo evitarlo. de impresoras3d.com. Available: <https://www.impresoras3d.com/el-warping-que-es-y-como-evitarlo/> Visited (April 06, 2019)

[28] Warping and Cracking With Closed Environment FDM 3D Printers, Box3d. (October 20, 2017,). Box3d. Available: <https://box3d.eu/warping-cracking-closed-environment-3d-printers/> Visited (May 25, 2019)

[29] Mechanical Testing, Instron 5565 | NNCI. Available: <https://www.nnci.net/tools/mechanical-testing-instron-5565> Visited (June 17, 2019)

[30] Zeiss MC 850 Coordinate Measuring Machine - Greasy Machines. Available: <http://www.greasymachines.com/warehouse/Catalog/Listing/3138> Visited (June 17, 2019)

[31] ZEISS MC 850 MACHINE, COORDINATED MEASURING. Available: <http://www.getramack.it/en/control-tools/233-zeiss-mc-850-beigeordnete-messmaschine.html> Visited (June 17, 2019)

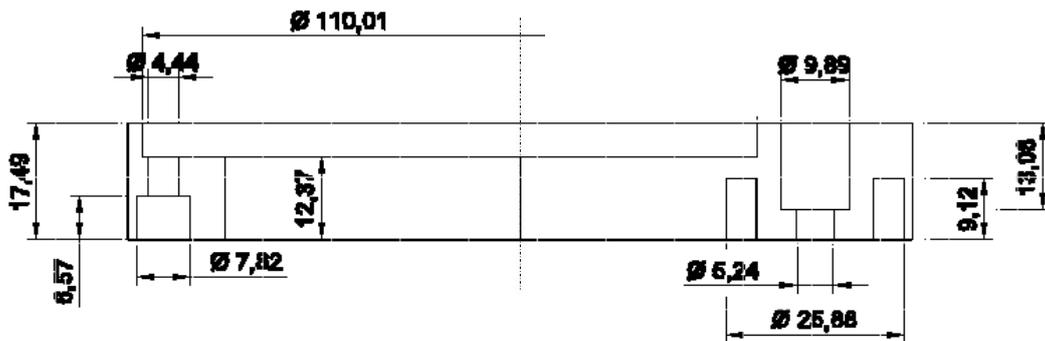
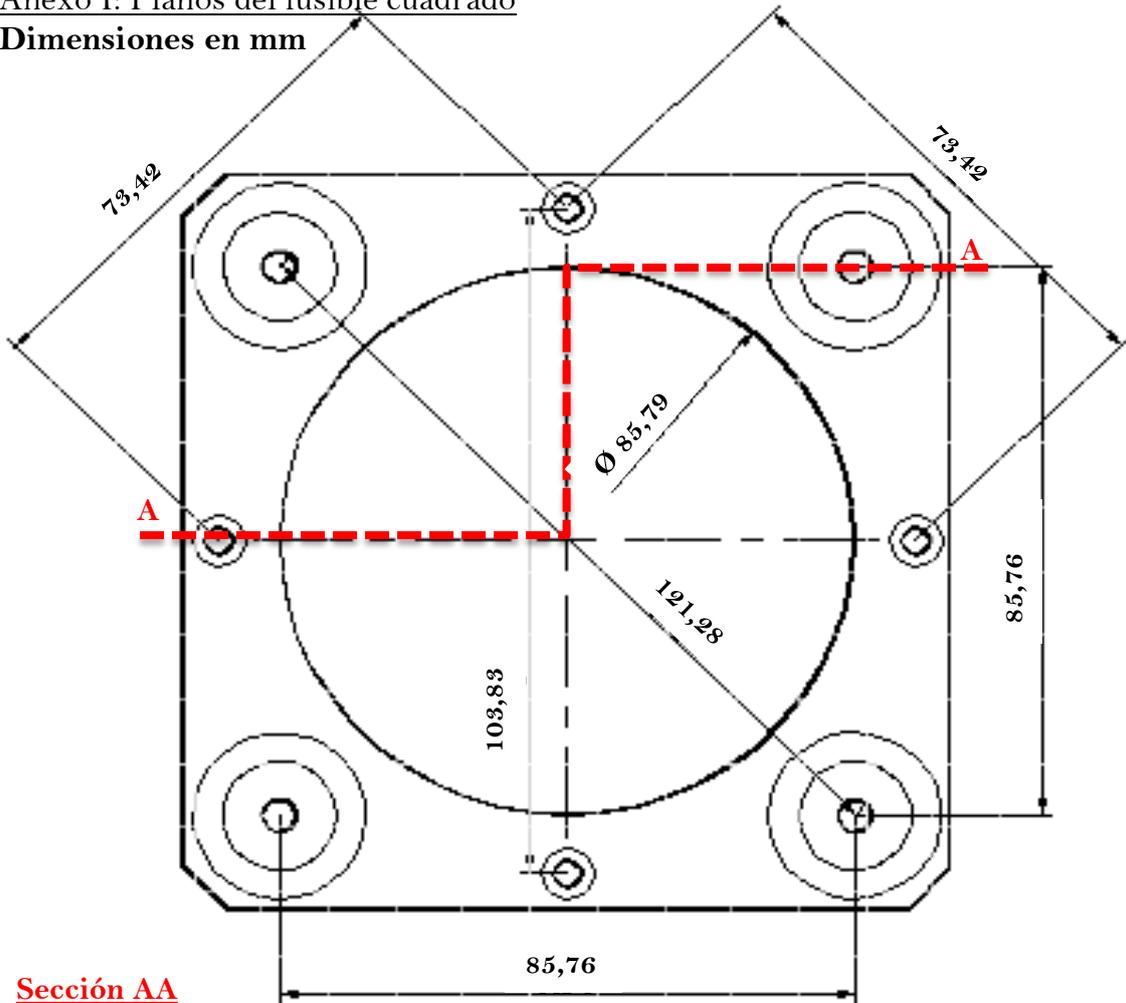
[32] Used CARL ZEISS MC 850 CMM for Sale | Asset-Trade. (July 19, 2017). Available: <https://es.assettradeGermany.com/content/zeiss-mc-850-cmm> Visited (June 17, 2019)

[33] GINDUMAC. Máquina de erosión ONA AX3. Available:  
[https://www.gindumac.es/producto/ona-ax3\\_ES-EDM-ONA-2007-00001](https://www.gindumac.es/producto/ona-ax3_ES-EDM-ONA-2007-00001) Visited (June 24,  
2019)

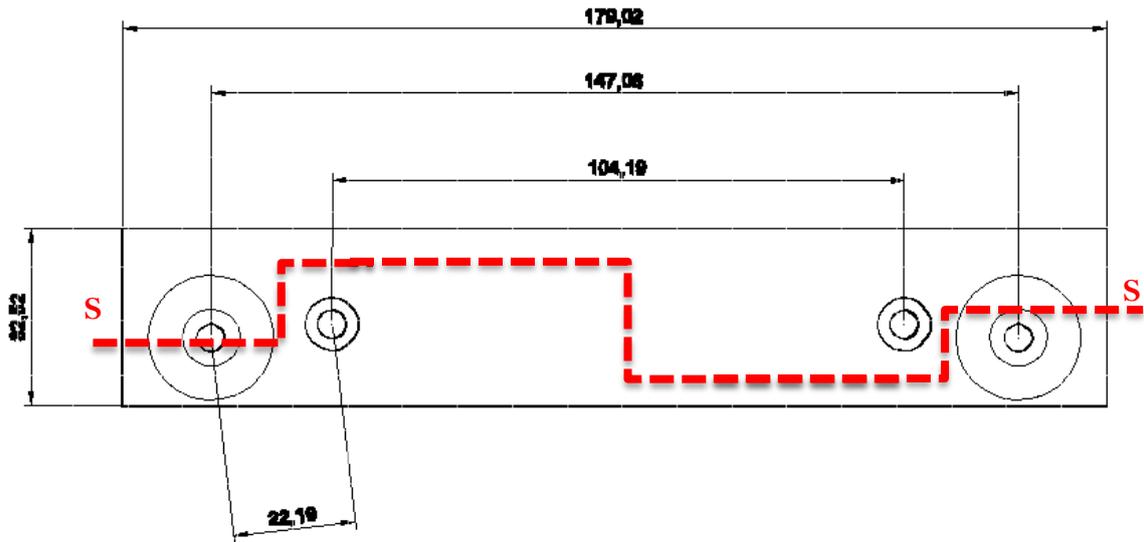
## ANEXOS

### Anexo I: Planos del fusible cuadrado

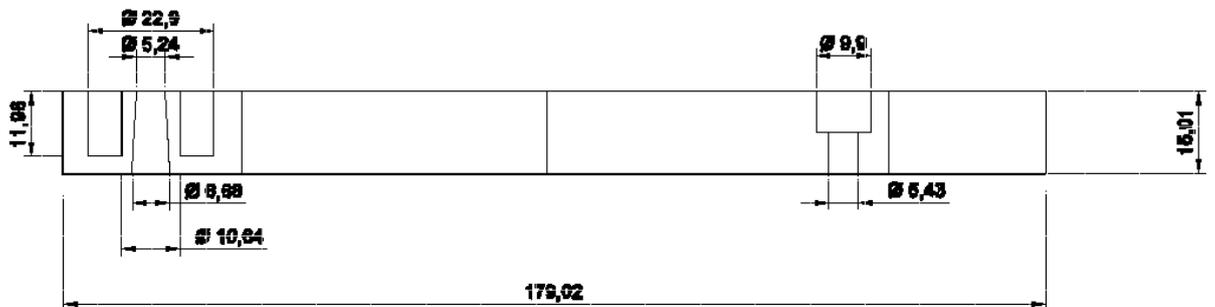
Dimensiones en mm



Anexo II: Planos del fusible rectangular
  
**Dimensiones en mm**



**Sección SS**



Anexo III: Planos de la impresora Dimension sst 1200es

<b>1 Cabezal de extrusión</b>	<b>8 Panel de control</b>
<b>2 Boquilla de extrusión</b>	<b>9 Conjunto de limpieza de la boquilla</b>
<b>3 Barras guía</b>	<b>10 Contenedores de purga</b>
<b>4 Tornillo guía</b>	<b>11 Plataforma de impresión</b>
<b>5 Base de impresión</b>	<b>12 Retenedores de la base de impresión</b>
<b>6 Cartucho de material de impresión</b>	<b>13 interruptor de encendido</b>
<b>7 cartucho de material de soporte</b>	

