



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ANÁLISIS
DIMENSIONAL DE UN ÚTIL DE CONTROL
PRODUCIDO MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA.
PARTE I.

Autor: Ignacio Mendialdua Landecho

Director: Manuel Domínguez Somonte

Madrid

Julio de 2020

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Diseño, fabricación y análisis dimensional de un útil de control mediante fabricación aditiva. Parte I.

en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2019/2020 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo: Ignacio Mendialdua Landecho Fecha: 17/07/2020



Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo: Manuel Domínguez Somonte Fecha: 17/07/2020



GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ANÁLISIS DIMENSIONAL DE UN ÚTIL DE CONTROL PRODUCIDO MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA. PARTE I.

Autor: Ignacio Mendialdua Landecho

Director: Manuel Domínguez Somonte

Madrid

Julio de 2020

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ANÁLISIS DIMENSIONAL DE UN ÚTIL DE CONTROL PRODUCIDO MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA. PARTE I.

Autor: Ignacio Mendialdua Landecho

Director: Manuel Domínguez Somonte

ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO.

Introducción

El objetivo de este proyecto es el de diseñar y fabricar un útil de control mediante tecnologías de fabricación aditiva. En este caso se ha decidido diseñar un útil de control para procesos de soldadura. Normalmente para los procesos de soldadura se usan herramientas de utillaje que aseguren el correcto posicionamiento de las piezas y restrinjan el movimiento relativo entre ambas con el objetivo de obtener una buena soldadura sin defectos. Dependiendo de la geometría de la pieza final se deben combinar todos estos utillajes tradicionales hasta encontrar la posición correcta, normalmente con la ayuda de una mesa de soldadura. En cuanto la geometría de la pieza a soldar empieza a ser más compleja debemos personalizar estas sujeciones y contactar con una empresa externa que nos haga ese diseño. Si se pudiera implementar el uso de la impresión 3D para este diseño y fabricación de útiles de control de soldadura, se conseguirían geometrías mucho más complejas, con diseños personalizados y tiempos de fabricación pequeños.

En este caso se ha decidido diseñar un útil basándose en uno ya existente, pero otorgándole ciertas mejoras. Utilizando la idea de unos imanes para sujetar las piezas a soldar se ha decidido diseñar una herramienta que permite posicionar dos piezas en el ángulo que se desee entre 20° y 90° y sin movimiento relativo entre ambas. Primero se ha realizado una selección tanto de material como de tecnología de fabricación aditiva para cada pieza, y después se ha simulado su fabricación y calculado un presupuesto. Con todos estos datos veremos si es posible sustituir los útiles tradicionales con otros impresos en 3D.

Metodología

Primero se diseñó el útil en cuestión con la ayuda del software “SolidEdge” de diseño en 3D. Para el diseño se han tenido en cuenta los espacios necesarios entre piezas de 0,3mm para asegurar el correcto movimiento relativo entre ellas. Este útil consta de siete elementos fundamentales:

- Pieza Apoyo A: pieza que se apoya en el material base a soldar y donde se introducirá un imán.
- Pieza Apoyo B: esta es la otra pieza que también estará en contacto con el material base y en la que también se introduce un imán.
- Pieza Clip: será la encargada de bloquear los imanes dentro de el Apoyo A y Apoyo B, es por eso que serán necesarias dos unidades de estas piezas.

- Pieza Unión: es la encargada de unir las piezas apoyo A y Apoyo B a través de los tornillos y palomillas.
- Imán: irá dentro de las piezas de apoyo, es de neodimio con grado N35AH para trabajar bien a altas temperaturas.
- Tornillos M5x25 y palomillas M5: sirven para montar el útil y unir todas piezas, con las palomillas se apretarán las piezas entre ellas y se restringirá el movimiento.

Una vez se finalizó el diseño se empezó con la selección del material. Para eso realizamos dos selecciones distintas, una para las piezas que están en contacto directo con el material a soldar (Apoyo A, Apoyo B y Clip) y otra para la pieza Unión, pues las condiciones de temperatura de trabajo serán diferentes en los dos casos.

Para las piezas en contacto directo con el material base se necesitaba un material que trabajara bien a altas temperaturas. Para tener una cifra aproximada del rango de temperaturas máximas en las que tendrían que trabajar estas piezas se ha realizado una simulación de soldadura con la ayuda del software ANSYS. Para ello se crearon dos planchas de acero y se dispusieron en posición de 90°, después se calentó la unión a la temperatura de fusión durante un tiempo y se registró la temperatura en el punto donde iría apoyado el útil, obteniendo una temperatura máxima de 289°C. Con esta temperatura máxima se pudo seleccionar de entre los materiales más utilizados en la fabricación aditiva aquellos que podrían trabajar con esta temperatura. Para la selección final entre los candidatos se consultó el precio de cada uno de ellos y se escogió el más económico, en este caso un termoplástico de alto rendimiento PEEK reforzado con un 20% de fibra de vidrio, el ThermaXTM GF-20, que se fabrica con la tecnología MDF (modelado por deposición fundida).

En cuanto a la pieza unión, las condiciones de trabajo no serían tan extremas y se podría elegir un material más asequible y que fuese fácil de trabajar. Para poder reducir la selección se impusieron ciertas restricciones y se eliminaron materiales con poca resistencia a la luz solar, así como materiales que aguantaran muy poca temperatura como el PLA. Al final se seleccionaron tres posibles candidatos con tecnologías diferentes: ABS para fabricar con MDF, Digital ABS plus para fabricar con PolyJet y poliamida Ultrasint PA6 MF para fabricar con SLS. En este caso se escogió el ABS con tecnología MDF para simplificar los cálculos de presupuesto y por ser el proceso más conocido.

Una vez se habían escogido los materiales y procesos de fabricación para todas las piezas se realizó un presupuesto con la ayuda del software “CURA” que nos simula el proceso de fabricación y estima la cantidad de material utilizado y el tiempo que tarda en imprimirlas. Con estos datos y una estimación del coste de utilización de la máquina se llegó a un presupuesto del precio final de fabricación. Posteriormente se estudió la rentabilidad económica del proyecto aplicándolo a un ejemplo real y comparando los costes de utilizar nuestro útil frente a otro tradicional.

Resultados

El resultado obtenido tras la realización del proyecto es que sí es posible la fabricación de un útil de control para soldadura mediante la impresión 3D gracias a la aplicación de materiales termoplásticos de alto rendimiento reforzados, sin embargo, su coste es más elevado que el de los materiales tradicionales de impresión 3D y tienen que cumplirse

ciertas características técnicas para su correcta fabricación. Además, en el estudio económico se ha visto que el coste total de fabricación del útil es de 139,363€ y que en muchas aplicaciones sencillas puede no merecer la pena su utilización frente a otros elementos comercializados con precios más bajos. También hay que decir que su rentabilidad económica se verá afectada por la geometría de soldadura que se quiera realizar, y que pueden darse casos en los que sí sea recomendable su utilización. Es por eso que se debe realizar un pequeño estudio del posicionamiento de las piezas antes de la soldadura para ver que opción es la más económica.

DESIGN, FABRICATION AND DIMENSIONAL ANALYSIS OF A CHECKING FIXTURE USING ADDITIVE MANUFACTURING. PART I.

Author: Ignacio Mendialdua Landecho

Director: Manuel Domínguez Somonte.

ICAI- Universidad Pontificia comillas.

PROJECT ABSTRACT.

Introduction

The objective of this project is to design and manufacture a control tool using additive manufacturing technologies. In this case it was decided to design a checking fixture for welding processes. Normally for welding processes, tools are used to ensure the correct positioning of the parts and to restrict the relative movement between them, with the aim of obtaining a defect-free welding. Depending on the geometry of the end piece, all these traditional tools must be combined until the correct position is found, usually with the help of a welding table. As soon as the geometries and therefore the positions of the parts become more complex we must customize these fasteners and contact an external company that makes us that design. If we implement the use of the additive manufacture we could obtain much more complex geometries, custom designs and small manufacturing times.

In this case it has been decided to design a welding fixture based on an existing one, but giving it certain improvements. Using the idea of magnets to hold the parts to be welded it has been decided to design a tool that allows to position two pieces at the desired angle between 20° and 90° and without relative movement between them. At first we made a selection of both material and additive manufacturing technologies for each element, and then we made a manufacture simulation and calculated a total budget. With all this data we will see if it is possible to replace the traditional welding fixtures with 3D printed ones.

Methodology

The tool was first designed with the help of the 3D design "SolidEdge" software. The necessary spaces of 0.3mm between parts have been taken into account for the design to ensure proper relative movement between all parts. This tool consists of seven fundamental elements:

- Support A: part that rests on the base material to be welded and where a magnet will be inserted.
- Support B: this is the other part that will also be in contact with the base material and in which a magnet is also inserted.
- Clip: will be responsible for blocking the magnets within Support A and Support B, that is why two units of these parts will be required.
- Join: is responsible for joining the parts support A and Support B through the screws and pigeons.

- Magnet: will go inside the support pieces, it is neodymium with N35AH which works well at high temperatures.
- M5x25 screws and M5 pigeons: they serve to assemble the tool and join all pieces together, the pigeons will tighten the pieces and restrict the movement.

Now that the design was finished, we began the material selection. We made two different selections, one for the parts that are in direct contact with the material to be welded (Support A, Support B and Clip) and another for the Union part, as the working temperature conditions will be different in both cases. For parts that are in direct contact with and base material an approximation of the maximum temperature range in which these parts would have to work was needed. To calculate this temperature a welding simulation has been performed with the help of ANSYS software. For this purpose, two steel plates were created and arranged in a position of 90°, then we applied the melting temperature to the bond for a while and registered the maximum temperature of the tool working point, obtaining a maximum temperature of 289°C. With this maximum temperature it was possible to select from among the most used additive manufacturing materials those that could work with this temperature. For the final selection among the candidates we consulted the prices of all of them and selected the cheapest one, in this case a thermoplastic of high-performance PEEK reinforced with 20% fiberglass, the ThermaX™ GF-20, which would be manufactured with FDM technology (fused deposition modeling).

As for the “Join”, the working conditions were not so extreme and we could choose a more affordable material that would be easy to work with. In order to reduce the selection, certain restrictions were imposed such as low resistance to sunlight or outdoor working conditions, as well as bad temperature resistance such as the PLA. In the end, three possible candidates with different technologies were selected: ABS to manufacture with FDM, Digital ABS plus to manufacture with PolyJet and Polyamide Ultrasint PA6 MF to manufacture with SLS. Once the materials and manufacturing processes for all the parts had been chosen, a budget was made with the help of the CURA software, which simulates the manufacturing process and estimates the amount of material used and the time it takes to print them. With this data and an estimated cost for the use of the machine, a budget of the final manufacturing price was reached.

Results

The result obtained after the completion of the project is that the manufacture of a welding fixture through 3D printing is possible thanks to the application of reinforced high-performance thermoplastic materials, however, their cost is higher than traditional 3D printing materials and certain technical characteristics have to be met for their correct manufacture. In addition, the economic study has shown that the total cost of manufacturing the tool is 139,363 euros, and that in many simple applications it may not be worth using it compared to other marketed tools with lower prices. It should also be said that its economic profitability will be affected by the welding geometry that you want to perform, and that there may be cases where it is advisable to use it. That is why a small study of the positioning of the parts must be performed before welding to see which option is the most economical.

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

DOCUMENTO I: MEMORIA.

1. ESTADO DEL ARTE	18
1.1. Introducción a la fabricación aditiva	18
1.2. Clasificación de los principales procesos de la fabricación aditiva.....	19
1.3. Clasificación de los principales materiales en la fabricación aditiva.	22
1.4. Útiles de control y la fabricación aditiva.	25
1.5. Útiles de control en procesos de soldadura.....	27
1.6. Clasificación de los procesos de soldadura.	28
2. MEMORIA	32
2.1. Introducción.....	32
2.2. Problema a resolver.	32
2.3. Diseño del útil.....	33
2.3.1. Introducción.....	33
2.3.2. Diseño: elementos y funcionalidad.	33
2.3.3. Ensamble final.....	36
2.3.4. Funciones y ejemplos de aplicación.....	38
2.4. Selección del material y proceso de fabricación aditiva para las piezas “Apoyo A”, “Apoyo B” y “Clip”.....	40
2.4.1. Temperatura de la superficie.	41
2.4.2. Materiales adecuados.	47
2.4.3. Selección final del material.	50
2.5. Selección del material y proceso de fabricación aditiva para la pieza “Unión”.....	52
2.6. Fabricación de las piezas.	54
2.6.1. Fabricación de las piezas “Apoyo A”, “Apoyo B” y “Clip”.....	54
2.6.2. Fabricación de la pieza “Unión”.	56
3. ESTUDIO ECONÓMICO.	60
4. ANEXO: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	63
4.1. ODS más afectado por el TFG.....	63
4.2. ODS secundario.	64

DOCUMENTO II: PLANOS.

1. LISTADO DE PLANOS.	68
------------------------------------	----

DOCUMENTO III: PLIEGOS DE CONDICIONES.

1. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS Y PARTICULARES	75
1.1. Condiciones de fabricación.	75
1.1.1. Condiciones de fabricación para las piezas “apoyo A”, “Apoyo B”, y “Clip”	75
1.1.2. Condiciones de fabricación para la pieza “Unión”.....	75
1.2. Condiciones de trabajo.	76

DOCUMENTO IV: PRESUPUESTO.

1. INTRODUCCIÓN	79
2. PRESUPUESTOS DE FABRICACIÓN	79

BIBLIOGRAFÍA	¡Error! Marcador no definido.
---------------------------	--------------------------------------

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Máquina de modelado por deposición fundida (MDF) www.impresora-3d.online.com	19
Ilustración 2: Máquina de fusión selectiva de lecho de polvo www.mizaradditive.com	20
Ilustración 3: Máquina de estereolitografía (SLA). www.100cia.site	21
Ilustración 4: Fabricación por partículas balísticas. Imagen obtenida de [4]	21
Ilustración 5: Ejemplos de sujeción de elementos mediante útiles de control. www.xyz-engineering.es , www.renishaw.es	25
Ilustración 6: Útil de control para herramienta Volkswagen. www.ultimaker.com	26
Ilustración 7: Mesa de soldadura con todos los útiles de control. www.newweldtable.com	28
Ilustración 8:Útil de control fabricado mediante impresión 3D. www.markforged.com	28
Ilustración 9: Soldadura fuerte. Imagen de www.ferrepro.mx	28
Ilustración 10: Ilustración soldadura SMAW. Imagen de www.esab.com	30
Ilustración 11: Ilustración soldadura MIG. Imagen de www.ilmo.es	30
Ilustración 12: Ilustración soldadura TIG. Imagen de www.samiensman.com	30
Ilustración 13: Posiciones de la escuadra magnética. Imagen obtenida de www.truper.com	33
Ilustración 14: Escuadra magnética. Imagen obtenida de www.truper.com	33
Ilustración 15: Imanes de 60x10x5mm necesarios.....	34
Ilustración 16: Palomilla M5 (izquierda) y tornillo M5x25 (derecha)	34
Ilustración 17: Apoyo A en dos vistas.....	35
Ilustración 18: Pieza clip (izquierda) y montaje del apoyo A (derecha).	35
Ilustración 19: Apoyo B y su montaje.	36
Ilustración 20: Pieza "unión"	36
Ilustración 21: Útil de control ensamblado con una unión y en posición de 90° entre ambos apoyos.	37
Ilustración 22: Ejemplo del útil con 2 piezas unión en dos posiciones.	38
Ilustración 23: Útil con una sola pieza de unión y 55° entre las caras de los apoyos. ...	38
Ilustración 24: Útil con tres piezas de unión y 110° entre las caras de los apoyos.	38
Ilustración 25: Estructura de acero del banco empotrado.....	39
Ilustración 26: Banco empotrado.....	39
Ilustración 27: Distintas posiciones del útil para soldar estructura.	39
Ilustración 28: Estructura final soldada.	40
Ilustración 29: Ilustración de la ZAT en soldadura. Obtenida de www.arcflightplasma.blogspot.com	41
Ilustración 30: Útil a 90° y la distancia al cordón de soldadura.	42
Ilustración 31: Acero estructural predeterminado en ANSYS	43
Ilustración 32: Abrir la geometría en el módulo Transient Thermal	44
Ilustración 33: Mallado de la geometría.	44
Ilustración 34: Temperatura dada a las superficies para la simulación.	45
Ilustración 35: Solución de la simulación. Distribución de la temperatura por las planchas.	45
Ilustración 36: Posición del nodo de estudio	46

Ilustración 37: Registro de temperaturas en el nodo, solución en pantalla por ANSYS.	46
Ilustración 38: Añadir solución para el nodo.....	46
Ilustración 39: Ultrasint PA6 MF para SLS. Imagen de www.materialise.com	53
Ilustración 40: Digital ABS Plus para PoliJet. Imagen de www.stratasys.com	53
Ilustración 41: Pieza unión y fuerzas aplicadas.....	54
Ilustración 42: Posición de la pieza "Clip" en la impresión 3D	55
Ilustración 43: Posición de las piezas "Apoyo A" y "Apoyo B" en la impresora MDF. 56	
Ilustración 44: Posición de la pieza "Unión" en la impresión MDF.	57
Ilustración 45: ejemplo banco de espera del apartado 2.3	60
Ilustración 46: posición de las piezas en la mesa (derecha) y ejemplo de útil de sujeción (izquierda) imagen de Euroweld	60
Ilustración 47: Mordazas de sujeción. Imágenes de Euroweld (izq) y Bessey (der).....	61
Ilustración 48: Sargento palanca. Imagen obtenida de Euroweld.	61
Ilustración 49: Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.	63
Ilustración 50: creación de impresora customizada en CURA.....	79
Ilustración 51: simulación de impresión de las piezas.	80

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Características técnicas del imán de neodimio grado N35AH. Tabla obtenida de www.imamagnets.com	34
Tabla 2: Materiales comercializados y su máxima temperatura de trabajo.....	48
Tabla 3: Selección de los posibles materiales.	50
Tabla 4: Comparativa de precios impresión 3D metal de las piezas.	51
Tabla 5: Comparativa de precios para termoplásticos de alto rendimiento con impresión MDF.	51
Tabla 6: Comparación materiales para la pieza "Unión"	52
Tabla 7: Peso que soportará la pieza "Unión" antes de rotura para cada material.	54
Tabla 8: Tabla presupuesto piezas Apoyo A, Apoyo B y Clip.....	80
Tabla 9: Presupuesto de la pieza Unión.....	80
Tabla 10: Coste final del útil.	80

DOCUMENTO I: MEMORIA

1. ESTADO DEL ARTE.

1.1. Introducción a la fabricación aditiva

Todo desarrollo de un producto comienza con un modelo 3D creado con un sistema DAC (Diseño Asistido por Computadora) con el que se verifican sus características dimensionales y estéticas. Después se utiliza un programa de ingeniería asistida por ordenador (conocido como CAE por sus siglas en inglés) con el que se verifica el rendimiento del producto y se simularan los procesos de fabricación del mismo. Este tipo de simulaciones resultan muy útiles y prácticas al no ser necesaria la fabricación física del prototipo, sin embargo, en muchas ocasiones es necesaria una evaluación física y visual y habrá que fabricarlo. Esto significará un mayor consumo de tiempo y de dinero que puede resultar un problema cuando se trabaja con bajos lotes de producción. Para acabar con este problema se empezó a desarrollar la tecnología que se conoce como “Prototipado Rápido”, la cual revolucionó los procesos de producción permitiendo obtener prototipos de los productos finales con un bajo coste y en poco tiempo gracias a la fabricación aditiva.

“La fabricación aditiva (en inglés, additive manufacturing), también denominada fabricación por adición, es un nuevo concepto que fusiona la producción en serie y la artesanal, transformando la cadena de suministro y la cadena de valor, lo que implica que la utilización potencial de este modelo productivo afectará de forma importante a la logística empresarial. Puede definirse como un proceso a través del cual el material, que puede ser plástico o metal, será depositado mediante capas de forma controlada en los puntos en que este es necesario. Con esta técnica, que se conoce comúnmente como «impresión 3D», se fabrican objetos con formas geométricas personalizadas según las necesidades de los clientes.” [1]. En otras palabras, la fabricación aditiva (se usará la abreviatura FA a partir de ahora) es un tipo de proceso que forma parte de las tecnologías usadas para crear, a partir de un modelo digital, un prototipo o directamente el producto final en tres dimensiones.

Se habla de una Cuarta Revolución Industrial también llamada Revolución Digital donde la FA tiene un papel protagonista. En las últimas décadas ha habido una transición hacia lo digital en la industria, y las fábricas han ido incorporando programas de diseño asistido por ordenador, así como el uso de la FA en sus procesos de producción. Aunque se siguen utilizando mayormente los métodos de fabricación tradicionales como la fundición por moldeo, el arranque de viruta, o la deformación, la FA ha aportado para algunas aplicaciones específicas más precisión en un menor tiempo y con un menor mantenimiento. Por ahora el uso de estas tecnologías son más limitados a la hora de enfrentarse ante geometrías muy complejas que no cumplen con las limitaciones de las máquinas.

1.2. Clasificación de los principales procesos de la fabricación aditiva.

Dentro de la FA encontramos varios procesos distintos que se diferencian dependiendo del tipo de tecnología de la máquina de impresión 3D y del material usado. Hay una gran variedad de materiales y será imprescindible su elección para la correcta fabricación del objeto, dependiendo del tipo de material tendremos que usar diferente tipo de proceso de fabricación. Podemos separarlos en tres grandes grupos:

- Materiales líquidos: resinas líquidas y polímeros termoplásticos fundidos. Usados para la estereolitografía (SLA) y fotolitografía.
- Materiales en polvo: puede ser polvo metálico o polvo plástico. Usados en la fusión selectiva de lecho de polvo (SLS, SLM, EBM).
- Materiales sólidos: suelen ser normalmente plásticos. Utilizados para el modelado por deposición fundida (MDF).

A continuación, se explicarán los otros procesos para el prototipado rápido más utilizados en la actualidad:

- **Modelado por deposición fundida (MDF)** es uno de los procesos más populares y utilizados debido a su sencilla tecnología, su bajo coste de equipamiento y por la posibilidad de trabajar con polímeros. Se basa en una máquina con un cabezal móvil que funde el material y lo va depositando por capas una encima de otra en un plano y que al solidificar crea la pieza diseñada. Es importante tener en cuenta la orientación de la pieza a la hora de la impresión pues las fibras deben ir orientadas en la dirección perpendicular a el esfuerzo para garantizar una buena resistencia y evitar la rotura. Este tipo de impresión tiene algunas limitaciones geométricas como el tamaño de la pieza que dependerá del tamaño de la impresora, o algunos problemas de precisión en superficies curvas donde habrá que ajustar la tolerancia de cuerda y la tolerancia angular. Los materiales utilizados para esta tecnología se suelen suministrar en forma de filamentos alrededor de una bobina que se conecta con el cabezal móvil de la impresora para fundirlo.

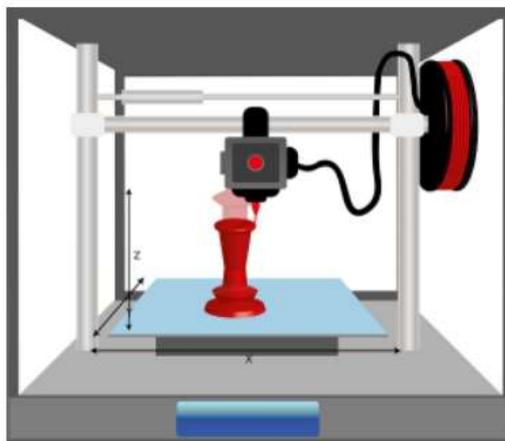


Ilustración 1: Máquina de modelado por deposición fundida (MDF) www.impresora-3d.online.com

- **Fusión selectiva de lecho de polvo:** “*consiste en la deposición de una capa de polvo sobre la plataforma de trabajo para que ésta sea fundida a través de láser (o haz de electrones). Una vez que la capa ha sido fundida, la base de trabajo desciende para la deposición de una nueva capa de polvo. El proceso se repite una y otra vez, capa a capa, hasta que la pieza ha sido fabricada.*” [2]. Existen tres tipos distintos.

El primero de todos y el más usado es la sinterización selectiva por láser (conocido como SLS por su nomenclatura inglesa). En este proceso el material usado puede ser tanto polvo metálico como partículas de plástico o de cerámica, el láser calienta el polvo hasta su sinterización, las partículas fusionan y crean una forma sólida. Las geometrías pueden ser muy complejas y las piezas son duraderas y funcionales. Los acabados de las piezas son rugosos, pero se pueden aplicar post procesados.

Los otros dos procesos son la fusión selectiva por láser (SLM) y la fusión por haz de electrones (EBM). En ambos tipos el único material que se puede usar es el polvo metálico. En el SLM se derrite completamente el metal dentro de una cámara controlada de gas inerte, se obtienen piezas y estructuras complejas y muy ligeras. En la EBM un haz de electrones móvil funde la sección del objeto, este haz proporciona una gran rapidez y precisión y las piezas que se obtienen presentan una alta resistencia a temperatura. El mayor inconveniente que podemos encontrar en estas aplicaciones es que al crearse la pieza a altas temperaturas, cuando se enfrían, pueden sufrir alguna deformación o acumulación de tensiones.

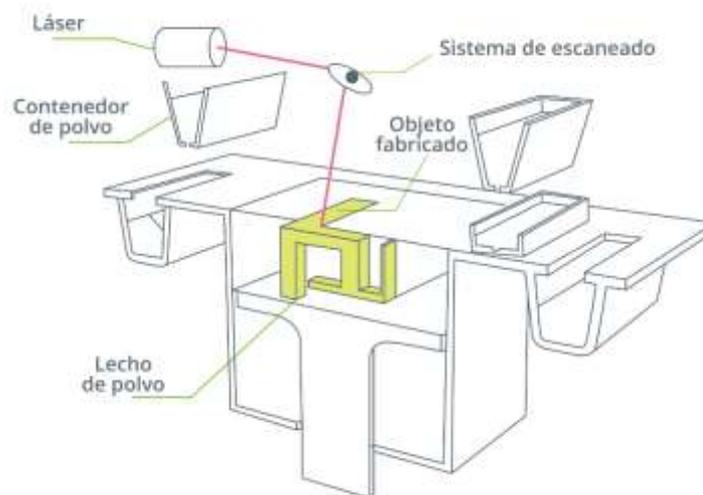


Ilustración 2: Máquina de fusión selectiva de lecho de polvo
www.mizaradditive.com

- **Estereolitografía** (conocido comúnmente como SLA). En este proceso: “*El rayo láser barre la superficie de la resina líquida de acuerdo con el modelo 3D digital suministrado a la impresora. Una vez que la primera capa de material solidificado, la plataforma desciende un nivel, que corresponde al grosor de una capa de impresión, y una nueva sección se solidifica. Hay tantos ciclos de impresión como capas hay para obtener el volumen completo de la pieza.*” [3].

Con este proceso se pueden imprimir piezas con todo tipo de geometrías y de tamaños muy pequeños sin perder precisión. Debido a que se usan soportes hechos con el mismo material, las piezas necesitan un post acabado superficial con disolventes para eliminar el material restante. Los materiales utilizados son resinas o ceras líquidas. Este proceso tiene muchas aplicaciones en la industria como por ejemplo para la creación de moldes de inyección, fundición o cera perdida. También existe otro tipo de impresión llamado DLP (Digital Light Processing) que solo se diferencia del SLA en que en vez de usar un rayo láser se usa un proyector de luz o Led's ultravioletas.

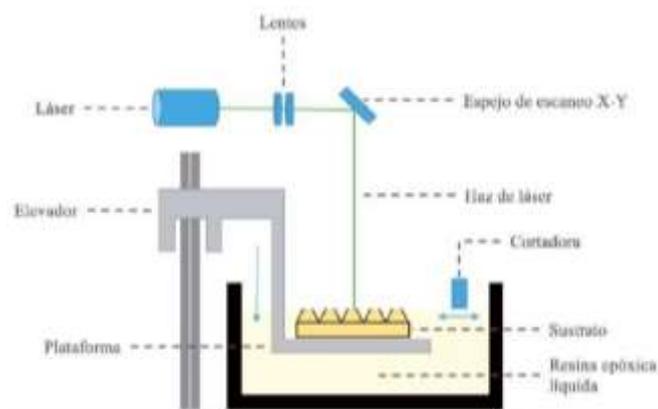


Ilustración 3: Máquina de estereolitografía (SLA). www.100cia.site

- **Curado con tierra sólida** (conocido comúnmente como SGC): se trata de un proceso muy similar a la estereolitografía en el que se usa como fuente de energía la radiación ultravioleta. Esta radiación incide a través de una máscara en el polímero líquido o resina fotosensible, solidificando todos los puntos de la sección simultáneamente capa por capa. Cada capa necesitará entre unos 2 o 3 segundos para endurecer. En este proceso se debe diseñar la pieza capa por capa ya que se debe crear una máscara para cada una de ellas.
- **Fabricación por partículas balísticas o PolyJet:** en este proceso de fabricación “se construye el modelo disparando microgotas de cera fundida desde una boquilla móvil sobre una plataforma estacionaria, la plataforma luego baja y el proceso se repite capa por capa” [4]. Estos procesos también se conocen como PolyJet en el que se usan tanto cera fundida como resinas.

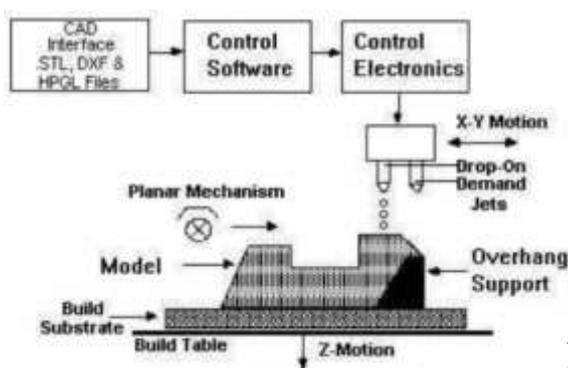


Ilustración 4: Fabricación por partículas balísticas. Imagen obtenida de [4]

Actualmente existen hasta más de 95 plataformas online diferentes donde se ofrecen servicios de impresión 3D, entre las que destacan 3D Hubs, Protolabs o Stratasys Direct. Este es un recurso cada vez más usado para los usuarios o productores artesanos que no disponen de los recursos necesarios. Se trata de unas plataformas web donde uno simplemente debe registrarse, cargar el archivo del diseño 3D en formato *.stl*, y elegir el material en el que desea la pieza. La empresa en cuestión es la que se encarga de la fabricación y el envío a domicilio. Este tipo de servicios han hecho que la FA esté al alcance de todo el mundo y que se popularice su uso, animando a la gente a explotar su creatividad y cambiar su mentalidad con la idea de no comprar algo si antes puedes diseñarlo y fabricarlo tú solo. Existen incluso otras plataformas online en las que cualquier usuario puede subir un diseño propio y ponerlo al alcance de todos, entre ellas la ya mencionada antes 3D Hubs que ofrece una infinidad de diseños gratuitos.

1.3. Clasificación de los principales materiales en la fabricación aditiva.

Como se ha visto en el anterior apartado al clasificar los materiales en líquido, polvo o sólido resulta fácil distinguir que tipo de tecnología de fabricación usar. A continuación, vamos a presentar los materiales más utilizados en la fabricación aditiva, pero esta vez los clasificaremos en tres grandes grupos: plásticos, metales y otros (aquellos que son materiales combinados).

Los plásticos más conocidos y utilizados en la industria de la fabricación aditiva son:

- **ABS (acrilonitrilo butadieno estireno):** se trata del plástico más utilizado en la impresión 3D. Este termoplástico no biodegradable derivado del petróleo y que ofrece una magnífica resistencia a los golpes y flexibilidad, capaz de trabajar con temperaturas de entre -20°C y 80°C . Se puede obtener tanto en bobinas para MDF como en polvo para SLS o resina para SLA. Lo que hace destacar a este material frente a otros es la buena relación propiedades mecánicas-precio [23].
- **PLA (ácido poliláctico):** se trata de un material biodegradable que se fabrica con componentes renovables como almidón de maíz. Al igual que el ABS es de los más utilizados en la impresión 3D, pero tiene distintas propiedades mecánicas. Este plástico es consistente, barato y fácil de fabricar a temperaturas no muy altas, pero su rápida velocidad de enfriamiento puede dar algunos problemas a la hora de la fabricación, así como el contacto con el agua que lo puede deteriorar. Más comúnmente utilizado en forma de filamento para MDF, aunque también se puede encontrar en forma de polvo para SLS.
- **PET (tereftalato de polietireno):** es un termoplástico reciclable que presenta una muy buena resistencia química y rigidez, es por eso que se suele utilizar para la industria alimenticia. Se suele imprimir con este material a temperaturas incluso más bajas que el PLA (a unos 80°C). Hay varias variantes de este material como son el PETG, PETH, PETE, siendo el primero de todos el más conocido. La única

diferencia que tiene el PETG con el PET es que se le ha añadido un componente para obtener una mayor resistencia mecánica y perder la fragilidad que lo caracteriza. Se suele suministrar en forma de filamento en bobina para MDF.

- **PC (policarbonato):** este material es muy ligero y resistente al impacto, además presenta unas buenas prestaciones a temperaturas de entre -150°C y 140°C [24]. Un inconveniente que presenta es que es un termoplástico higroscópico, y por lo tanto si no se mantiene en un ambiente seco se puede llegar a deteriorar. También hay que destacar su sensibilidad a rayos UV, que hace que no se recomiende su uso en exteriores.
- **PP (polipropileno):** es uno de los termoplásticos más famosos y utilizados en todo tipo de sectores. Sus principales propiedades son una buena flexibilidad, resistencia a la abrasión y al impacto, resistencia química y buen aislamiento eléctrico. Como inconvenientes cabe destacar su poca resistencia a la luz solar y a bajas temperaturas.
- **ASA (acrilonitrilo estireno acrilato):** este material es muy similar al ABS, la diferencia es que el ASA utiliza un elastómero acrílico en vez de un elastómero butadieno. Se podría decir que es como un ABS mejorado, pues presenta las mismas propiedades mecánicas, pero además es muy resistente a los rayos UV, a climas exteriores adversos, tiene muy buena resistencia química, y es más fácil de imprimir [25].
- **Poliamidas (Nylon):** las poliamidas tienen unas buenas características mecánicas, químicas, de rigidez, flexibilidad y resistencia a impacto. Este tipo de materiales son comúnmente utilizados para procesos de fabricación SLS en polvo, con los que se consigue un acabado excelente y de precisión. También se puede encontrar para tecnologías MDF en forma de filamento. Dentro de las poliamidas, también conocidas como PA hay una amplia gama dependiendo del contenido en carbono, que otorga incluso mayor rigidez y resistencia a la temperatura, como el PA11 y PA12 para SLS o el PA6 para MDF [26].
- **TPU (Poliuretano termoplástico):** es un material termoplástico flexible usado para aplicaciones específicas en las que se requiere una pieza elástica. Dentro de los materiales flexibles es uno de los más rígidos, pero eso hace que sea más fácil de fabricar. A parte de flexibilidad también es capaz de resistir grandes fuerzas de compresión y tracción comparado con el ABS. Se suministra en forma de filamento para fabricación MDF.
- **Termoplásticos de alto rendimiento:** estos plásticos semicristalinos pertenecen a la familia de la poliariletercetona (PAEK) y se caracterizan por ser ligeros y soportar altas temperaturas junto con unas buenas propiedades mecánicas. Los más conocidos de esta familia son el PEEK (el más famoso de todos) que es en forma de poliéter éter cetona, el PEKK que es en forma de polieteretercetona cetona, y el PEI (polieterimida) más conocido como ULTEM que resulta el más

económico de todos [29]. El uso de estos materiales en la impresión 3D es relativamente moderno y cada vez son más compañías las que fabrican impresoras capaces de imprimirlos. Se pueden encontrar en forma normalmente de filamento para la impresión por MDF.

Los metales utilizados en la fabricación aditiva son normalmente utilizados en tecnologías SLM o EBM y permiten obtener geometrías muy complejas que serían muy difíciles de obtener con los métodos tradicionales de fabricación. Los más conocidos y utilizados en la industria de la fabricación aditiva son:

- **Titanio puro:** muy utilizado gracias a su ligereza, dureza y versatilidad. Este metal es muy utilizado en el sector médico, así como en la industria aeroespacial. Recomendable para tecnología EBM y SLM.
- **Acero inoxidable:** es un material muy utilizado en todo tipo de aplicaciones. Buena resistencia mecánica y dureza. Es de los materiales metálicos más asequible para impresión 3D.
- **Inconel (IN718):** esta superaleación ofrece una resistencia térmica a temperaturas muy elevadas (de hasta 700°C), además es resistente a la corrosión. Aunque tiene un acabado superficial rugoso, tiene una resistencia a tracción muy elevada, de hasta 940 Mpa [27]. Se utiliza para la industria aeroespacial o aplicaciones de temperaturas extremas como intercambiadores de calor.
- **Aluminio:** el aluminio es comúnmente conocido y utilizado por su buena relación entre resistencia y ligereza. Se suele imprimir utilizando la tecnología de Sinterizado Directo de Metal por Láser, que entra dentro de la categoría de fusión selectiva de lecho de polvo.

Por último, tenemos los demás tipos de materiales que son una combinación de varios componentes. En general suelen ser plásticos modificados para obtener mejores prestaciones mecánicas. Los más utilizados son los siguientes:

- **Resinas:** es el material utilizado en las tecnologías de estereolitografía basadas en la fotopolimerización. Con estos fotopolímeros líquidos se obtienen unos acabados superficiales excelentes y se pueden obtener piezas con gran detalle. Las propiedades mecánicas suelen ser limitadas, pero dependerá del tipo de resina, dependiendo de su composición encontramos algunas más elásticas, otras con mejor resistencia a impacto y otras con buena resistencia térmica.
- **Alúmina:** se trata de un material compuesto por poliamidas y polvo de aluminio que se usa en tecnologías de fusión selectiva de lecho de polvo SLS. El polvo del material tiene un tamaño grande y por lo tanto los acabados superficiales de las piezas serán rugosos y con poros esto hará que tenga ciertas limitaciones geométricas y será necesario un post-acabado superficial. Se caracteriza por una buena rigidez y resistencia a la temperatura (172°C) [28].

- **Composites:** estos materiales son una combinación de fibras con termoplásticos. Normalmente se mezclan fibras de carbono, de vidrio o de Kevlar con el PLA, el ABS o poliamidas. El objetivo de esta combinación es la de mejorar las propiedades de los termoplásticos obteniendo una mayor rigidez, resistencia a tracción e impacto, pero sin aumentar el peso de la pieza. Normalmente estas fibras son de longitudes cortas de longitud menor de 1mm, pero hay casos en los que se usan fibras continuas que deben irse incorporando en el material a medida que se extruye [28]. Éstas últimas son menos usadas, pero son para aplicaciones con condiciones más extremas que precisen de resistencias tan elevadas como la de los metales. Otro tipo de composites son los que mezclan metales en polvo con los filamentos de PLA para MDF, los más conocidos son el PLA-acero inoxidable y PLA-cobre. Estos se utilizan comúnmente para tener un acabado metálico en la pieza, así como para hacerla más pesada y algo más resistente.

1.4. Útiles de control y la fabricación aditiva.

Un útil de control es cualquier dispositivo cuya finalidad sea la de asegurar, posicionar, agarrar o soportar una pieza. “Son herramientas imprescindibles para la verificación de piezas en las que se hace difícil comprobar sus medidas o formas con los sistemas convencionales, ya sea por su dimensión o por la complejidad de su geometría” [5]. Existen muchos útiles de control en la industria y la mayoría con diferentes aplicaciones. Podemos dividirlos en dos grandes grupos:

- Útiles para fijación: son todos aquellos accesorios de herramientas o máquinas como pueden ser mordazas, utillajes, mandriles de fijación, útiles magnéticos, insertos, etc. Cada uno está normalizado y se adapta a la máquina o pieza según la función que deba desempeñar.
- Útiles especiales: son útiles específicos diseñados para una pieza o una operación concreta que se fabrican y diseñan para un caso en particular.

En la industria a la hora de elegir los utillajes y útiles hay que tener en cuenta varios factores como el tamaño de lote de producción o las especificaciones de cada pieza. “En la fabricación de series medianas, se procura equipar las máquinas de la manera más sencilla posible. El utillaje especial que sea necesario proyectar, debe responder más a la obtención de la calidad exigida por el plano que a la obtención de

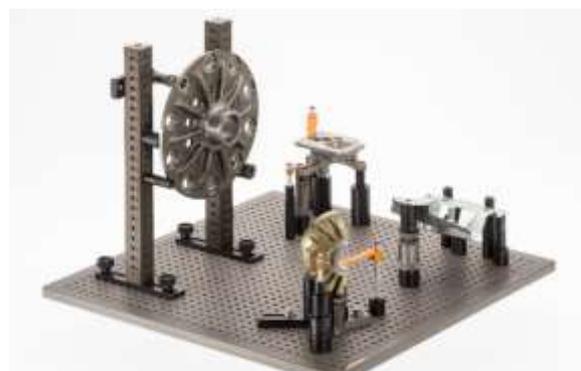


Ilustración 5: Ejemplos de sujeción de elementos mediante útiles de control. www.xyz-engineering.es, www.renishaw.es.

productividad o gran producción, pues no quedaría justificada. En este tipo de producciones, los operarios suelen ser especialistas con la experticia suficiente para compensar el tiempo que buscaría ahorrarse con el utillaje. En grandes fabricaciones en serie queda justificado proyectar utillajes costosos, siempre y cuando justifiquen realmente un retorno de la inversión o un ahorro representativo en tiempo. No obstante, debe desterrarse toda complicación que no suponga una economía real.” [6]

Cuando se necesita un útil de control para una aplicación muy específica resulta más difícil encontrar útiles normalizados que casen con esas especificaciones por lo que habría que diseñar y fabricar uno desde cero. Es aquí donde entra en juego la fabricación aditiva. Ese diseño y fabricación de un útil tradicional mediante fundición o mecanizado puede tener unos costes muy elevados y por eso muchas empresas de distintos sectores han empezado a sustituirlos por útiles fabricados mediante FA, donde no es necesaria la fabricación de ningún molde, sino que la pieza final es la que se imprime directamente, obteniendo una reducción de costes y sobre todo de tiempo.

El uso de la FA aditiva para la creación de útiles de control es muy utilizado en varios sectores como el aeronáutico o el sector de la automoción. En el sector aeronáutico, por ejemplo, el uso de los útiles es imprescindible a la hora de las revisiones de mantenimiento de los motores. Cuando se han alcanzado unas horas de vuelo determinadas son necesarias unas inspecciones y reparaciones en los motores y componentes de las aeronaves como tratamientos superficiales, mecanizados o soldaduras ya que después deben ser devueltos como si fuesen prácticamente nuevos. Para alcanzar esa precisión en las inspecciones y reparaciones son imprescindibles todos estos útiles de utillaje, posicionadores, etc. Al ser diseños en muchas ocasiones personalizados para unas piezas específicas, es común, aparte del diseño tradicional, el uso de un escáner 3D. De esta manera podemos escanear la pieza en cuestión e importarla a nuestro programa de diseño asistido, donde se podrá diseñar el conjunto con el útil o útiles que se necesitan. En la industria de la automoción o la industria manufacturera encontramos ejemplos del uso de útiles de control usando la FA en las cadenas de montaje. En 2017 la empresa Volkswagen implementó la fabricación de útiles de control mediante FA para sus cadenas de montaje, dejando de tener que depender de proveedores externos. Desde entonces fabrican todo tipo de útiles, desde sujeciones para herramientas como para inspecciones de calidad o elementos de protección. Por ejemplo, diseñaron un útil (Ilustración 6: Útil de control para herramienta Volkswagen. www.ultimaker.com) que hacía como tope de una herramienta en el montaje de las ruedas para proteger el acabado superficial de posibles daños. Este elemento de protección antes les costaba alrededor de 800€ con



Ilustración 6: Útil de control para herramienta Volkswagen. www.ultimaker.com

un proveedor externo, ahora con sus propias impresoras pueden obtener esta pieza con un coste de 21€ y pasar de esperar 56 días en ser enviada a desarrollarla en tan solo 10 días.

1.5. Útiles de control en procesos de soldadura.

Puesto que este TFG se centrará en el diseño de un útil de control para un proceso de soldadura (como se verá más adelante), resulta interesante repasar que tipo de útiles de este tipo existen en la actualidad y que finalidad tienen.

La soldadura es una técnica cuya fecha de nacimiento se remonta a principios del siglo XIX con la invención del arco eléctrico. Estamos hablando de una tecnología que lleva evolucionando desde entonces y en la que los útiles de control han tenido un papel protagonista. A la hora de realizar una soldadura es imprescindible asegurar la correcta posición de todos los elementos para que no se muevan en mitad del proceso y para obtener la geometría que se requiera. Existen múltiples diseños de distintos útiles que se arman en lo que se conoce como mesa de soldadura. Estas mesas tienen en su superficie unos agujeros normalizados a una distancia determinada que sirven de sujeción para todos los útiles. Entre todos estos elementos podemos diferenciar varios grupos de útiles que serán utilizados dependiendo del tipo de soldadura y de la geometría de la estructura:

- Bridas de amarre.
- Mordazas.
- Tornillos de apriete.
- Escuadras y topes.

Los tres primeros son elementos de amarre que sujetan dos elementos entre sí o con la mesa de soldadura. Los segundos son elementos que aseguran un ángulo concreto entre dos caras o impiden el movimiento de las piezas en distintas direcciones. En general, los precios de los útiles de soldadura son muy elevados, incluyendo la propia mesa. Sin embargo, en cuanto a útiles de control específicos para procesos de soldadura no se ha encontrado mucha información a parte de una empresa llamada “Markforged”. Esta empresa se dedica a la comercialización de impresoras 3D y a su vez tiene un departamento de investigación sobre las diferentes aplicaciones de la fabricación aditiva publicadas en su página web. En una de esas publicaciones se propone algo muy similar a lo que se quiere conseguir con este proyecto: el uso de la impresión DMF en 3D para elementos de sujeción de soldadura (“welding fixtures” en su página web) [22] con la intención de abaratar los costes y tiempo a la hora de soldar. Para ello usan unas fibras ignífugas de las que no dan mucha información, y por lo tanto resulta complicado obtener información relevante para utilizar en este proyecto.



Ilustración 8: Útil de control fabricado mediante impresión 3D. www.markforged.com



Ilustración 7: Mesa de soldadura con todos los útiles de control. www.newweldtable.com

1.6. Clasificación de los procesos de soldadura.

Los procesos de soldadura se suelen clasificar dependiendo de varios factores como son: si funde el material base o no, si hay material de aporte o no, el equipo utilizado o la temperatura. En este apartado clasificaremos los principales procesos más utilizados en la industria en tres grandes grupos:

- No funde el material base, pero si el material de aportación: soldadura blanda y soldadura fuerte.
- Con fusión, donde funde el material base y puede haber o no material de aportación: soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, o con gas de protección.
- No funde el material base ni el material de aportación: soldadura por fricción y soldadura por forja.

En el primer grupo nos encontramos con la soldadura blanda y la soldadura fuerte. La soldadura blanda es aquella en la que se utilizan aleaciones metálicas como material de aporte con temperaturas de un punto de fusión por debajo de 450°C. En este tipo de procesos la unión de las piezas metálicas depende de la acción capilar del material de aporte. Se suelen utilizar como metales de aportación: aleaciones de plomo-plata, de estaño-antimonio, estaño-plomo, estaño zinc y estaño plata; cada una de ellas utilizada para diferentes aplicaciones. Los problemas que suelen haber con este tipo de soldaduras suelen ser de corrosión debidas al potencial galvánico de los metales a soldar, y la baja resistencia mecánica que ofrece, siendo recomendable no utilizarla en piezas de responsabilidad con altos esfuerzos.

Por el contrario, la soldadura fuerte es aquella en la que se utilizan aleaciones metálicas como material de aportación con puntos de fusión superiores a 450°C y siempre menores que los del material base. Se debe cumplir siempre que el material de aportación sea parcialmente soluble en algún metal de los que forman el material base. Como herramienta se suelen utilizar en la mayoría de las ocasiones soplete u horno, y es necesaria una separación entre



Ilustración 9: Soldadura fuerte. Imagen de www.ferrepro.mx

las piezas a soldar de entre 0,1 y 0,2 mm para asegurar la correcta acción capilar. Como variante a este tipo de proceso cabe destacar la soldadura por inducción, donde la herramienta utilizada para calentar el material es una bobina por la que circula corriente. Los principales problemas que presentan este tipo de procesos son: baja resistencia ante altos esfuerzos, fallos al exponer la pieza final a altas temperaturas y problemas estéticos.

En cuanto al segundo grupo nos centraremos en tres diferentes procesos de soldadura: soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido SMAW, soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa y electrodo de tungsteno TIG, y soldadura por arco eléctrico con protección gaseosa MIG/MAG.

La soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, más conocida como SMAW por sus siglas en inglés es uno de los procesos más utilizados en la industria. En este tipo de procesos se genera la fusión del material gracias a la creación de un arco eléctrico entre el electrodo y el material base debida a la diferente polaridad de ambos elementos. Esta polaridad puede ser directa con corriente continua para soldaduras profundas y cordón estrecho, inversa con corriente continua para poca penetración, pero cordones anchos, o con corriente alterna y alta frecuencia para buena penetración y gran anchura del cordón. Los electrodos utilizados son varillas metálicas recubiertas de diferentes productos orgánicos y minerales, este recubrimiento será al que proteja el cordón de la oxidación a la hora de soldar, pues la escoria producida por el mismo cuando se funde no permite el paso del oxígeno al cordón. Encontramos cuatro tipos principales de electrodos cada uno para diferentes aplicaciones, estos son: electrodos celulósicos, electrodos oxidantes, electrodos de rutilo medio y electrodos de ácido de rutilo [7]. A la hora de realizar este tipo de procesos se elegirá el tipo de electrodo y de polaridad dependiendo del material base.

La soldadura por arco eléctrico con gas de protección y electrodo de tungsteno se conoce como TIG. Esta soldadura es muy similar a la anterior solo que en este caso el electrodo no es el material de aportación al ser de tungsteno y no fundir. El material de aporte se da en forma de varilla del mismo diámetro que el espesor a soldar, aunque no en todas las aplicaciones será necesario dependiendo del espesor a soldar. En este tipo de soldaduras lo que protege de la corrosión es un gas más pesado que el aire que se expulsa por la boquilla del electrodo, normalmente argón o helio. Dependiendo del tipo de material base a fundir habrá que ajustar tanto la corriente, como el gas a utilizar como la polaridad. Por ejemplo, para el acero se suele usar una polaridad directa con corriente continua, alta frecuencia, y 75A [13].

Por último, de este segundo grupo tenemos la soldadura por arco eléctrico con gas de protección MIG/MAG. Este tipo de soldaduras se diferencian de la anterior simplemente por el tipo de electrodo. En este caso el electrodo es el propio material de aporte que sale de la boquilla de la pistola junto con el gas, y que se va fundiendo a medida que se avanza, ya que se suministra a través de una bobina. La gran ventaja de este tipo de soldaduras es que se pueden automatizar por completo (MIG) o solo la pistola y el movimiento manual (MAG). Como gas de aportación se suele usar argón con dióxido de carbono, argón con dióxido de oxígeno y argón con helio y dióxido de

oxígeno [14]. De nuevo, dependiendo del material a soldar se utilizarán distintas polaridades y materiales de aportación.

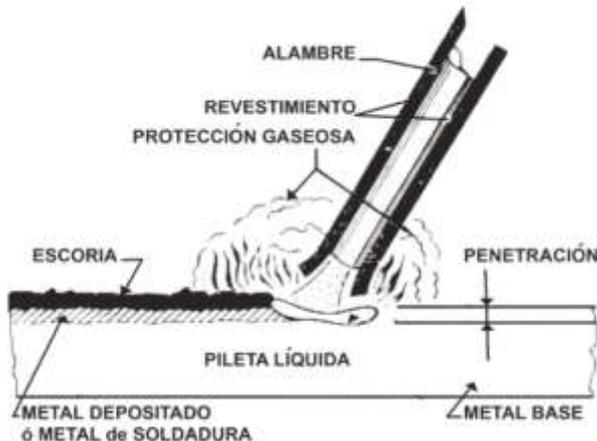


Ilustración 10: Ilustración soldadura SMAW. Imagen de www.esab.com

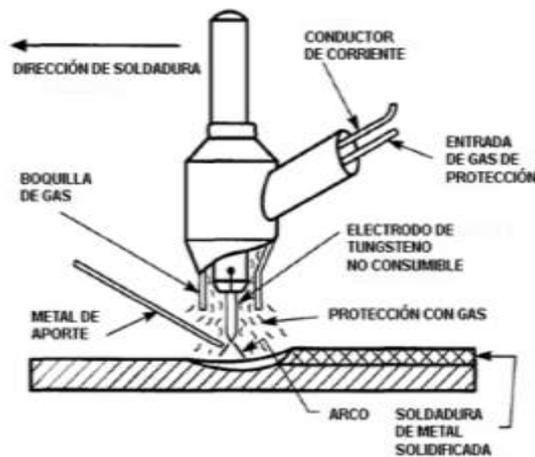


Ilustración 12: Ilustración soldadura TIG. Imagen de www.samiensman.com

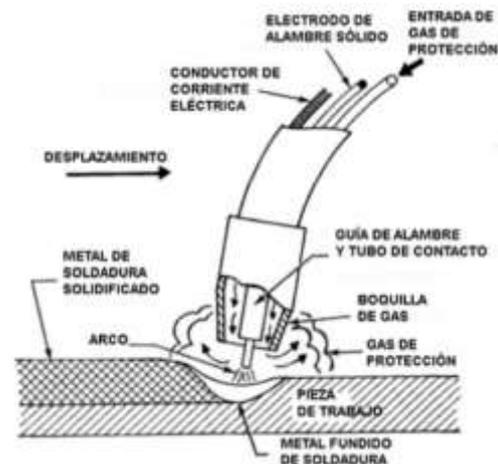


Ilustración 11: Ilustración soldadura MIG. Imagen de www.ilmo.es

En el grupo de las soldaduras en las que no funde ni el material base ni el material de aporte se encuentran las soldaduras por fricción y por forja. La primera es una de las menos utilizadas de las que hemos visto hasta ahora, pues es un proceso relativamente nuevo, y se puede considerar un tipo de soldadura por forja. En este proceso se enfrentan las dos piezas metálicas y mediante una máquina se crea un movimiento relativo entre ellas junto con una fuerza axial, provocándose la unión por forja de estos dos materiales. Con este proceso se pueden conseguir uniones de diferentes metales que con otros procesos sería imposible, y el movimiento relativo puede ser de rotación o lineal. La soldadura por forja o soldadura de fragua consiste en la soldadura de dos materiales mediante la aplicación de calor al material base (sin fusión) a la vez que se aplica presión.

2. MEMORIA.

2.1. Introducción.

Este Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño, fabricación y posterior análisis dimensional de un dispositivo cuya finalidad es la de sujetar soportar o posicionar una pieza de trabajo, que se conoce comúnmente como “útil de control”. En concreto este Trabajo Fin de Grado se centrará en un útil de control para soldadura. En los procesos de soldadura se utilizan más comúnmente útiles de utillaje y posicionamiento que permiten obtener la orientación deseada de la pieza a la hora de soldar, restringiendo todo movimiento que pueda causar un defecto en la soldadura. Se diseñará un útil que cumpla con esta principal característica, más adelante se analizará que procesos de fabricación aditiva son los más adecuados para su fabricación y cuáles son los materiales que se deben emplear.

2.2. Problema a resolver.

La motivación principal de este proyecto es la de resolver los problemas que se pueden presentar a la hora de realizar o planear un proceso de soldadura, referidos a los útiles de control, mediante la utilización de tecnologías de fabricación aditiva.

Estos problemas pueden ser numerosos ya que los útiles de control, que son esenciales para asegurar la correcta posición y sujeción de todos los elementos a soldar, dependen de la geometría de la pieza final soldada. En cuanto se tiene una geometría ligeramente compleja resulta difícil encontrar el útil adecuado, ya que se deben combinar varios de ellos para obtener esa posición deseada, aunque no siempre resulte efectivo. Por esa razón cada vez es más común en las empresas que se dedican a la fabricación y distribución de utillajes y herramientas, el tener un departamento encargado únicamente en diseños personalizados y para aplicaciones específicas. Esta solución resulta interesante cuando se trata de la fabricación de lotes grandes o se cuenta con un alto presupuesto. En cuanto la aplicación es para un lote pequeño o se quiere fabricar una única pieza para una aplicación específica, el precio y tiempo empleado en personalizar un útil de control o incluso el de comprar varios convencionales para combinarlos entre ellos, pueden resultar muy elevados. Con la fabricación aditiva se pretende acabar con este problema abaratando los costes y tiempos además de permitir un diseño del útil totalmente personalizado que se adecúe a la geometría de la pieza a soldar.

2.3. Diseño del útil.

2.3.1. Introducción.

Para la el diseño del útil de control se ha decidido basarse en el concepto de uno ya existente muy utilizado llamado “escuadra magnética”. Se trata de un útil compuesto por dos chapas de aproximadamente 2,5mm de espesor en forma triangular, que se disponen de forma paralela separadas por un imán de 10mm de espesor, todo ello ensamblado con 5 tonillos que aseguran la sujeción de estos tres elementos (ver Ilustración 13). La finalidad de este útil es la de sujetar dos piezas metálicas para asegurar su buen posicionamiento y sujeción. Su diseño en forma de “flecha” permite un ángulo entre los elementos a soldar de 90°, 45° y 135° como se puede observar en las imágenes.

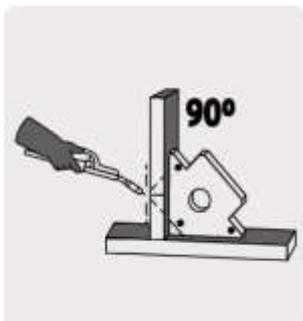


Ilustración 13: Posiciones de la escuadra magnética. Imagen obtenida de www.truper.com



Ilustración 14: Escuadra magnética. Imagen obtenida de www.truper.com

La escuadra magnética resulta un útil muy práctico y sencillo, pero sus posiciones son muy limitadas al permitir solo tres ángulos de posicionamiento. A la hora de realizar nuestro diseño se ha intentado obtener alguna ventaja en términos de funcionalidad, y por eso se ha realizado un diseño que permita no solo tres ángulos de posicionamiento sino un rango de ángulos de 90° a 20° y para distintos tamaños de piezas, como se verá más adelante.

2.3.2. Diseño: elementos y funcionalidad.

A continuación, se presentarán los elementos que conforman el útil diseñado y su funcionalidad. Todos los planos y lista de materiales de los elementos se pueden encontrar en el Documento II (LISTADO DE PLANOS. de este trabajo, las ilustraciones que se muestran a continuación para explicar cada elemento son el modelo en tres dimensiones de esos planos. Estos diseños han sido realizados con el programa de diseño en 3D llamado “Solid Edge” en la versión más reciente de 2020.

– **Imanes:**

Se necesitan dos imanes de neodimio, estos imanes de tierras raras están creados por una aleación de neodimio, hierro y boro. Se han escogido este tipo de imanes debido a su bajo coste y sus características técnicas. En concreto se ha elegido el imán neodimio NdFeB de grado N35AH anisotrópico, al ser el que resiste a una mejor relación resistencia a temperatura-fuerza frente a los demás. Las características técnicas según el catálogo de *Imamagnets* es:

 Neodymium Magnets	Grado	Nomenclatura	Remanencia		Fuerza Coercitiva		Coercitividad Intrínseca		Energía Máxima Producto		Temperatura de Trabajo
			Br		Hc		Fuerza Hc		(BH) max		Max. Temp. trabajo (°C)
			Br max (T)	Br min (T)	HcB min (kA/m)	HcB max (kA/m)	HcI min (kA/m)	HcI max (kA/m)	BHmax min (kJ/m ³)	BHmax max (kJ/m ³)	
NdFeB N35AH anisotropic	N35AH	NdFeB 263/263	1,17	1,19	876	915	2626	--	263	279	220

Tabla 1: Características técnicas del imán de neodimio grado N35AH. Tabla obtenida de www.imamagnets.com

Hay que tener en cuenta que como se observará más adelante el imán no está en contacto directo con la pieza y por lo tanto no alcanzará las mismas temperaturas que alcance la misma. En cuanto a la geometría se necesitarán estos imanes en forma de barra rectangular de 60 x 10 x 5 mm.

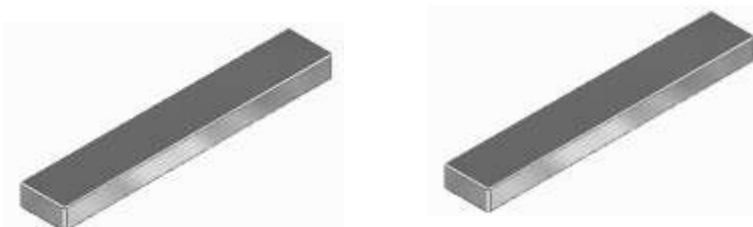


Ilustración 15: Imanes de 60x10x5mm necesarios.

– **Tronillos y palomillas:**

Los tornillos necesarios son de cabeza hexagonal acero 8.8, M5x25. Serán los encargados de restringir el movimiento e irán apretados gracias a una palomilla de acero galvanizado M5.



Ilustración 16: Palomilla M5 (izquierda) y tornillo M5x25 (derecha)

– **Pieza 1: Apoyo A.**

Dentro de esta pieza se introducirá el imán (ver Ilustración 18) y será la que esté en contacto con el elemento a soldar. Su anchura es suficiente para garantizar un buen apoyo y el espesor que separa la superficie exterior con el imán es el mínimo posible para garantizar una buena fuerza de atracción imán-pieza y tener una superficie sólida fuerte (1mm) [7].

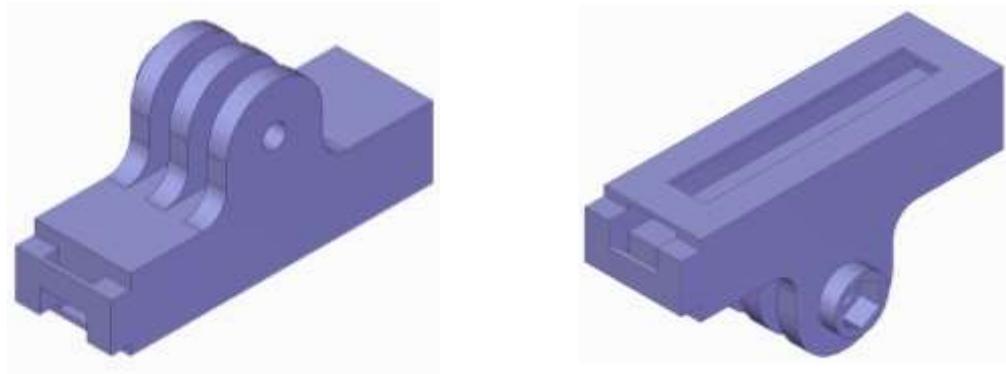


Ilustración 17: Apoyo A en dos vistas.

– **Pieza 2: Clip.**

La función de esta pieza es la de asegurar que el imán no salga del interior de la pieza 1. Gracias a esta pieza tendremos siempre acceso al imán y podremos acceder a él por si surgiese algún problema.

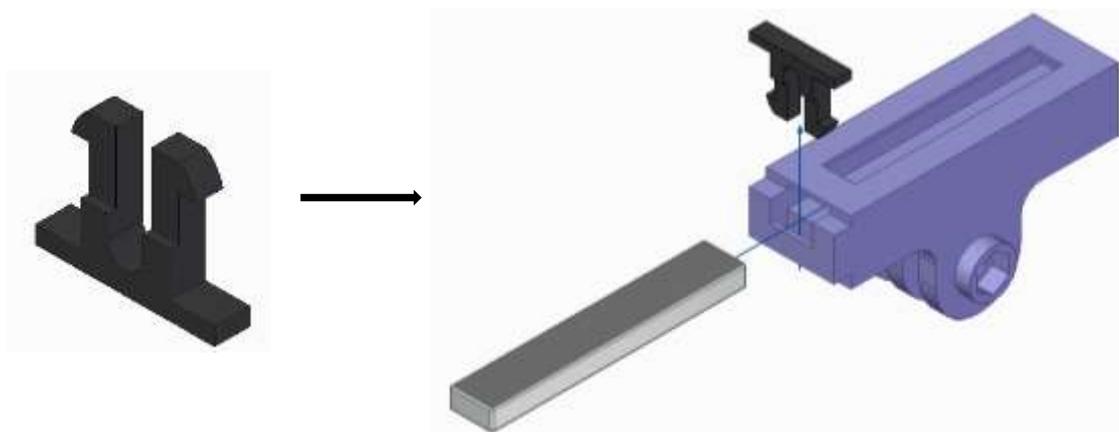


Ilustración 18: Pieza clip (izquierda) y montaje del apoyo A (derecha).

– **Pieza 3: Apoyo B.**

Pieza con la misma funcionalidad que el apoyo superior y con una geometría muy parecida. El nombre de la pieza 1 y esta pieza 3 no tienen por qué

determinar la posición en la que deben ir, simplemente se les ha dado ese nombre para distinguirlas entre ellas ya que los enganches no son iguales.

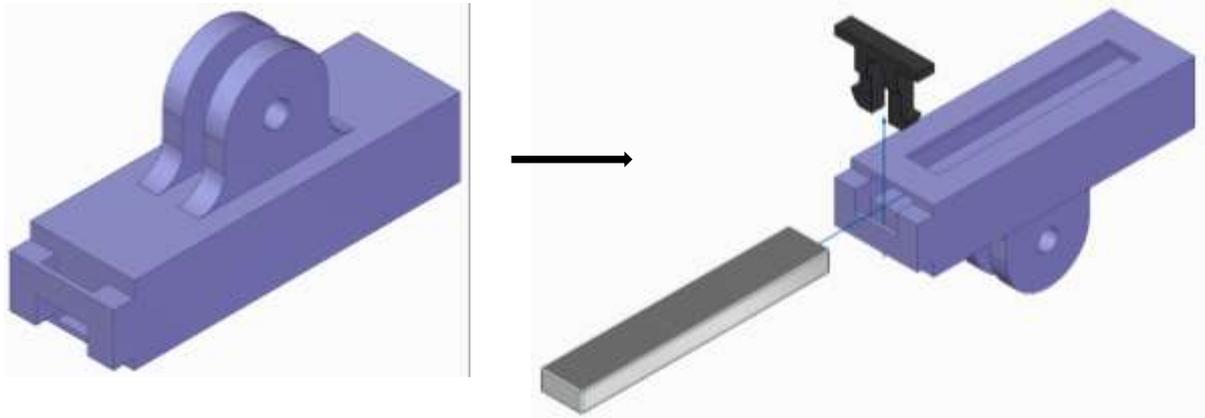


Ilustración 19: Apoyo B y su montaje.

– **Pieza 4: Unión.**

Esta pieza es la que se encarga de unir los apoyos A y B mediante los tornillos y la palomilla. Dependiendo del tamaño de la pieza o del tamaño que se quiera dar al útil añadiremos en serie una, dos e incluso tres piezas de este tipo.

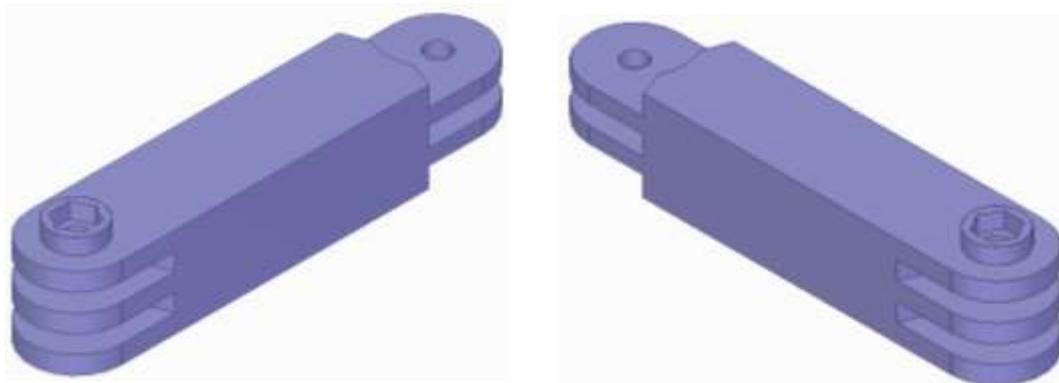


Ilustración 20: Pieza "unión"

2.3.3. Ensamble final.

Como se ha ido podido observar en las anteriores ilustraciones primero debemos introducir los imanes en los dos apoyos A y B, después debemos asegurar que no se muevan con la pieza clip en ambos apoyos. Una vez tenemos montados los apoyos solo falta unirlos con la pieza de unión. Introducimos los tornillos en el agujero y nos aseguramos que la cabeza hexagonal coincide con el agujero de la misma forma que restringirá su rotación, luego enroscamos la palomilla en su otro extremo (teniendo el

útil en la posición deseada) hasta que se asegure que no hay movimiento relativo entre los apoyos y la pieza unión. En la ilustración se muestra el útil ya ensamblado, en este caso utilizando una sola pieza de unión:

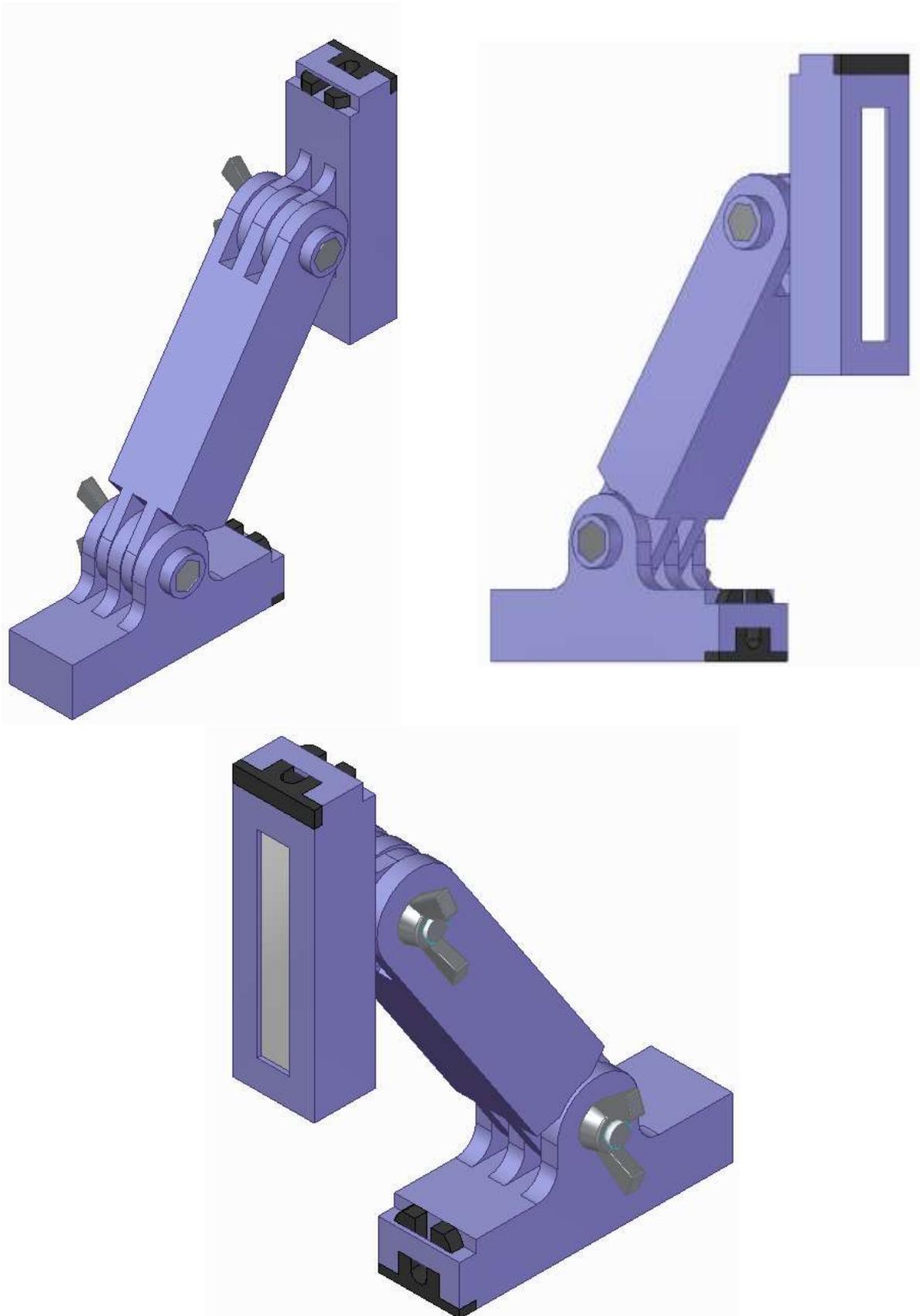


Ilustración 21: Útil de control ensamblado con una unión y en posición de 90° entre ambos apoyos.

2.3.4. Funciones y ejemplos de aplicación.

Este útil de control otorga un amplio abanico de posibilidades a la hora de disponer dos piezas para soldar. Podemos conseguir un ángulo entre las dos caras de los apoyos A y B de entre 20° y 90° , además se podrá cambiar el tamaño del útil si se desea simplemente añadiendo otra pieza de unión que también nos dará un margen más amplio de ángulos. A continuación, se muestran varios ejemplos del útil en distintas posiciones y con diferentes tamaños:

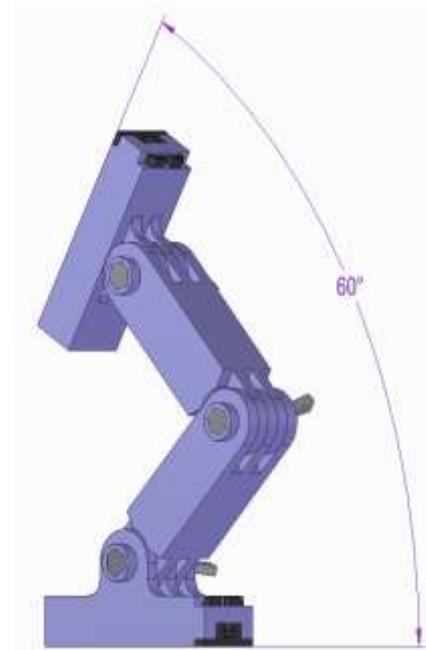
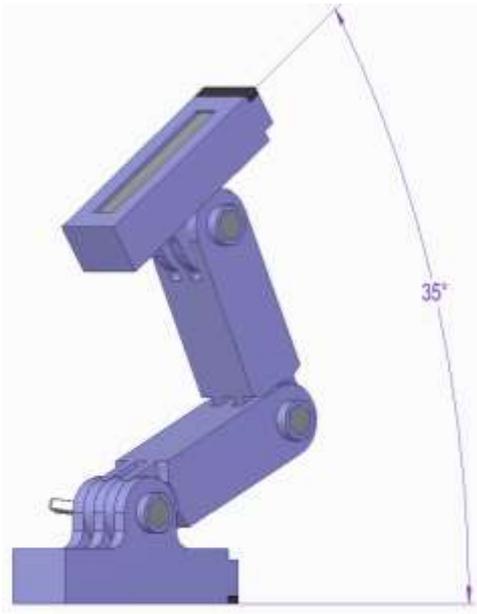


Ilustración 22: Ejemplo del útil con 2 piezas unión en dos posiciones.

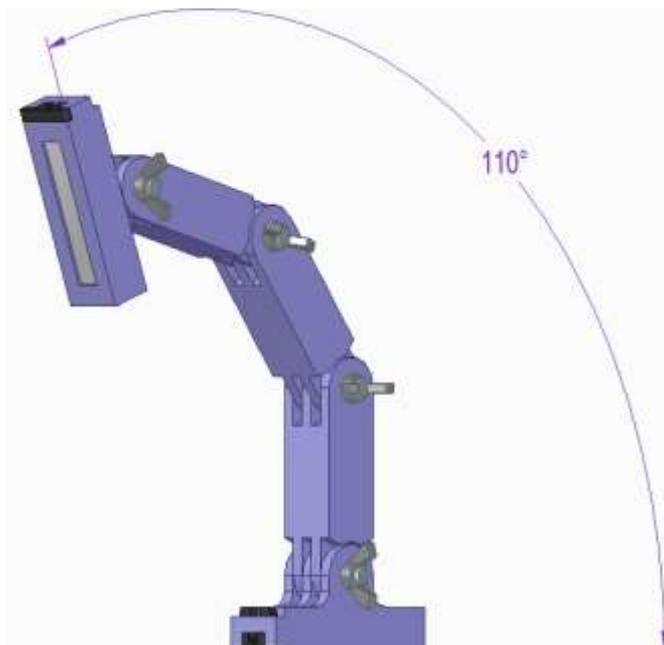


Ilustración 24: Útil con tres piezas de unión y 110° entre las caras de los apoyos.

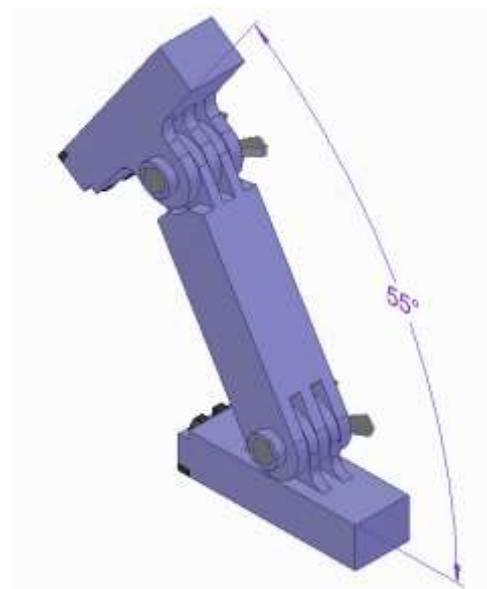


Ilustración 23: Útil con una sola pieza de unión y 55° entre las caras de los apoyos.

Ejemplo:

Supongamos que queremos soldar varios tubos cuadrados huecos de acero para obtener la estructura de un banco de espera empotrado como se muestra en la Ilustración 26: Banco empotrado..

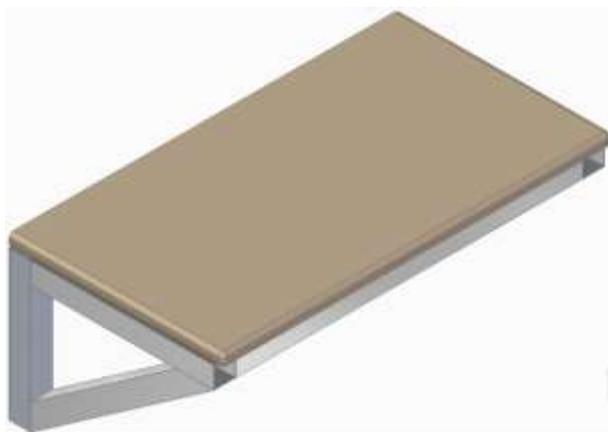


Ilustración 26: Banco empotrado.

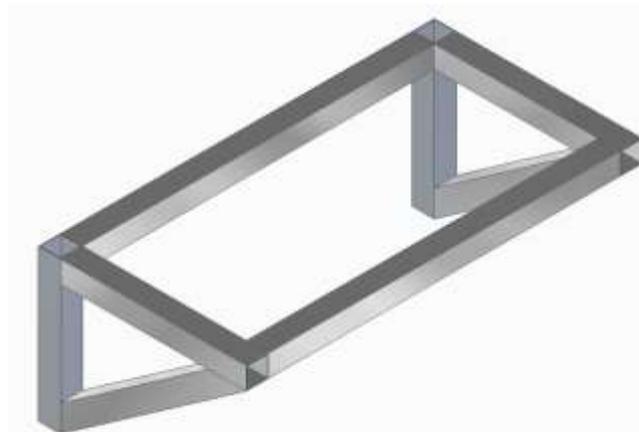


Ilustración 25: Estructura de acero del banco empotrado.

Para ello contamos con 8 tubos cuadrados huecos de acero de sección 25x25mm y un espesor de 2mm. Dos de ellos de 175mm de longitud, otros dos de 158mm, otros de 214mm y por último otros de 400mm. Para poder soldar correctamente la estructura utilizando nuestro útil de control habrá que realizar primero la estructura triangular situando el útil con los ángulos correspondientes, como se muestra a continuación:

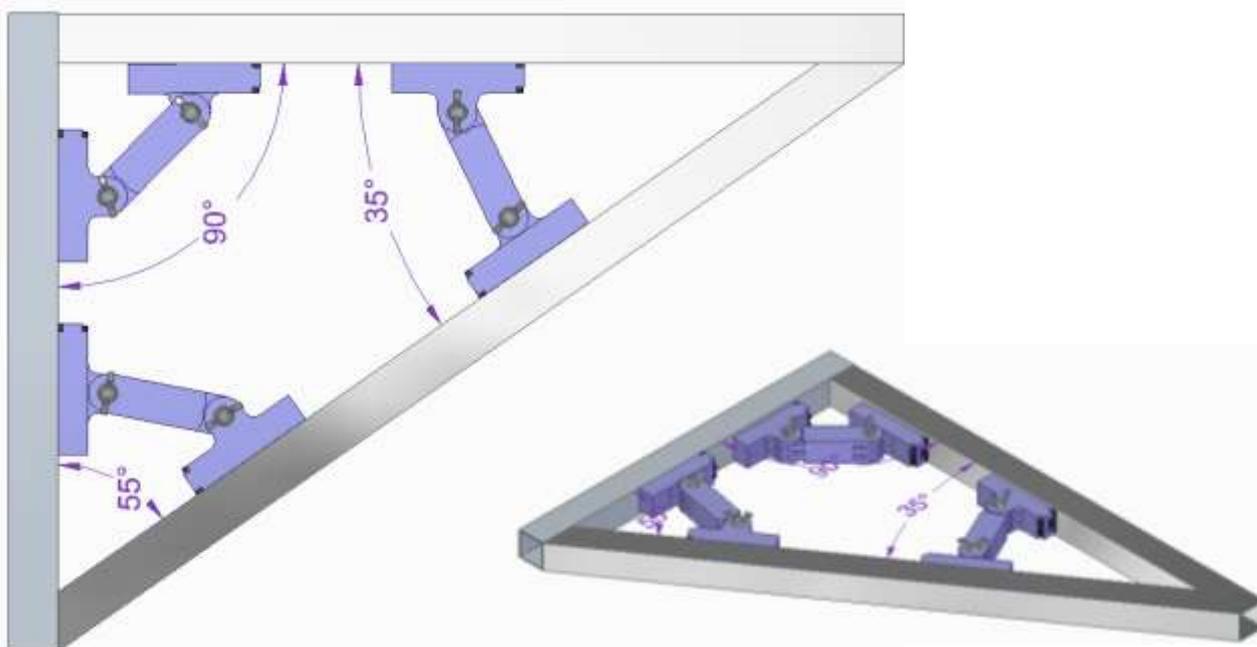


Ilustración 27: Distintas posiciones del útil para soldar estructura.

Una vez hemos ido soldando todas las barras solo nos quedaría unir esas dos estructuras triangulares con los dos tubos largos a 90 grados y tendríamos nuestra estructura completa:

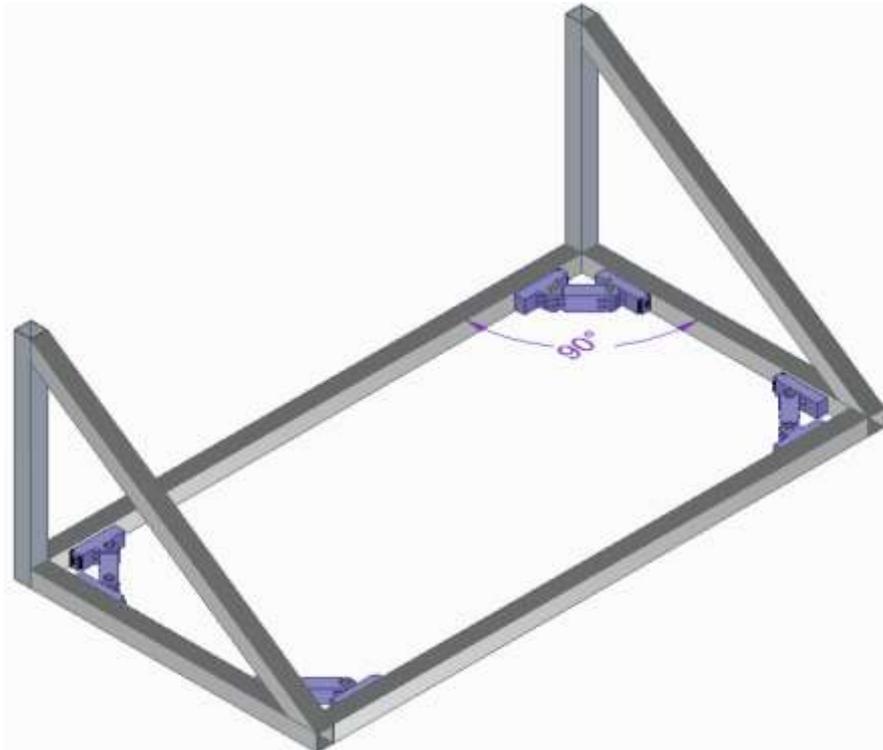


Ilustración 28: Estructura final soldada.

Como se puede ver con un solo útil somos capaces de ir soldando esta estructura añadiendo los tubos uno a uno y posicionándolo con el ángulo correspondiente. Al no tener que cambiar las piezas de posición sino solo el útil cambiando su ángulo en cuestión de minutos o incluso segundos estamos ahorrando tanto en tiempo como en costes de otros utillajes.

2.4. Selección del material y proceso de fabricación aditiva para las piezas “Apoyo A”, “Apoyo B” y “Clip”.

De todas las piezas que conforman el útil primero estudiaremos los materiales para las piezas “Apoyo A”, “Apoyo B” y “Clip” y después analizaremos que materiales para la pieza “Unión”. Todos los planos de estas piezas se adjuntan en el LISTADO DE PLANOS. Se escogerán diferentes materiales porque estas tres primeras piezas son las que estarán en contacto directo con las piezas que se quieran soldar y, por lo tanto, deberán tener unas buenas propiedades térmicas cuando se enfrenten a las temperaturas que alcance el material base durante la soldadura. Esta elección del material de fabricación resulta muy importante para asegurar la correcta sujeción y funcionamiento

del útil. Además, dependiendo del tipo de material elegido, se seleccionará el método de fabricación aditiva correspondiente, cuyas propiedades se han explicado en el primer apartado de la memoria (ver aquí: ESTADO DEL ARTE.).

2.4.1. Temperatura de la superficie.

Anteriormente se han presentado los diferentes procesos de soldadura (apartado 1: Estado del arte, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y se ha visto que para cada uno de ellos se trabaja con temperaturas distintas. Tanto para la soldadura blanda como la soldadura fuerte el material base no funde, sino que solo funde el material de aportación, lo que significa que comparado con los procesos de soldadura por arco (SMAW, TIG, MIG/MAG) donde sí hay una fusión del material base, las temperaturas que se alcancen en la superficie de este no serán tan elevadas.

En las soldaduras por arco eléctrico se pretende alcanzar en el cordón la fusión del material base llegando a alcanzarse temperaturas muy elevadas dependiendo del material. Cuando se alcanza la fusión del material en zona cercana al cordón ocurre un ciclo térmico de temperatura, a esta zona se le conoce como ZAT (zona afectada térmicamente) y suele presentar mayores debilidades en sus propiedades mecánicas que el propio cordón [8] [9]. El proceso de estudio de la distribución de la temperatura en la ZAT y su evolución frente al tiempo resulta muy complejo al tener que considerar el calor latente de cambio de estado por los numerosos factores de los que depende, como el voltaje e intensidad utilizados, las propiedades termo-físicas del material base y su espesor. Analíticamente se suele estudiar con técnicas modernas de cálculo que combinan diferentes soluciones analíticas ideales (ver [16] y [17]) junto con las ecuaciones de Crank-Nicholson de conductividad del calor. También se han realizado estudios de manera experimental mediante el uso de termopares distribuidos en varias zonas de alrededor del cordón y recogiendo los datos de temperatura con ordenador, pero resultan muy complejas y costosas [15].

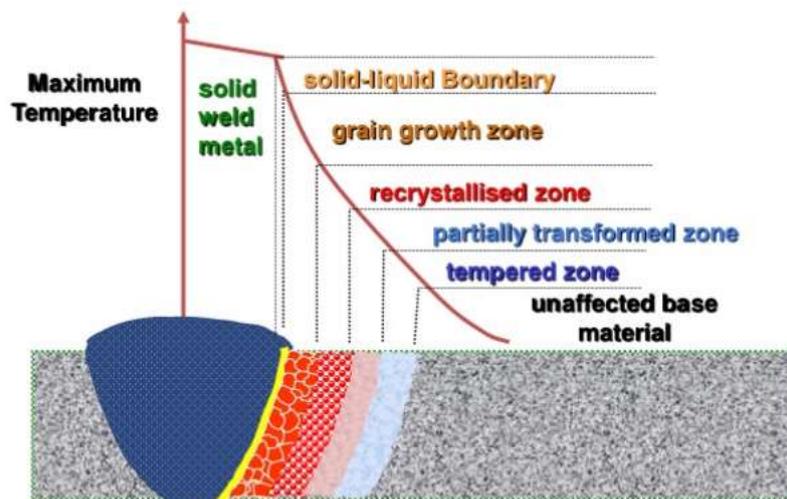


Ilustración 29: Ilustración de la ZAT en soldadura.
Obtenida de www.arcrafterplasma.blogspot.com

El objetivo de este apartado no es el de estudiar analíticamente ni experimentalmente el alcance de la ZAT y sus efectos en el metal base pues como hemos visto resultaría muy complejo, simplemente queremos obtener de manera aproximada una temperatura con la que poder trabajar para la elección del material. Para eso debemos hacer varias simplificaciones que hagan más sencillo nuestro estudio y por eso lo centraremos en una soldadura por arco eléctrico con material base el acero. Se ha elegido el acero ya que es el metal más utilizado en la industria gracias a sus buenas propiedades físicas y mecánicas. En concreto nos interesarán los aceros que muestren una buena soldabilidad en todo tipo de procesos de soldadura por arco ya que hay que tener en cuenta que a mayor contenido en carbono peor es la soldabilidad estos aceros son: aceros de bajo carbono (por ejemplo SAE 1010 y 1020) que tienen menos de un 0,25% de peso en carbono, aceros de medio carbono (por ejemplo SAE 1030 y 1050) que tienen entre 0,25% y un 0,55% de peso en carbono, aceros de baja aleación (por ejemplo SAE 2340, 3145, 4130 y 4350) que tienen menos de un 5% en peso de aleantes y por último, los aceros inoxidable martensíticos y ferríticos (por ejemplo AISI 405, 410 y 430). Estos últimos no presentan tan buena soldabilidad como los inoxidables austeníticos, pero estos no se han nombrado por no ser magnéticos, requisito imprescindible para el correcto funcionamiento del útil [18] [19].

Ahora que sabemos que nos vamos a centrar en una soldadura por arco eléctrico con acero como material base podemos proceder a calcular la temperatura. Para hacer todo el cálculo más sencillo se ha decidido hacer un ensayo muy simple con la ayuda del programa ANSYS, con el que resulta sencillo hacer análisis de temperaturas sobre un cuerpo gracias al método de los elementos finitos (MEF) en el que: *“El continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes... el conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo de cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado finito de puntos.”* [20]

Para la realización del ensayo que se explicará a continuación primero debemos saber la distancia al cordón a la que estarán las piezas en cuestión. Para eso utilizaremos la mínima distancia a la que se pueden encontrar ambas piezas de apoyo del cordón cuando utilizamos el útil con una sola pieza “Unión”. Esta posición se muestra en la Ilustración 30 y se da con el útil a 90°, ya que si disminuimos este ángulo la distancia al cordón de soldadura será mayor. Como se puede observar esta distancia será de 48mm desde el cordón hasta las piezas.

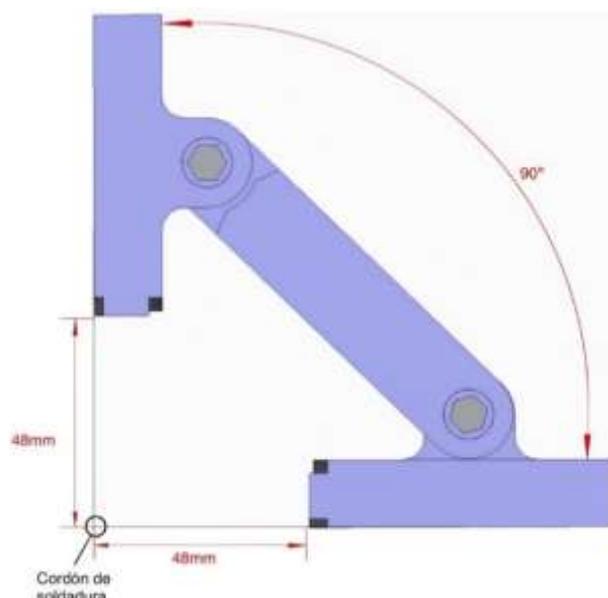


Ilustración 30: Útil a 90° y la distancia al cordón de soldadura.

En el ensayo de ANSYS se han diseñado dos planchas de 300mm x 300mm x 2mm que se dispondrán a 90° en posición de soldadura en esquina. El material que se elegirá para estas planchas será el acero predeterminado en el programa ANSYS con el nombre de “Structural Steel” que tiene las características mostradas en la Ilustración 31. Las propiedades térmicas son muy similares a las de los aceros de bajo contenido en carbono (de SAE 1016 a 1030 [24]). Al formar parte de este tipo de aceros, podemos tomar como temperatura de fusión la que corresponde a este grupo, es decir, una temperatura de 1510°C [10]. Esto nos viene muy bien ya que los aceros de bajo contenido en carbono son los aceros con mayor temperatura de fusión en comparación a los demás aceros considerados en este estudio, y por lo tanto nos ayuda a tener las condiciones críticas que queremos para el ensayo.

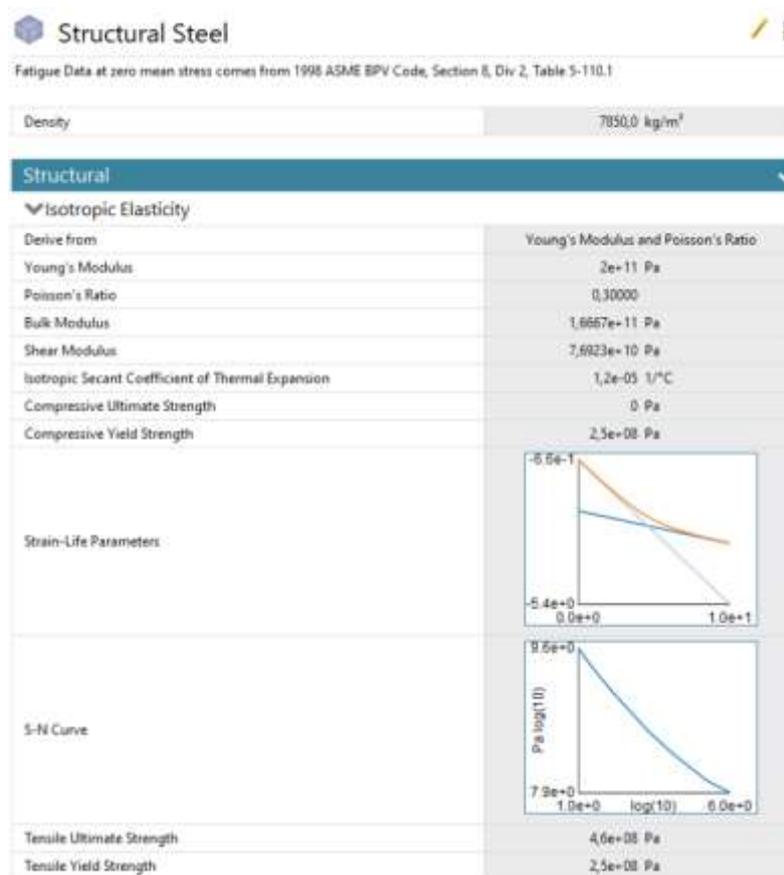


Ilustración 31: Acero estructural predeterminado en ANSYS

Más adelante se dará una temperatura a las superficies de contacto de las planchas como si fueran el cordón de soldadura. En una soldadura por arco eléctrico el electrodo que va fusionando el material base tiene que estar en constante movimiento a velocidad constante, recorriendo todo el cordón de soldadura. Para hacer el ensayo mucho más sencillo y a la vez hacer el ensayo lo más crítico posible, vamos a suponer que todo el cordón se calienta a la vez durante el tiempo que duraría la soldadura.

Suponiendo que el soldador llevara una velocidad de soldadura estándar de 1cm/s [21] y sabiendo que nuestro cordón es de 300mm de longitud, se calentarán las superficies a 1510°C (temperatura de fusión para este acero) durante 30 segundos que duraría toda la soldadura. Pasado ese tiempo se volverá a poner la chapa a temperatura ambiente

(considerando la temperatura ambiente como 22°C) durante otros 30 segundos, y se dará por finalizado el ensayo. En todo momento se registrará la temperatura en el punto de estudio, a aproximadamente 48mm de la unión de las chapas como se ha visto antes.

El procedimiento seguido en ANSYS es para la realización del ensayo es el siguiente:

1. Crear un módulo de geometría: en el módulo de geometría se diseñan ambas planchas de 300 x 300 x 2mm.
2. Se abre el módulo de ANSYS “Transient thermal” sobre el que se realizará el ensayo. Abrimos nuestra geometría en este módulo y seleccionamos el material: “Structural Steel”.

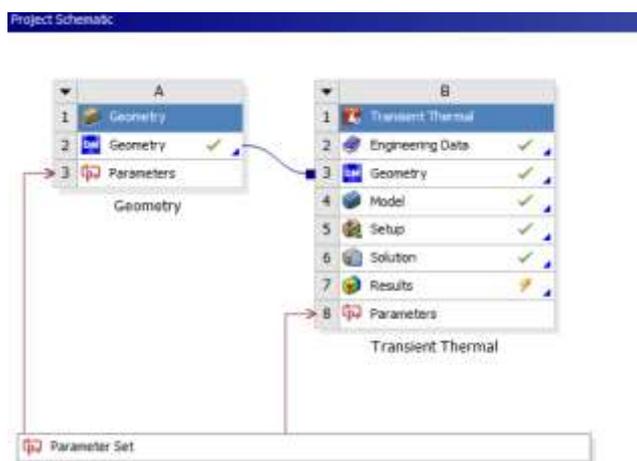


Ilustración 32: Abrir la geometría en el módulo Transient Thermal

3. Abrimos el modelo para realizar el mallado. En este caso se ha realizado una geometría de mallado por barrido, y se ha utilizado un tamaño de elemento de 1cm. El resultado final del mallado se muestra en la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

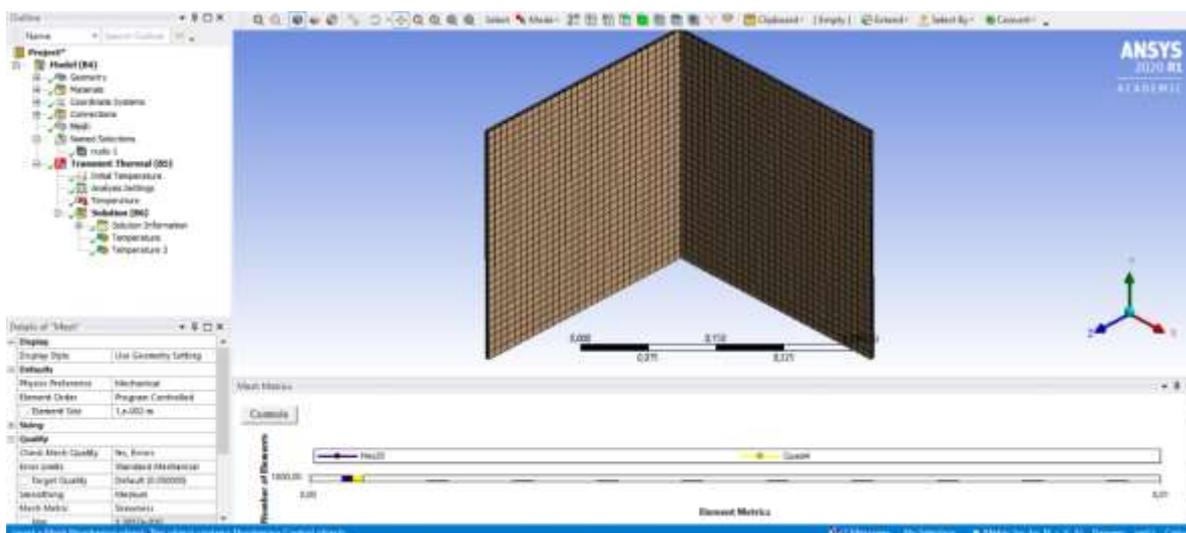


Ilustración 33: Mallado de la geometría.

- Ahora ya se puede realizar la simulación. Para ello se han seleccionado las dos superficies de contacto de las chapas y mediante los ajustes de simulación se han puesto 60 escalones de 1 segundo de duración cada uno, por lo tanto, la simulación durará 60s. Como se ha explicado anteriormente para los primeros 30 segundos se programa a una temperatura de 1510°C y para los restantes 30 segundos a temperatura ambiente de 22°C. Una vez lo hemos hecho podemos resolver la simulación con el comando “solve”.



Ilustración 34: Temperatura dada a las superficies para la simulación.

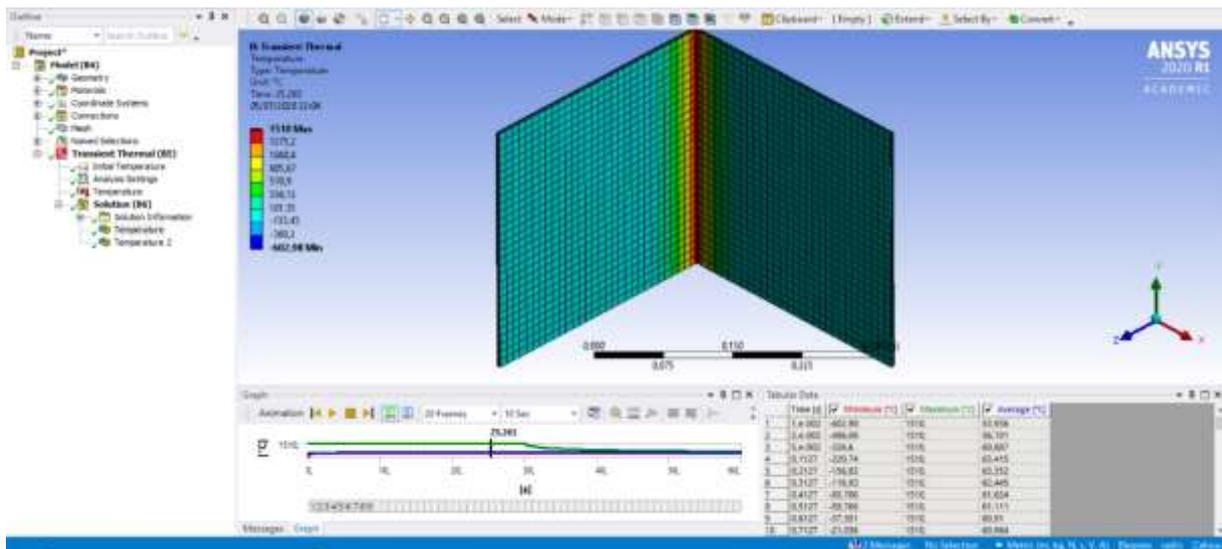


Ilustración 35: Solución de la simulación. Distribución de la temperatura por las planchas.

- Por último, se ha seleccionado un nodo de la malla con “node selection” a una distancia de 50mm del punto de unión de las chapas y donde aproximadamente estaría el apoyo del útil. Se ha añadido una solución al ensayo para este punto, donde se registrarán todas las temperaturas obtenidas en ese nodo durante toda la simulación. Todos los resultados de temperatura-tiempo obtenidos de este punto se han exportado desde ANSYS en formato .txt y cambiado a formato .xlsx para después con la ayuda de MATLAB obtener una gráfica de mayor calidad que se muestra en el Gráfico 1.

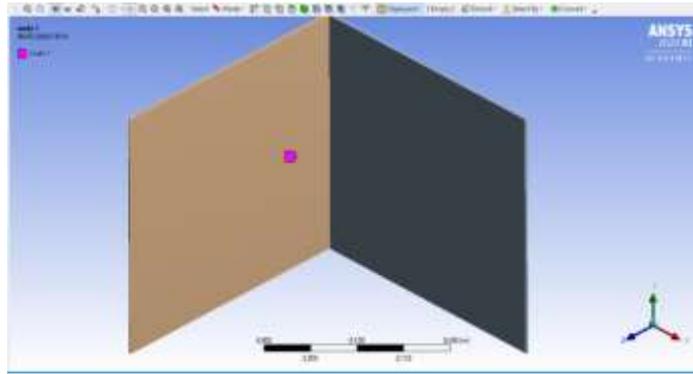


Ilustración 36: Posición del nodo de estudio

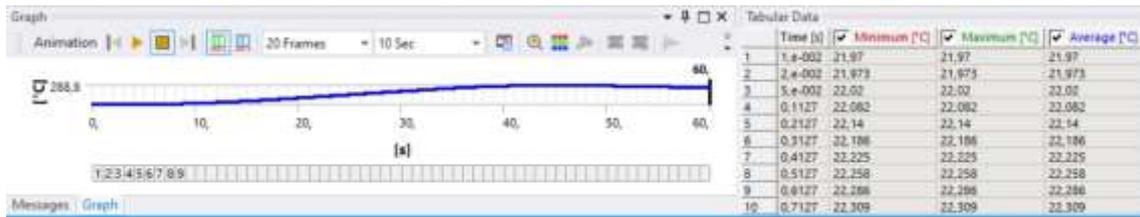


Ilustración 37: Registro de temperaturas en el nodo, solución en pantalla por ANSYS.

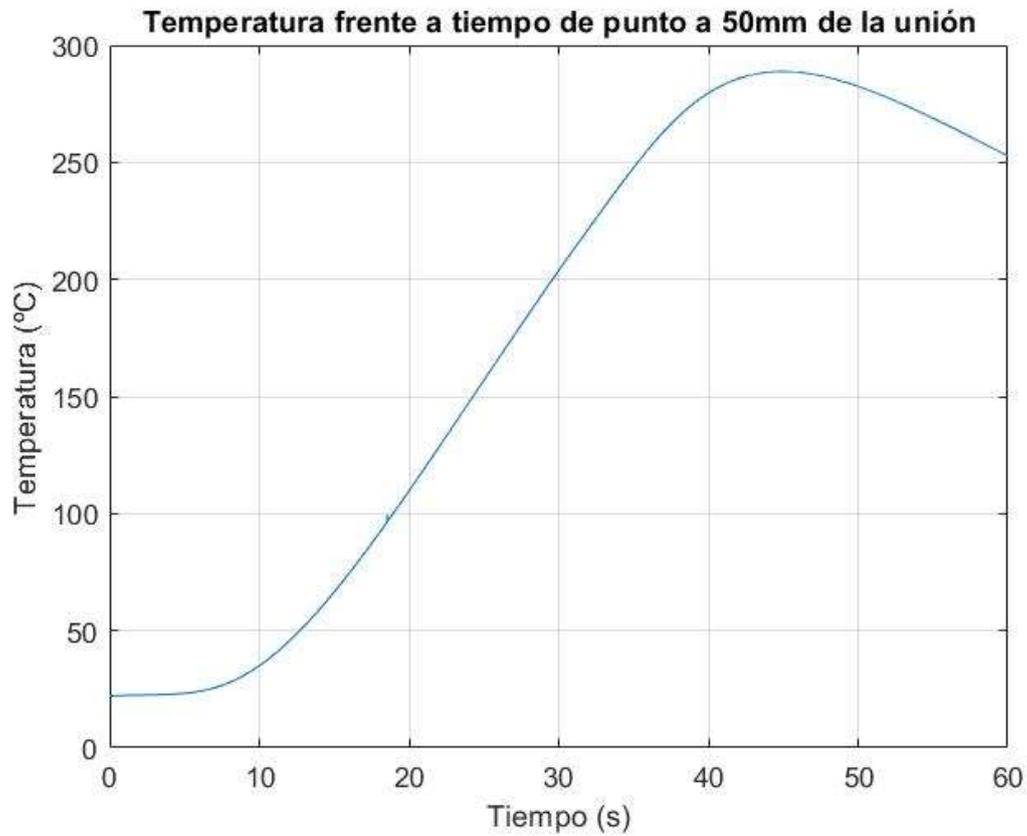


Gráfico 1: Temperatura del punto de estudio de la superficie durante la simulación.

Como se puede observar la temperatura máxima alcanzada en el punto de estudio donde estarían nuestras piezas es de aproximadamente 289°C. Es importante remarcar que esta temperatura ha sido obtenida con varias aproximaciones para hacer la situación lo más crítica posible, y que simplemente nos sirve para hacernos una idea aproximada del rango de temperaturas a las que estarán sometidas estas piezas. Al ser un caso extremo sabemos que la temperatura a la que se someterán las piezas siempre estará por debajo de 289°C.

2.4.2. Materiales adecuados.

Para la elección del material de estas piezas se ha realizado un estudio de los principales materiales de fabricación aditiva que hay en el mercado. Para ello se han consultado los catálogos de las principales empresas del sector de la fabricación aditiva (ver referencias de la [30] a la [37]), cabe destacar que muchas empresas comercializan los mismos tipos de plásticos y que por ello no han sido nombradas. De estos catálogos se han obtenido los datos de los materiales como son su nombre técnico, el tipo de proceso de fabricación aditiva que hay que emplear al fabricar con ellos, y la temperatura máxima a la que puede trabajar ese material.

Este último dato de la temperatura a la que puede trabajar viene dado en las hojas técnicas de cada material de dos formas: temperatura de deflexión térmica (HDT) o temperatura máxima de servicio. La HDT “*se basa en una medición de flexión en una barra de prueba estándar, cargada con una fuerza constante y con un aumento gradual de la temperatura; La temperatura a la que se alcanza una cierta desviación de flexión se denomina HDT*” [38]. Existen dos tipos de ensayos para determinar esta temperatura cuyos procedimientos se encuentran en la norma ISO 75 y ASTM D648, en uno de ellos la barra sufre deformación bajo una carga de 0,45MPa y en la otra bajo una carga de 1,8MPa, en los dos se programa una elevación de la temperatura de 50 o 120 °C /hora [39]. En cuanto a los materiales que da su temperatura máxima de servicio, es la temperatura máxima a la que puede trabajar el material antes de deformar, pero no se indica el procedimiento tomado para la medición de esta temperatura.

Todos estos materiales obtenidos de los catálogos han sido recogidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que nos ayudará a descartar fácilmente los materiales que no cumplen con las condiciones de temperatura de las piezas:

Empresa	Tipo	Nombre	Tecnología	Máx. Temperatura
Envisiontec	ABS	ABS-Flex	SLA	85°C
		ABS-High impact	SLA	70°C
		ABS-Tough	SLA	80°C
	Resinas	Photosilver	SLA	60°C
		Pro gray	SLA	102°C
		LOCTITE 3D 3843	SLA	56°C
		LOCTITE 3D 3860	SLA	58°C

Stratasys	ABS	ABS ESD7	MDF	96°C
		ABSi	MDF	86°C
		ABS M30i	MDF	96°C
		Digital ABS plus	PolyJet	68°C
	PLA	PLA	MDF	53°C
	PC	PC-ISO	MDF	133°C
		PC	MDF	138°C
		PC-ABS	MDF	110°C
	PP	PPSF/PPSU	MDF	230°C
		Rigur	MDF	54°C
	ASA	ASA	MDF	98°C
	Poliamidas	Diran410	MDF	90°C
		Nylon12	MDF	97°C
		Nylon 6	MDF	93°C
	TPU	TPU 92A	MDF	56°C
	Alto rendimiento	Antero800NA (PEEK)	MDF	150°C
Antero840CN03		MDF	153°C	
ULTEM1010 resin		MDF	216°C	
ULTEM 9085		MDF	153°C	
EOS	Poliamidas	PA 1101	SLS	154°C
		PA 2200	SLS	154°C
	PP	PP1101	SLS	<100°C
	Alto rendimiento	PAEK	SLS	212°C
Ensinger	Alto rendimiento	TECAFIL PEEK VX CF30	MDF	300°C
		TECAFIL PEEK LDS	MDF	260°C
		TECAFIL PEEK EV	MDF	300°C
Markforged	Composites	HSHT fiberglass	MDF	140°C
	Aleaciones/metales	Inconel 625	MDF (especial)	800°C
		17-4 PH Stainless steel	MDF (especial)	316°C
Materialise	Composites PA	Ultrasint PA6 MF	SLS	209°C
		PA-AF (aluminium filled)	SLS	130°C
	Resinas	PA-GF (glass fiber)	SLS	110°C
		Poly1500	SLA	52-61°C
		Xtreme	SLA	62°C
		PerForm	SLA	132°C
	Metales	Inconel IN718	SLM	700°C
		Stainless Steel SS316L	SLM	425°C
Titanium Ti6Al4V		SLM/EBM	417°C	
3D Xtech	Alto rendimiento	ThermaX PEEK-GF20	MDF	300°C
		CARBONX PEEK+CF	MDF	280°C
		3DXSTAT ESD PEKK-A	MDF	150°C
Dynamic 3D	PLA	PLA	MDF	65°C
		PLA HQ	MDF	180°C
	ABS	ABS	MDF	99°C
	TPU	TPU	MDF	138°C
	ASA	ASA	MDF	99°C
	PC-ABS	PC-ABS	MDF	108°C
	PETG	PETG	MDF	70°C
	Composite	PA12 Carbon	MDF	170°C
	Alto rendimiento	PEKK	MDF	260°C
		PEKK Carbon	MDF	260°C
PEEK		MDF	240°C	
PEEK Carbon		MDF	240°C	
PPSU		MDF	180°C	

Tabla 2: Materiales comercializados y su máxima temperatura de trabajo.

Observando la tabla podemos apreciar que son muy pocos los materiales que cumplen con nuestros requisitos de temperatura, estos materiales capaces de trabajar a temperaturas de hasta 289°C son:

- **TECAFIL PEEK VX CF30:** es un termoplástico cristalino reforzado con fibras de carbono. Se trata de un material creado a base de Victrex[®] PEEK (polieteretercetona) con un refuerzo del 30% de fibras de carbono. Este material se suele utilizar en la industria de la automoción, aeroespacial y electrónica. La fibra de carbono además de otorgarle un menor peso y mayor rigidez, hace que el material sea más fácil de imprimir pues las fibras reducen la deformación del material.
- **TECAFIL PEEK EV:** este termoplástico de alto rendimiento está formado por dos materiales, el Victrex[®] PEEK 450 y el Evonik PEEK basado en VESTAKEEP[®]. Este material se caracteriza frente a otros PEEK por tener un punto de cristalización significativamente más lento con el tiempo.
- **Inconel 625:** este material es una superaleación austenítica con base de níquel muy resistente tanto a la corrosión como a altas temperaturas, soportando temperaturas de hasta 800°C o incluso más. Este material es comercializado en forma de filamentos por la empresa Markforged, que ha desarrollado una tecnología de MDF para metales con su impresora Metal X.
- **17-4 PH Stainless Steel:** este acero inoxidable martensítico tiene unas grandes propiedades de resistencia a la corrosión, rigidez y dureza, llegando a obtener una resistencia a tracción de hasta 1250 Mpa. Al igual que el anterior este acero es distribuido en forma de filamento por la empresa Markforged para el uso en su impresora Metal X.
- **Inconel IN718:** de nuevo estamos ante una superaleación de níquel con excelentes propiedades de resistencia a la corrosión y térmica, en este caso llegando a soportar hasta 700°C. En este caso este material se suministra en forma de polvo, para su fabricación con la tecnología SLM.
- **Stainless Steel SS316L:** el acero inoxidable austenítico SS316L o 1.4404 es una aleación de acero inoxidable con bajo contenido en carbono. Este material presenta una muy buena ductilidad y resistencia a la temperatura pudiendo trabajar hasta una temperatura de 425°C. Este material también se fabrica mediante la tecnología SLM en forma de polvo.
- **Titanium Ti6Al4V:** esta aleación es una de las más utilizadas en la impresión 3D de metales y sus aplicaciones son muy variadas, desde la medicina hasta el sector aeronáutico. Tiene unas muy buenas propiedades mecánicas y térmicas trabajando con temperaturas de hasta 417°C. También se comercializa en forma de polvo para las tecnologías de impresión EMB y SLM.

- **ThermaX™ PEEK-GF20:** este termoplástico está formado por polieteretercetona (PEEK) y un 20% de refuerzo de fibra de vidrio. Gracias al refuerzo de la fibra de vidrio es material es capaz de trabajar con temperaturas de servicio de hasta 300°C, además gracias a esas fibras presentará una deformación más baja, y será más rígido y duro que el PEEK.

Resulta interesante ver que todos ellos son materiales metálicos o termoplásticos de alto rendimiento y que no hay ninguno que contenga los materiales clásicos y populares de la fabricación aditiva como son el ABS, PLA, PC y PP.

En cuanto a los materiales metálicos seleccionados debemos descartar a primera vista el acero inoxidable 17-4 PH, pues es un material magnético y crearía un conflicto con el imán que debe ir en su interior. El Inconel 625 comercializado por Markforged, es un material muy específico que solo es posible utilizar con la tecnología Metal X creada por lo propia marca, por lo tanto, se va a descartar, pues queremos un material cuya fabricación sea lo más accesible posible. En cuanto a los otros tres metales no podemos descartar su uso, aunque también es cierto que su conductividad térmica es mucho mayor a la de los termoplásticos, y debemos tener en cuenta que esto podría influir sobre las demás piezas del útil.

Tenemos entonces seis materiales que podremos utilizar presentados en la Tabla 3. La elección del material final se realizará en función de los costes, que se analizarán en el siguiente apartado.

Empresa	Nombre del material	Tecnología	Máx. Temperatura
Ensinger	TECAFIL PEEK VX CF30	MDF	300°C
	TECAFIL PEEK EV	MDF	300°C
Materialise	Inconel IN718	SLM	700°C
	Stainless Steel SS316L	SLM	425°C
	Titanium Ti6Al4V	EBM/SLM	417°C
3D Xtech	ThermaX PEEK-GF20	MDF	300°C

Tabla 3: Selección de los posibles materiales.

2.4.3. Selección final del material.

Como se ha visto en el anterior apartado, los seis materiales son igualmente válidos para las condiciones de trabajo del útil de control, por lo tanto, la elección final se basará en sus costes de fabricación. Se van a separar los materiales en dos grupos, los fabricados mediante MDF y los fabricados mediante SLM, esto se hace para poder seleccionar un material en cada uno de los procesos.

Dar con el precio de los metales en polvo para la impresión 3D SLM resulta muy complicado, pues su uso es muy específico y no se comercializan en tiendas online como lo hacen los filamentos destinados a la fabricación MDF. Por lo tanto, para comparar precios entre ambos materiales se ha decidido utilizar la plataforma de servicios de impresión 3D *Materialise OnSite* [40] de la empresa Materialise, donde se ofrece un servicio online en el que se cargan los archivos de las piezas en formato *.stl*,

se escoge el material de impresión y la tecnología, y esta plataforma genera un presupuesto en línea de la pieza que incluye gastos de envío y de gestión, así como material y mano de obra. Para comparar los tres metales se han realizado todos los presupuestos desde esta plataforma y para cada pieza, y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4:

Plataforma	Material	Pieza	Precio final por pieza	Precio total
Materialise OnSite	Inconel 718	Apoyo A	237,66 €	508 €
		Apoyo B	219,34 €	
		Clip	51 €	
	Stainless Steel SS316L	Apoyo A	217,86 €	452,09 €
		Apoyo B	201,06 €	
		Clip	33,17 €	
	Titanium Ti6Al4V	Apoyo A	251,53 €	534,67 €
		Apoyo B	232,14 €	
		Clip	51 €	

Tabla 4: Comparativa de precios impresión 3D metal de las piezas.

Viendo la tabla podemos concluir que el material metálico óptimo para la impresión de las piezas “Apoyo A”, “Apoyo B” y “Clip” será un acero inoxidable SS316L mediante el uso de la tecnología SLM de fabricación aditiva.

Para la elección del material para la tecnología MDF se ha llevado a cabo otro procedimiento. En este caso no se ha encontrado una plataforma online como la descrita anteriormente para obtener un presupuesto de cada pieza, lo que se ha hecho ha sido consultar diferentes tiendas online de los distribuidores de estos materiales para obtener el precio de las bobinas de filamento (ver referencias [33] y [36]). Con la ayuda de sus hojas técnicas para el dato de la densidad y del software de diseño en 3D Solid Edge para el cálculo del volumen (herramienta “Medir” en la pestaña “Verificar”) se han obtenido los costes de cada pieza y el total:

Tecnología	Nombre del material	Proveedor	Densidad material	Pieza	Volumen pieza	Peso pieza	Precio/Kg	Precio final por pieza	Precio total
MDF	TECAFIL PEEK VX CF30	Ensinger	1,38 g/cm3	Apoyo A	20,271 cm3	27,974 g	870 €/Kg	24,337 €	46,883 €
				Apoyo B	18,317cm3	25,2775 g		21,991 €	
				Clip	0,462 cm3	0,6376 g		0,554712 €	
	TECAFIL PEEK EV	Ensinger	1,3 g/cm3	Apoyo A	20,271 cm3	26,3523 g	777,2 €/Kg	20,481 €	39,454 €
				Apoyo B	18,317cm3	23,8121 g		18,507 €	
				Clip	0,462 cm3	0,6 g		0,4663 €	
	ThermaX PEEK-GF20	3D Xtech	1,43 g/cm3	Apoyo A	20,271 cm3	28,9875 g	635 €/Kg	18,407 €	35,460 €
				Apoyo B	18,317cm3	26,1933 g		16,633 €	
				Clip	0,462 cm3	0,6607 g		0,4195 €	

Tabla 5: Comparativa de precios para termoplásticos de alto rendimiento con impresión MDF.

Para la utilización de la tecnología MDF con nuestras piezas, el material idóneo será el termoplástico ThermaX™ PEEK-GF20 distribuido por la empresa 3DXTech, ya que será el más barato comparado con los demás, teniendo en cuenta que se utiliza la misma impresora y los mismos tiempos de impresión.

En conclusión, para la fabricación de las piezas “Apoyo A”, “Apoyo B” y “Clip” se utilizará o el acero inoxidable SS316L o el termoplástico cristalino ThermaX™ PEEK-

GF20. Será preferible el uso del termoplástico frente al acero inoxidable puesto que la conductividad térmica de este último es mucho mayor que la del termoplástico (16,3 W/mK frente a 0,25 W/mK) y, al estar sometido a elevadas temperaturas, podría acabar afectando a los otros elementos del útil como el tornillo, el imán o la pieza “Unión”.

2.5. Selección del material y proceso de fabricación aditiva para la pieza “Unión”.

La selección del material de esta pieza es mucho más sencilla pues ya no tenemos el factor crítico de la temperatura en la superficie. Debemos tener en cuenta que esta pieza será la que soporte el peso a compresión transmitido a través de las piezas de apoyo, y por lo tanto no puede tratarse de un material elástico como el TPU. En cuanto a la temperatura que alcanzará por convección es algo que no preocupa excesivamente, pero de lo que tenemos que tener cuidado, también hay que tener en cuenta que puede estar expuesto a partículas incandescentes que se produzcan durante la soldadura. Sabiendo esto podemos descartar tanto el PLA como el PET que no trabajan bien con temperaturas altas de más de 50-60°C. Por último, se van a descartar los materiales que no estén preparados para condiciones de exterior o sean sensibles a los rayos UV como el policarbonato (PC) y el polipropileno (PP), pues se quiere que el útil sea tanto de uso exterior como interior, y que no se deteriore excesivamente con el paso del tiempo. Además, se va a intentar no utilizar materiales tan específicos y costosos como los de las otras piezas de contacto, descartando la impresión con metales y con termoplásticos de alto rendimiento.

Por lo tanto, los materiales que quedan como opción para la fabricación de esta pieza son: ABS, ASA, Nylon, resinas y composites. Al igual que en el apartado anterior se ha realizado un listado con estos materiales, pero esta vez teniendo en cuenta directamente la resistencia mecánica del material (con la pieza fabricada en la posición de máxima resistencia) y el coste del mismo (consultado en [41], [42] y [43]), intentando encontrar la mejor relación resistencia-precio para la pieza en cuestión.

Empresa catálogo	Tipo	Nombre	Tecnología	Resistencia a rotura	Densidad	Volumen pieza	Peso	Precio/Kg	Precio pieza
Stratasys	ABS	ABS ESD7	MDF	36 Mpa	1,04 g/cm3	30,128 cm3	31,33 g	124,8 €/Kg	3,91 €
		ABSI	MDF	37 Mpa	1,08 g/cm3		32,54 g	51,07 €/Kg	1,662 €
		ABS M30i	MDF	36 MPa	1,04 g/cm3		31,33 g	408,55 €/Kg	12,8 €
		Digital ABS plus	PolyJet	60 MPa	1,17 g/cm3		35,25 g	29,95 €/Kg	1,06 €
	ASA	ASA	MDF	30 MPa	1,08 g/cm3		32,538 g	43,12 €/Kg	1,403 €
	Poliamidas	Nylon12	MDF	46 Mpa	0,994 g/cm3		29,947 g	63,93 €/Kg	1,915 €
Nylon 6		MDF	49,3 Mpa	1,163 g/cm3	35,04 g		60,10 €/Kg	2,106 €	
Markforged	Composites	HSHT fiberglass	MDF	600 Mpa	1,5 g/cm3		45,192 g	0,5 €/cm3	15,064 €
Materialise	Composites	Ultrasint PA6 MF	SLS	62 Mpa	1,44 g/cm3		43,384 g	/	14,48 €
		PA-AF	SLS	48 MPa	1,36 g/cm3		40,974 g	/	13,40 €
		PA-GF	SLS	51 Mpa	1,22 g/cm3	36,756 g	/	13,26 €	
	Resinas	Poly 1500	SLA	32 Mpa	1,2 g/cm3	36,154 g	/	106,08 €	
		Xtreme	SLA	44 Mpa	1,2 g/cm3	36,154 g	/	106,08 €	
Dynamic 3D	ABS	ABS	MDF	45 Mpa	1,04 g/cm3	31,333 g	29,50 €/Kg	0,924 €	
	ASA	ASA	MDF	42 Mpa	1,07 g/cm3	32,237 g	40,34 €/Kg	1,3 €	
	Composite	PA12 Carbon	MDF	110 Mpa	1,07 g/cm3	32,237 g	144,20 €/Kg	4,65 €	

Tabla 6: Comparación materiales para la pieza "Unión"

En esta tabla no se han añadido los materiales de los que no se ha podido encontrar el precio, la mayoría de ellos materiales líquidos para la tecnología SLA. A primera vista

se ve una gran diferencia de precios entre los materiales fabricados mediante SLS y SLA y los fabricados con MDF y PoliJet. Esta diferencia tan grande se debe a que el precio de los materiales SLS y SLA ha sido obtenido con *Materialise OnSite* como se ha explicado en el apartado anterior, y por lo tanto en ese precio se están teniendo en cuenta costes de envío y mano de obra. Por lo tanto, vamos a escoger el mejor material dependiendo de la tecnología de fabricación utilizada.

Entre los materiales fabricados con MDF el que mejor relación resistencia-precio tiene es el ABS de la marca Dynamic 3D con una resistencia a rotura de 45 MPa y un precio de material gastado en la pieza de 1,06 €. Con un precio muy parecido de 0,924 € pero con una mayor resistencia de 60 MPa encontramos el Digital ABS Plus fabricado con la tecnología PolyJet que simula el ABS con una mayor dureza y resistencia a altas temperaturas.

Los precios obtenidos con la tecnología SLA son de aproximadamente unas 7 veces más que los obtenidos con SLS, por lo tanto, descartaremos totalmente el fabricar esta pieza mediante SLA. Entre los materiales para la fabricación SLS destaca sobre todos el Ultrasint PA6 MF de Materialise, con una resistencia a rotura de 62 Mpa y un precio total de fabricación de la pieza de 14,48 €. Este material es una poliamida con carga mineral ideal para su aplicación en la industria de la automoción, así como para prototipos funcionales. Además, presenta una buena rigidez, resistencia térmica y química [35].



Ilustración 40: Digital ABS Plus para PoliJet.
Imagen de www.stratasys.com

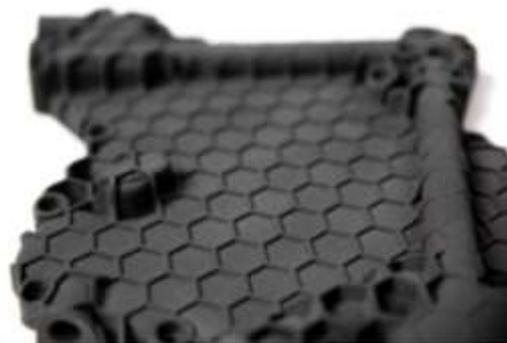
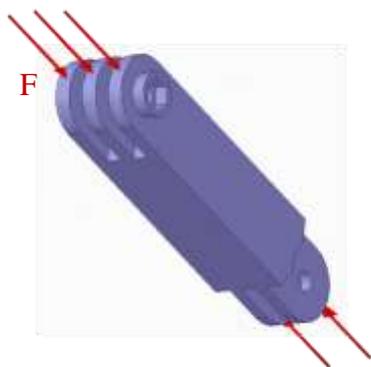


Ilustración 39: Ultrasint PA6 MF para SLS. Imagen de www.materialise.com

En conclusión, para la fabricación de la pieza “Unión” utilizaremos el ABS de la marca Dynamic 3D para la fabricación con MDF, el Digital ABS Plus de la marca Stratasys para la fabricación con PolyJet y el Ultrasint PA6 MF para la tecnología SLS. Se recomendaría utilizar el ABS mediante MDF ya que es la tecnología de fabricación más sencilla y menos costosa de las tres, aunque eso implique una menor resistencia del material. Sabiendo la sección de la pieza “Unión” sobre la que se aplicará la carga (menor área donde se apoyan los tornillos) y su resistencia a rotura, podemos calcular el peso que soportará cada material antes de romper ayudándonos de la ecuación 1. Los resultados se encuentran en la tabla.

Ilustración 41: Pieza unión y fuerzas aplicadas.



$$\sigma_{material} [MPa] = \frac{F [N]}{A [mm^2]} \quad [1]$$

$$A = 136 \text{ mm}^2$$

Empresa	Nombre	Tecnología	Resistencia a rotura	Área	Fuerza	Peso
Dynamic 3D	ABS	MDF	45 Mpa	136 mm ²	6120 N	623,85 Kg
Stratasys	Digital ABS Plus	PolyJet	60 Mpa		8160 N	831,8 Kg
Materialise	Ultrasint PA6 MF	SLS	62 Mpa		8432 N	859,53 Kg

Tabla 7: Peso que soportará la pieza "Unión" antes de rotura para cada material.

2.6. Fabricación de las piezas.

2.6.1. Fabricación de las piezas "Apoyo A", "Apoyo B" y "Clip".

Como se ha decidido en el apartado anterior estas piezas serán fabricadas con el termoplástico cristalino de alto rendimiento ThermaX™ PEEK GF20 mediante modelado por deposición fundida (MDF). Al ser un termoplástico especial y extremadamente resistente a las altas temperaturas la impresora encargada de imprimir este filamento debe cumplir unas condiciones que nos da el propio vendedor relacionadas con la temperatura de la boquilla encargada de derretir el material, así como la temperatura de la cámara o de la base. Estas condiciones son:

- Temperatura de extrusión: 375 – 410°C
- Temperatura de la base: 130 – 145°C
- Preparación de la base: se recomienda el uso de cinta Ultem™ para una superficie ideal. También es adecuado el uso de barra de pegamento sobre vidrio limpio.
- Temperatura de la cámara de impresión (si es posible): 70 – 140°C (cuanto más caliente mejor).
- Velocidad de impresión: 10-50 mm/s para capas de 0,2mm.

A continuación, se proponen algunas impresoras del mercado que cumplen con todas estas condiciones. Cabe destacar que luego estas impresoras son capaces de imprimir todos los termoplásticos normales, no solo los de alto rendimiento:

- **GEARBOX™ HT2:** esta impresora de la marca 3D XTech tiene un volumen de impresión de 457 x 457 x 813mm, 2 extrusores con una temperatura de extrusión máxima de 475°C, una temperatura de cámara de hasta 230°C, temperatura de la base de hasta 200°C y un diámetro de filamento de 1,75mm [36].
- **Tractus 3D T850P PRO series:** impresora de la marca Tractus 3D, con una temperatura de extrusión máxima de hasta 450°C, temperatura máxima de la cámara de 80°C y temperatura de la base de 175°C [44].
- **AON-M2:** impresora de la empresa AON 3D con volumen de impresión de 454 x 454 x 640mm, temperatura de extrusión de 470°C, temperatura de la superficie de 200°C y temperatura de la cámara de hasta 135°C [45].
- **Essentium HSE 180-S** impresora de la empresa Essentium con volumen de impresión de 740 x 510 x 650mm, temperatura de extrusión de 500°C, temperatura de la superficie de 200°C y temperatura de la cámara de hasta 110°C [45].
- **3DGence Industry F420:** impresora de la empresa 3DGence con volumen de impresión de 380 x 380 x 420mm, temperatura de extrusión de 500°C, temperatura de la superficie de 180°C y temperatura de la cámara de hasta 180°C [45].
- **Apium P220:** impresora de la empresa Apium con volumen de impresión de 220 x 175 x 160mm, temperatura de extrusión de 540°C, temperatura de la superficie de 160°C y temperatura de la cámara de hasta 180°C [45].
- **3ntr Spectral 30:** impresora de la empresa 3ntr con volumen de impresión de 300 x 300 x 300mm, temperatura de extrusión de 470°C, temperatura de la superficie de 300°C y temperatura de la cámara de hasta 250°C [45].

Para conseguir una buena calidad de impresión en las superficies curvas de nuestras piezas al exportar el fichero del software de diseño 3d a el fichero para impresión (.stl) se utilizará una tolerancia de cuerda de 0,01 y tolerancia angular de 3°. Además, se elegirá una altura de capa de 0.1mm que, aunque aumente el tiempo de impresión, nos asegurará una buena calidad superficial y precisión, fundamentales a la hora de montar el útil para que las piezas como el imán o el clip encajen correctamente. También se fabricarán en la siguiente posición para asegurar la correcta dirección de las fibras y evitar el uso innecesario de material de soporte en algunas zonas (material que se encarga de crear un apoyo auxiliar para la correcta fabricación de la pieza).

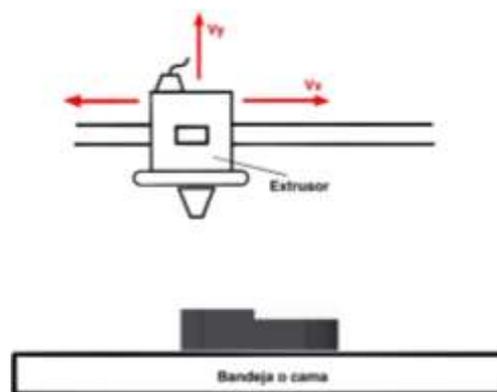


Ilustración 42: Posición de la pieza "Clip" en la impresión 3D

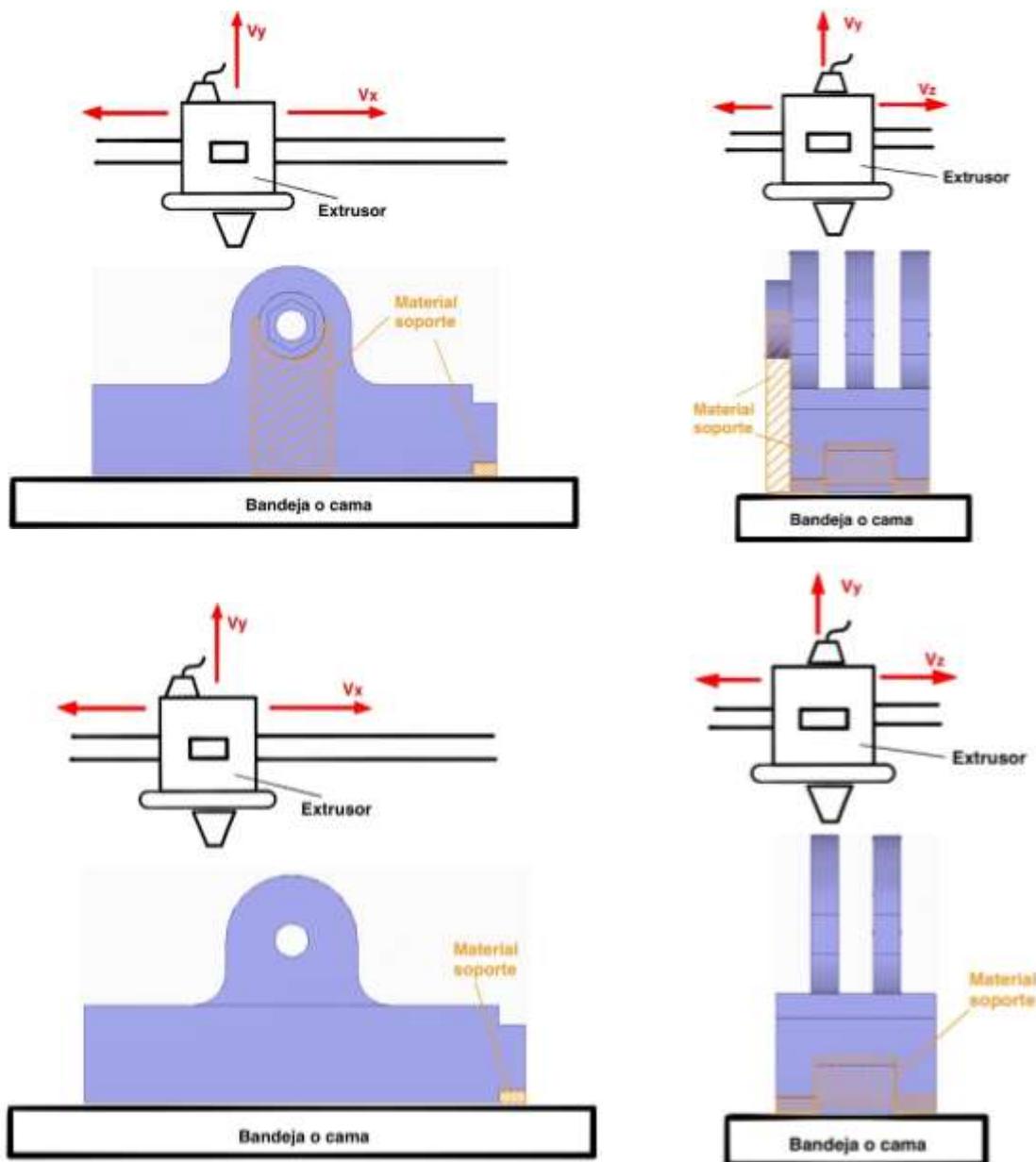


Ilustración 43: Posición de las piezas "Apoyo A" y "Apoyo B" en la impresora MDF

Será necesario un post procesado de la pieza en el que se eliminará todo el material de soporte con el disolvente correspondiente. Se intentará conseguir unas superficies lo más lisas posibles que no comprometan después el movimiento relativo entre las piezas.

2.6.2. Fabricación de la pieza "Unión".

Para la impresión de la pieza en el material ABS de Dynamic 3D con la tecnología MDF se podrían utilizar todas las anteriores impresoras presentadas para impresión de las piezas de termoplásticos de alto rendimiento, pues las condiciones de impresión para el ABS son básicas comparadas con las anteriores [46]:

- Temperatura del extrusor: 235°C.
- Temperatura de la bandeja (cama): 80°C para piezas pequeñas y 130°C para grandes.
- Se recomienda impresora con cerrado hermético y zona ventilada debido a los gases nocivos.

Algunas de las impresoras de distintas calidades en el mercado de MDF que pueden utilizarse para la impresión ABS, a parte de las mencionadas anteriormente, son:

- **Dynamical Tools DT600+:** impresora de alta calidad de la empresa Dynamical Tools con un volumen de impresión de 450 x 600 x 450mm, con un diámetro de filamento de 1,75mm, una temperatura máxima de extrusor de 500°C, una temperatura de bandeja máxima de 150°C y dos extrusores [47].
- **Ultimaker 2+:** impresora de buena calidad de la marca Ultimaker con un volumen de impresión de 223 x 223 x 205mm, una temperatura máxima de la bandeja de 100°C, una velocidad máxima de impresión de 300 mm/s, filamento compatible de 2,85mm y resolución de capa de 600 a 20 micras [48].
- **ANET A6:** una impresora DIY (“do it yourself” es decir “hágalo usted mismo”) muy asequible comparado con las anteriores (alrededor de 205 €). Tiene un volumen de impresión de 220 x 220 x 250mm, una resolución de 0,1mm, una velocidad máxima de impresión de hasta 150 mm/s [49].
- **Creality Ender 3:** otra impresora muy asequible (224,69 €) tiene un volumen de impresión 220 x 220 x 250mm, una resolución de 0,1mm y una velocidad de impresión de hasta 200 mm/s [49].
- **Anycubic I3 MEGA:** de nuevo un kit de impresora con un precio asequible (280€) con un volumen de impresión de 210 x 210 x 205mm, una resolución de 50 micras y una velocidad máxima de impresión de hasta 60 mm/s, mucho más lenta que las anteriores [49].

Para este tipo de impresión igual que en las anteriores piezas, al exportar a formato de impresión .stl se utilizará una tolerancia de cuerda de 0,01 y tolerancia de ángulo de 3°. Para las capas se escogerá una altura de capa de 0,1mm para una precisión en el posterior ensamblaje de las piezas. En este caso la posición de la pieza es importante para asegurar que la dirección de las capas del material va en la dirección del esfuerzo, para eso se colocará como se muestra en la ilustración. El único post procesado necesario será el de eliminar el material de soporte y asegurar una superficie lisa para el movimiento relativo de las piezas en el ensamblaje.

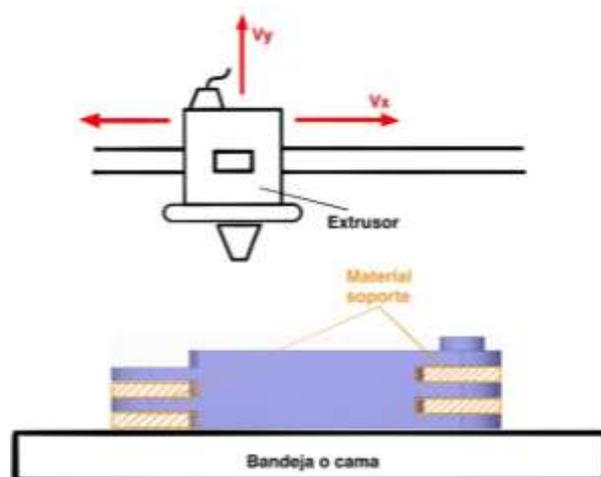


Ilustración 44: Posición de la pieza "Unión" en la impresión MDF.

Si se quiere imprimir el material mediante impresión con PolyJet y el Digital ABS plus de Stratasys tendremos que utilizar impresoras de esta tecnología de las que no hay mucha variedad en el mercado pues la mayoría son de la marca Stratasys, la más asequible sería la impresora Stratasys F120. Esta impresora de sobremesa tiene un volumen de impresión de 254 x 254 x 254mm capaz de fabricar ininterrumpidamente durante hasta 250 horas, además la impresora incluye un cámara con la que poder ver el proceso de tu pieza en cualquier momento. Estas impresoras por lo general tienen precios mucho más elevados a las de MDF de calidad estándar, en este caso la impresora elegida tendría un precio de alrededor de 12.000€ [50].

Por último, si queremos imprimir esta pieza con la tecnología SLS y el material Ultrasint PA6 MF de Materialise tenemos más opciones de impresoras que antes, en este caso nos sirve con las impresoras de sobremesa. De las disponibles en el mercado se han escogido las más conocidas [51]:

- **Sinterit Lisa:** esta impresora de la marca Sinterit es de las más asequible con una lata precisión. Su volumen de impresión es de 150 x 200 x 150mm y un espesor mínimo de capa de 0,8mm. Su precio es de alrededor de 6.000€.
- **Natural Robotics Vit:** esta impresora de la marca española Natural Robotics tiene un volumen de impresión de 250 x 250 x 250mm y un espesor mínimo de capa de 0,05mm, es decir, muy buena calidad. Su precio ronda los 10.000€.
- **Formlabs Fuse 1:** impresora de la marca Formlabs con un volumen de impresión de 165 x 165 x 320mm y un espesor mínimo de capa de 0,1mm. Su precio es muy parecido a la anterior, alrededor de 9.000€.

Hay que tener en cuenta que el post procesado que necesitan las piezas fabricadas con estas tecnologías también resulta algo laborioso al igual que el MDF. Al sacar las piezas de la cubeta es necesario esperar a que se enfríe el polvo para después separar la pieza del material y eliminar los restos de polvo mediante el uso de un cepillo y un aspirador o aire comprimido, proceso que puede llevar hasta 12 horas en algunos casos. También es importante el uso de protección debido a la toxicidad de estas pequeñas partículas de polvo.

3. ESTUDIO ECONÓMICO.

Este apartado tiene la finalidad de estudiar la rentabilidad económica del proyecto y para ello nos ayudaremos del presupuesto realizado en el Documento IV: Presupuesto. Como el objetivo principal del proyecto es el de sustituir los útiles de control para soldadura tradicionales por uno fabricado mediante fabricación aditiva, debemos comparar los precios de ambos.

Resulta complicado encontrar un útil que tenga las mismas funciones que el nuestro, pues se ha fabricado intentando mejorar las de otros. Para facilitar el estudio de la rentabilidad económica vamos a aplicarlo a un caso real. Utilizaremos el ejemplo presentado en el apartado 2.3 en el que se soldaba una estructura para un banco de espera. Como vimos, para la fabricación del banco solo era necesario utilizar un único útil de control e ir cambiando su posición hasta obtener los distintos ángulos:

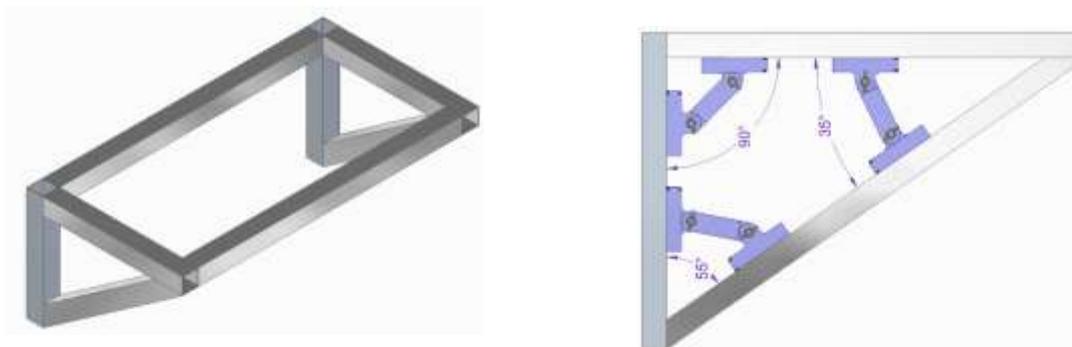


Ilustración 45: ejemplo banco de espera del apartado 2.3

Es decir, para la fabricación de este banco los costes en útiles de control serán de 139,363 € para nuestro diseño.

Ahora vamos a ver qué útiles tradicionales hay disponibles en los catálogos de distintos proveedores para soldar esta estructura. Vamos a considerar que ya se dispone de una mesa de soldadura, que nos ayudará a utilizar estos utillajes. Para soldar dos piezas con ángulos tan poco comunes la única manera sería la de apoyarlas en la mesa horizontalmente y, una vez posicionadas con el ángulo necesario entre ellas, fijar cada una restringiendo el movimiento entre ellas como se muestra a continuación:

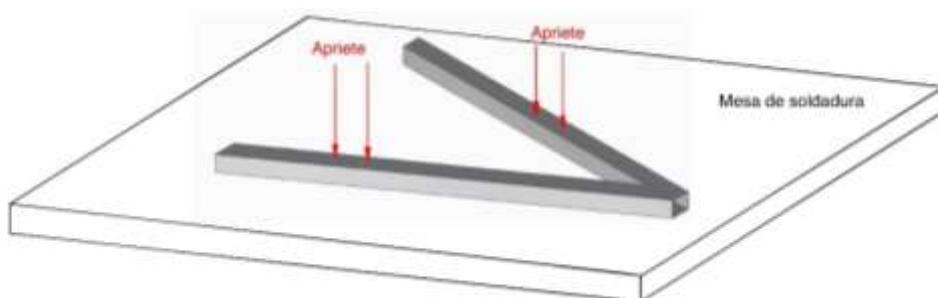


Ilustración 46: posición de las piezas en la mesa (derecha) y ejemplo de útil de sujeción (izquierda) imagen de Euroweld

Esta operación se hará para cada barra cuadrada que se vaya añadiendo hasta obtener la estructura final. Para esa sujeción a la mesa se pueden utilizar varios utillajes, algunos diseñados para usar en mesas de soldadura y otros para mesas sin perforaciones. A continuación, se muestran varios de estos útiles que podrían servir obtenidos de varios catálogos como los utillajes BuildPro [55] o Bessey [56]:

- Mordazas de sujeción: mordaza versátil para trabajo de fijación, puede ser para mesas de soldadura con perforaciones y alcance variable o sin mesa, pero estando la pieza cerca al borde. En catálogos [57] encontramos precios de aproximadamente 48€,



Ilustración 47: Mordazas de sujeción. Imágenes de Euroweld (izq) y Bessey (der)

- Sargento palanca: muy parecido al anterior, es un sargento multiusos de palanca con botón de liberación rápida, placa de contacto de 40mm y agujero roscado. Son usadas normalmente para aplicaciones en las que existen vibraciones o esfuerzos de torsión. Encontramos estos útiles a un precio más elevado que los anteriores, de aproximadamente 75€ [57].



Ilustración 48: Sargento palanca.
Imagen obtenida de Euroweld.

Si utilizamos los útiles de sujeción tradicionales debemos utilizar dos mordazas o sargento palanca, en el caso de querer utilizar la más barata utilizaremos dos mordazas de sujeción, que tendrá un coste aproximado de 96€. Si lo comparamos con el coste de nuestro útil de control de 139,63€ podemos ver que no es la opción más económica y sería la opción correcta el utilizar las mordazas.

Hay que tener en cuenta que este pequeño estudio que se ha hecho para este ejemplo se debe realizar siempre antes de soldar las piezas, pues puede haber aplicaciones específicas en el que serán necesarios más utillajes tradicionales y sea más económico el uso de nuestro útil.

4. ANEXO: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.

La finalidad de este apartado del trabajo es la de encontrar los objetivos de desarrollo sostenible que pueden estar relacionados con este proyecto propuesto. “En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos, sin dejar a nadie atrás. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades.” [51].



Ilustración 49: Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Al ser un trabajo más enfocado a el diseño e investigación resulta más complicado encontrar un objetivo con el que se vea afectado en su totalidad con todas sus metas. Vamos a destacar en concreto dos objetivos, el primero será el más afectado por el trabajo fin de grado, y otro secundario que se vea afectado en menor medida.

4.1. ODS más afectado por el TFG.

El ODS primario de este trabajo fin de grado será el número 9: “*Industria, innovación e infraestructura*”. Si observamos las metas que hay para este objetivo vemos que no todas se ven afectadas por el trabajo, pero podemos destacar dos que sí lo son:

- Meta 9.5: “*Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores*

público y privado en investigación y desarrollo” [52]. Como se ha visto, la idea de fondo de este TFG es la de utilizar una tecnología moderna e innovadora como es la fabricación aditiva para intentar sustituir, o incluso superar, a los procesos de fabricación tradicionales. En concreto se ha propuesto el uso de esa tecnología para un sector tan tradicional como es el de los utillajes y el impacto podría ser mayor, al no estar aún muy desarrollado. Como dice el objetivo debemos mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países. Esto es lo que se hace con la implementación de la fabricación aditiva en las industrias, que ha mejorado los procesos de diseño y desarrollo de muchos sectores industriales como el de la automoción, consiguiendo reducir tiempos y recursos con la creación rápida de prototipos ayudando a tener unos productos de mayor calidad y más eficientes. Si se consigue una mayor inversión en este tipo de tecnologías por parte de más sectores, se mejorarán las cadenas de producción y los desarrollos de productos, disminuyendo los costes y mejorando los productos.

- Meta 9.b: *“Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas” [52]. Los países en desarrollo podrían invertir en implementar el uso de la fabricación aditiva en centros de investigación, instituciones educativas y diferentes industrias. Esta primera inversión impulsaría el uso de estas tecnologías en los próximos años, y al ser relativamente nuevas, se intentaría crear nuevas tecnologías o materiales para patentar, que hagan que ese país se ponga a la cabeza frente a otros más desarrollados. Por ejemplo, en México se creó el primer CONMAD (Consortio de Fabricación Aditiva en Latinoamérica), y se realizó una inversión de más de \$13 millones de dólares para aumentar la innovación e investigación en estas tecnologías de fabricación aditiva, uno de sus principales objetivos es que en los próximos años hasta un 40% de los productos de alto valor agregado en los sectores aeronáutico y automotriz se fabriquen mediante fabricación aditiva [53].*

4.2. ODS secundario.

Hay otro objetivo de la ONU que se ve afectado por este TFG pero en menor medida que el anterior que es el objetivo número 12: *“Producción y consumo responsable”*. De este objetivo destacamos dos metas:

- Meta 12.5: *“De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.”* Es cierto que en la fabricación aditiva la mayoría de los materiales utilizados son plásticos, pero la mayoría de ellos son reciclables o biodegradables. El plástico por excelencia usado para la mayoría de prototipos conocido como PLA es un material biodegradable fabricado con componentes naturales como almidón de maíz. En cuanto al reciclaje ya hay varios proyectos en marcha en los que se están utilizando los desechos plásticos para producir

filamentos para la impresión 3D. Los materiales son recogidos y clasificados según su composición, más adelante se lavan, cortan y comprimen hasta conseguir el filamento deseado. Esto mismo puede hacerlo la gente en sus propias casas con máquinas como *RecycleBot* donde se introduce el residuo plástico y se obtiene el filamento, según el fabricante con alrededor de 20 envases de leche se puede conseguir hasta 1kg de filamento. También se están creando máquinas para fabricar tu propio filamento como *Filastruder* donde se obtienen filamentos resistentes de ABS natural a base de fundir pellets, haciéndolo incluso más ecológico que el PLA.

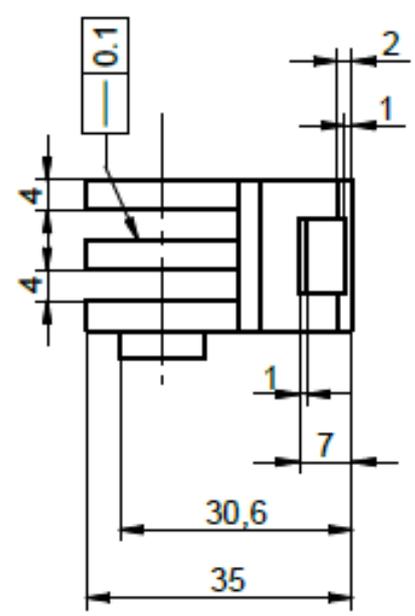
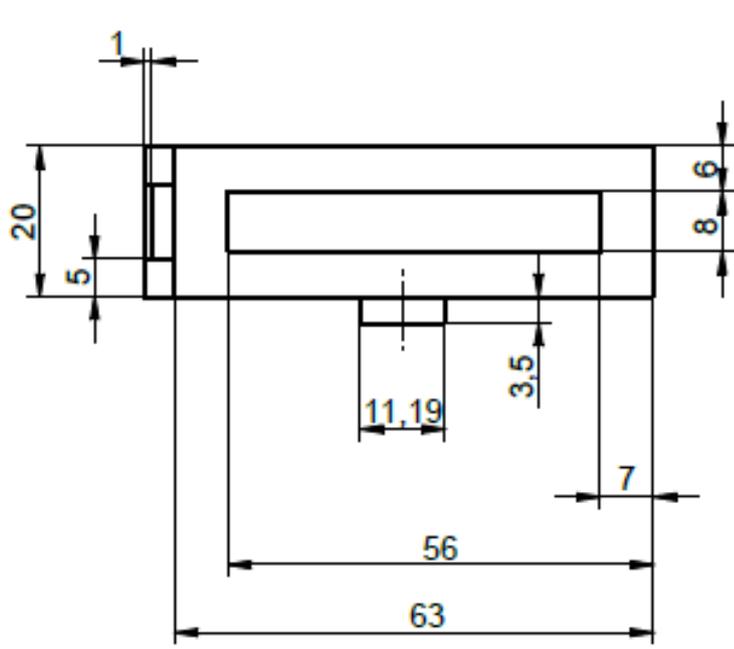
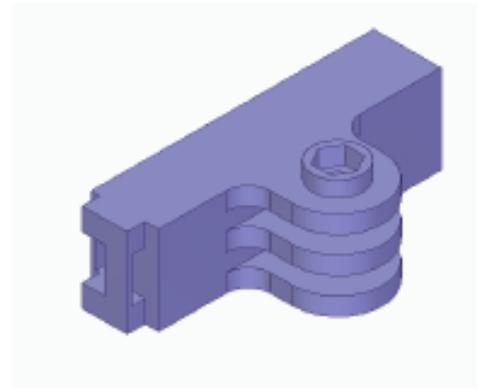
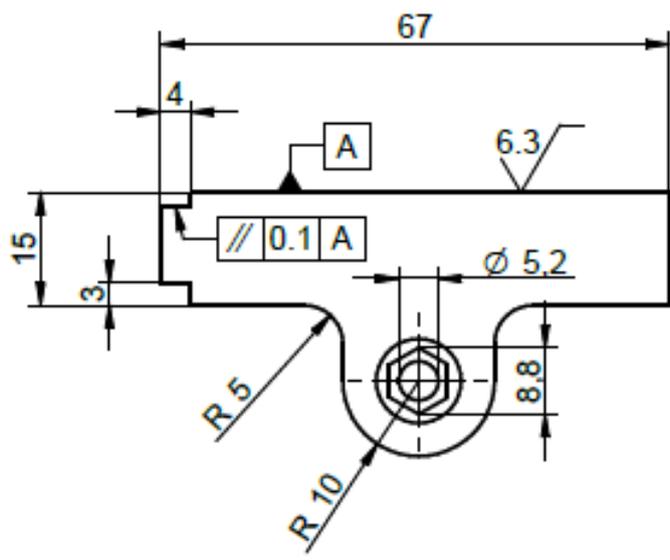
- Meta 12.a: “*Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles*”. En este caso podemos relacionar esta meta con nuestro proyecto al estar implementando la idea de: “diseña y fabrica tu producto antes de comprarlo”. Con el creciente uso de la fabricación aditiva en el ámbito doméstico en los últimos años, se han desarrollado muchas plataformas web donde la gente crea sus propios diseños y los pone a disposición de todo el mundo para uso para uso individual (Cults, Free3D, GrabCAD, Thingiverse, MyMiniFactory, etc), esto está motivando a la gente a crear sus propios diseños personalizados, innovar, crear y fabricar en sus propias casas antes de adquirirlos en una tienda. Puede que aún sea muy pronto para hablar de una gran repercusión en el consumo, pero debemos tener en cuenta que aún es todo muy nuevo y su uso se va popularizando con el tiempo, a la vez que disminuyen los precios de las impresoras 3D.

DOCUMENTO II: PLANOS

1. LISTADO DE PLANOS.

Para definir el útil de control hemos se ha realizado un plano en tamaño A4 para cada pieza:

- Planos de las piezas fabricadas con ThermaX GF-20 y MDF avanzada.
 - Plano N°1: pieza Apoyo A.
 - Plano N°2: pieza Clip.
 - Plano N°3: pieza Apoyo B.
- Planos de la pieza fabricada con ABS, Digital ABS Plus o Ultrasint PA6.
 - Plano N°4: pieza Unión.

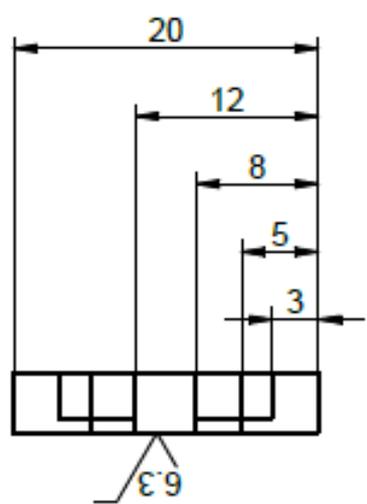
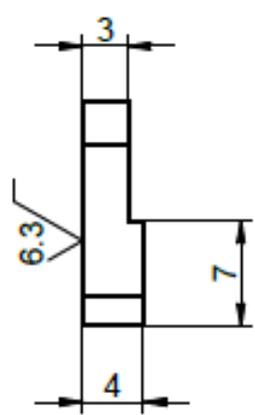
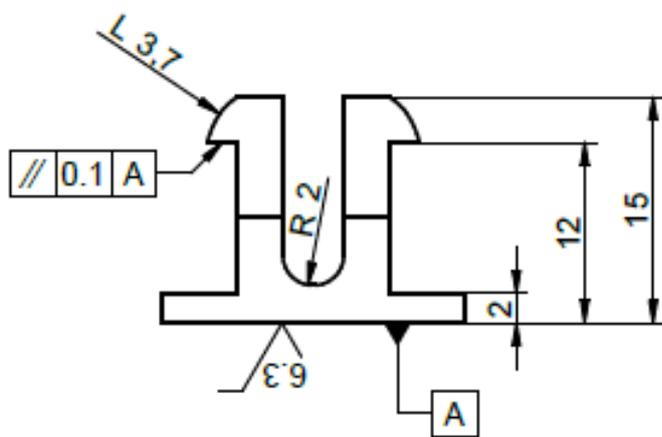


18/ (6.3/)

MATERIAL	ThermaX PEEK-GF20	
TOLERANCIA	ISO 2788-m	
	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Ignacio Mendialdua	17/03/2020
COMPROBADO	Ignacio Mendialdua	17/03/2020
ESCALA:	FIRMA:	
1:1		

Trabajo Fin de Grado 2019/2020	
APOYO A	
I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA: 1

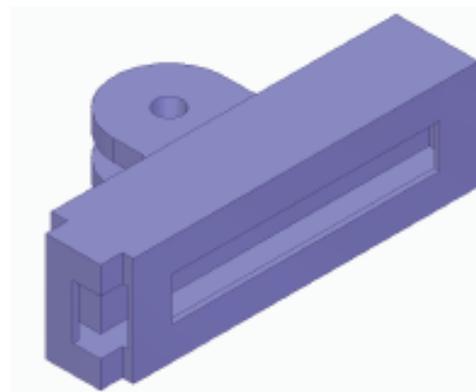
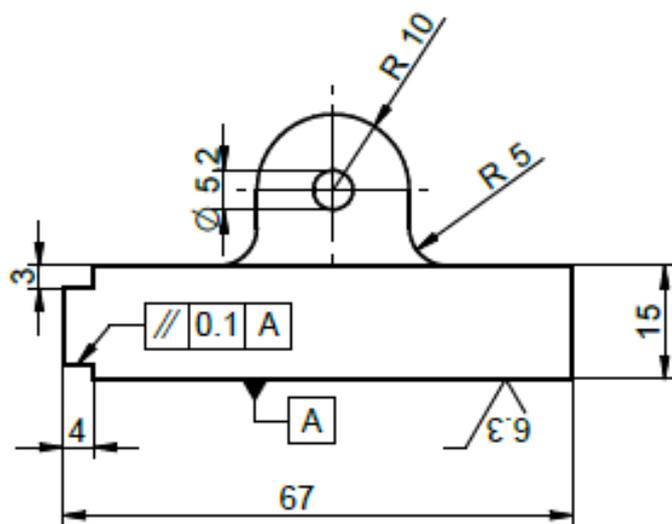
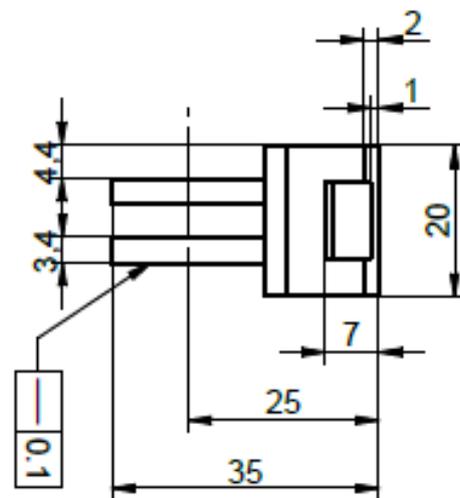
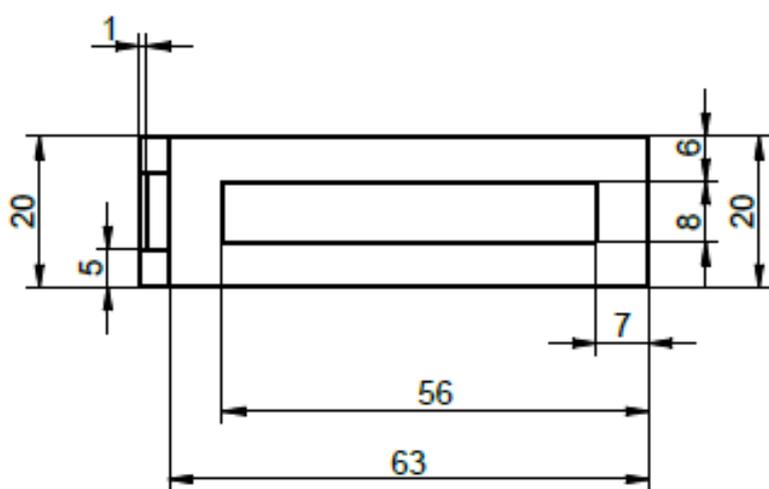
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



18√ (6.3√)

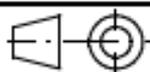
MATERIAL	ThermaX PEEK GF-20		Trabajo Fin de Grado 2019/2020	
TOLERANCIA	ISO 2768-m			
F	NOMBRE		FECHA	
	DIBUJADO		17/03/2020	
	COMPROBADO		17/03/2020	
ESCALA: 2:1		FIRMA:		CLIP I.C.A.I. N° DE LÁMINA: 2

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



18/ (6.3/)

MATERIAL	ThermaX PEEK GF-20
TOLERANCIA	ISO 2788-m



Trabajo Fin de Grado 2019/2020

	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Ignacio Mendialdua	17/03/2020
COMPROBADO	Ignacio Mendialdua	17/03/2020

APOYO B

ESCALA:

FIRMA:

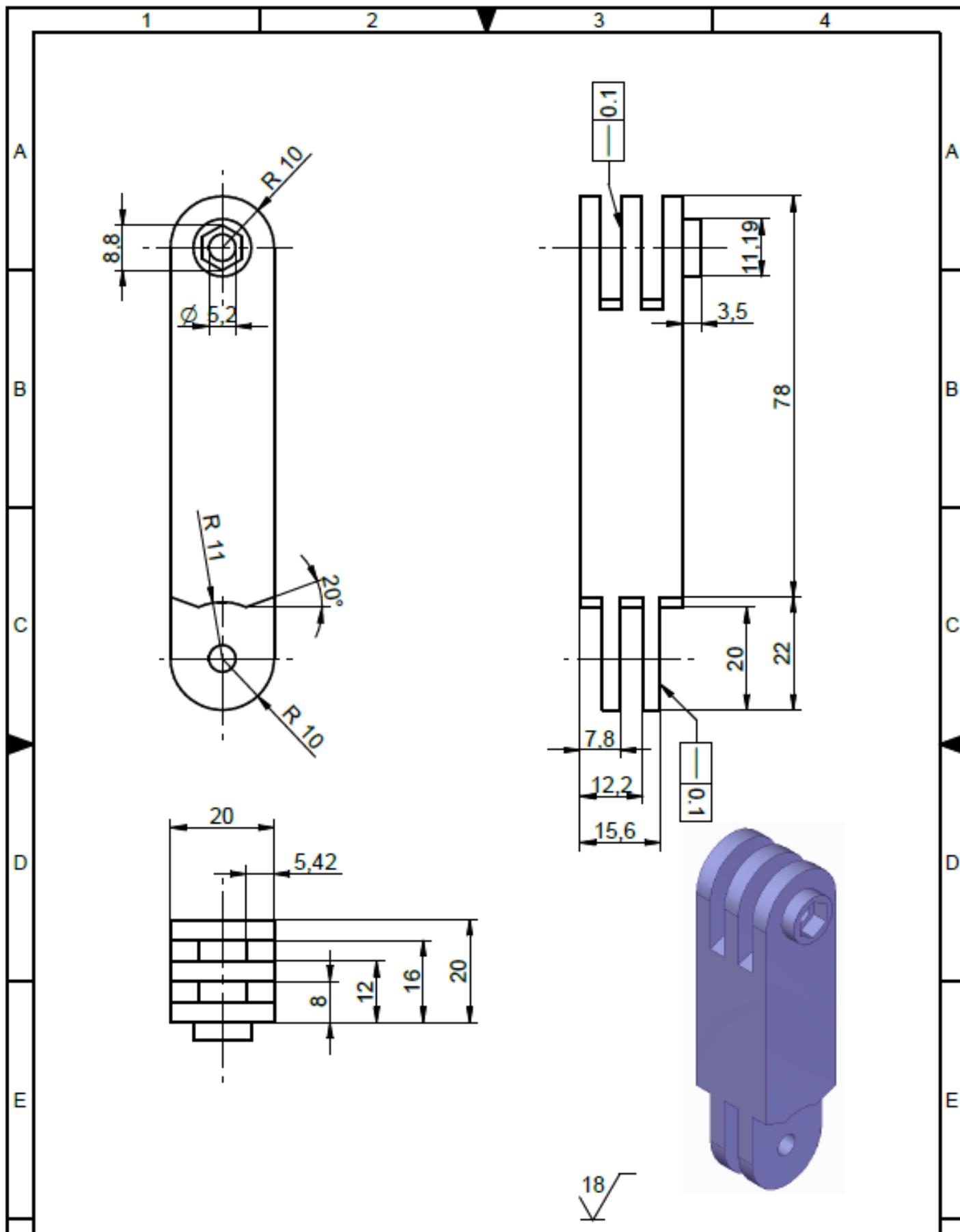
1:1

I.C.A.I.

Nº DE LÁMINA:

3

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



MATERIAL	ABS	
TOLERANCIA	ISO 2768-m	
	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO	Ignacio Mendialdua	17/03/2020
COMPROBADO	Ignacio Mendialdua	17/03/2020
ESCALA:	FIRMA:	
1:1		

Trabajo Fin de Grado 2019/2020	
UNIÓN	
I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA: 3

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

DOCUMENTO III: PLIEGOS DE CONDICIONES

1. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS Y PARTICULARES

En el desarrollo de este trabajo, con el objetivo de obtener un diseño funcional y una correcta elección de los materiales y proceso de fabricación, se han ido tomado ciertas simplificaciones y suposiciones. En este apartado se describirán todas aquellas condiciones tanto de trabajo como de fabricación que se deben cumplir a la hora de utilizar el útil de control, en orden de asegurar su correcto funcionamiento.

1.1. Condiciones de fabricación.

Dependiendo del tipo de pieza se deberán de cumplir ciertas condiciones a la hora de la impresión 3D.

1.1.1. Condiciones de fabricación para las piezas “apoyo A”, “Apoyo B”, y “Clip”.

Como se desea imprimir en un termoplástico PEEK con refuerzo de fibra de vidrio de altas prestaciones (el propuesto es el ThermaX GF-20) para soportar temperaturas de hasta 289°C, la impresora MDF a la hora de imprimir deberá cumplir:

- 1) Temperatura de extrusión: 375 – 410°C
- 2) Temperatura de la bandeja calefactada: 130 – 145°C
- 3) Preparación de la base: se recomienda el uso de cinta UltemTM para una superficie ideal. También es adecuado el uso de barra de pegamento sobre vidrio limpio.
- 4) Temperatura de la cámara de impresión (si es posible): 70 – 140°C (cuanto más caliente mejor).
- 5) Velocidad de impresión: 10-50 mm/s.

Además, será necesario un post procesado para la eliminación de material de soporte con disolventes y asegurar un acabado liso en las superficies. Si la precisión de la impresora lo permite se escogerá una altura mínima de capa de 0,1mm. Para las superficies curvas se recomienda una tolerancia de cuerda de 0,01 y tolerancia angular de 3°.

1.1.2. Condiciones de fabricación para la pieza “Unión”.

Se han propuesto tres opciones de fabricación de fabricación para esta pieza: MDF, PolyJet y SLS. Para asegurar la buena impresión por MDF con ABS la impresora debe cumplir:

- 1) Temperatura del extrusor: 235°C.
- 2) Temperatura de la bandeja (cama): 80°C
- 3) Se recomienda impresora con cerrado hermético y zona ventilada debido a los gases nocivos.

También será necesario un trabajo de post procesado igual que el anterior, hasta eliminar todo el material de soporte y obtener superficies lisas. En cuanto a las tecnologías de PolyJet y SLS las condiciones de impresión vendrán determinadas dependiendo de la impresora utilizada, que incluirá en su catálogo los materiales que es capaz de imprimir. Los que sí sabemos es que las fabricadas mediante SLS necesitarán un largo post procesado de secado y eliminación total del polvo.

1.2. Condiciones de trabajo.

Para que las piezas fabricadas cumplan con su funcionalidad existen ciertas limitaciones a la hora de trabajar con el útil de control:

- 1) Durante el montaje del útil debemos de asegurar el correcto apriete de los tornillos hasta que restrinjan por completo el movimiento del útil.
- 2) El material a soldar para el que se ha diseñado el útil es el acero, o cualquiera que tenga menores prestaciones de conductividad térmica y temperatura de fusión. El material a soldar debe ser magnético. Dentro de los aceros se recomiendan por su buena soldabilidad: aceros de bajo carbono SAE 1010 y 1020, aceros de medio carbono SAE 1030 y 1050, aceros de baja aleación SAE 2340, 3145, 4130 y 4350 y aceros inoxidables martensíticos y ferríticos AISI 405, 410 y 430.
- 3) Hay que asegurar una distancia mínima de los apoyos del útil a la unión de las piezas a soldar de 48mm.
- 4) En soldadura fuerte se ha de evitar en todo momento el contacto directo de la llama del soplete con el útil, por eso se recomienda el uso de soldadura por arco eléctrico.
- 5) El útil puede ser utilizado tanto en entornos de interior como en exterior en todo tipo de condiciones, aunque se recomienda su limpieza antes de usar para asegurar una eficiente actuación del imán.

DOCUMENTO IV: PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN.

En este documento se creará un presupuesto para la fabricación de nuestro útil de control. La idea es la de tener un coste real con el que se pueda estudiar la rentabilidad del proyecto en el Estudio Económico de la memoria.

Para ello se utilizarán los datos de costes obtenidos de la impresora 3D Dimension SST768 del laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas – ICAI. También se utilizará el software “CURA 4.6” de Ultimaker que nos ofrece una simulación de la fabricación de las piezas con las condiciones de impresión impuestas para cada material, y que nos dará el volumen tanto del material de la pieza como del material de soporte utilizado. Con todos estos datos podremos obtener un presupuesto real para la fabricación de nuestra pieza.

2. PRESUPUESTOS DE FABRICACIÓN.

2.1. Presupuesto para las piezas “Apoyo A”, “Apoyo B” y “Clip”.

Primero calcularemos el volumen de material de la pieza y de soporte utilizado para la impresión de estas tres piezas con la ayuda de “CURA”. En este software de simulación de impresión 3D debemos primero cambiar los ajustes de la impresora para que cumplan con las condiciones de impresión de este termoplástico PEEK reforzado con fibra de vidrio ThermaX GF-20 que se pueden encontrar en el Documento III: Pliegos de condiciones. Para eso crearemos una nueva impresora con la función “custom” como se muestra a continuación:

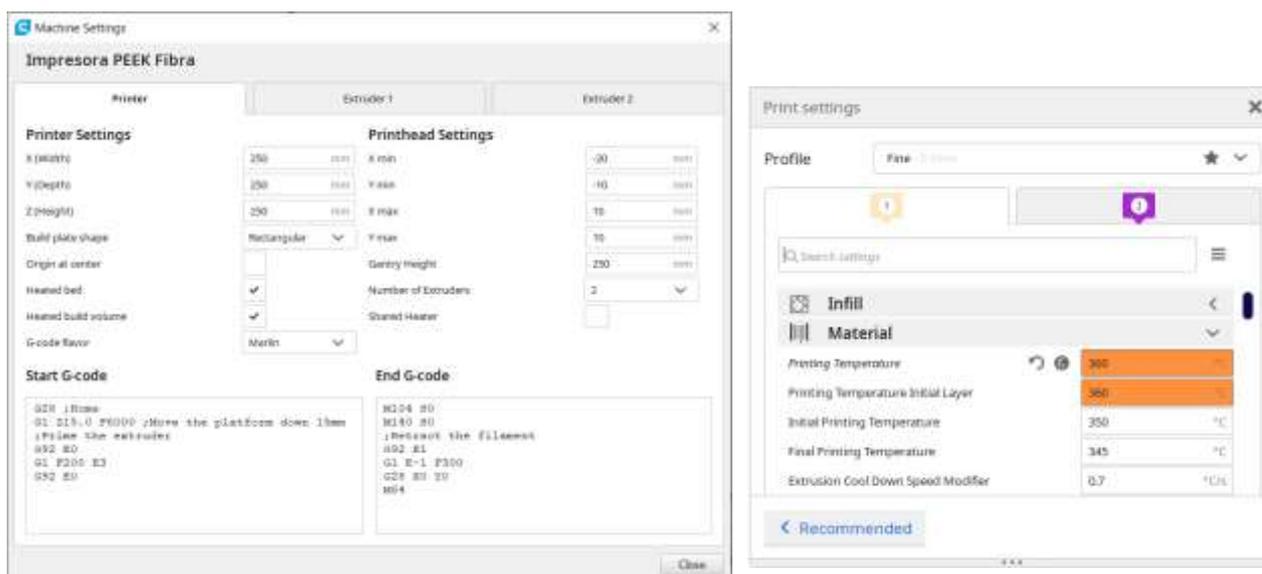


Ilustración 50: creación de impresora customizada en CURA.

Una vez hemos elegido esta configuración y el material PEEK del software podemos disponer las tres piezas en la plataforma de la impresora. Debido al pequeño tamaño de las piezas, se han dispuesto en una misma bandeja, separadas cierta distancia para asegurar su correcta impresión, teniendo en cuenta que son necesarias dos piezas “Clip” para montar correctamente el útil. Antes de la impresión, debemos asegurarnos que se cumplen todas las características requeridas para la impresión de este material, además se pondrá un relleno (“infill”) de un 40%, que es más que el valor predeterminado por el programa de 20%, y que nos ofrece una mejor resistencia y robustez para las piezas.

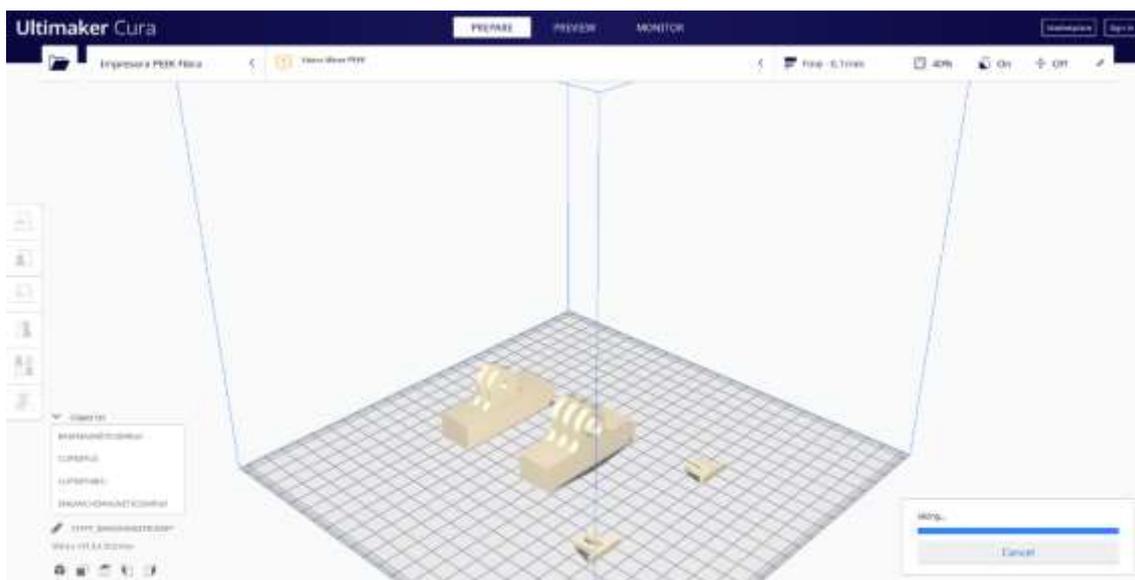


Ilustración 51: simulación de impresión de las piezas.

El software nos da los siguientes resultados tras la fabricación:

- Tiempo de impresión: 5 horas 4 minutos.
- Peso de material PEEK reforzado utilizado: 34 gramos (10,71 m).

Una vez tenemos estos datos podemos calcular el coste de producción de estas tres piezas. Para tener un coste de €/hora de la máquina, se ha escogido un precio medio de 25.000 € para una impresora no industrial de calidad alta y se ha estimado una amortización para 4 años. Para los datos de uso anual de la impresora y costes de mantenimiento, se han utilizado los datos de la impresora de la universidad Dimension SST678.

Para los costes de materiales tenemos el coste del termoplástico ThermaX PEEK GF-20 que es de 635 €/Kg [36], en cuanto al material de soporte, sabemos que para termoplásticos que trabajan a tan altas temperaturas no se puede usar los materiales típicos de soporte como el PVA o HIPS solubles, por lo tanto, usaremos el mismo material de la pieza. Es por eso que el programa nos calcula directamente todo el peso del material usado incluyendo el utilizado para soporte. El tiempo de trabajo del técnico analista se ha estimado teniendo en cuenta la preparación previa de la bandeja y el tiempo de post-procesado, en el que se tendrá que retirar todo el material de soporte y

alisar las superficies, siendo razonable un tiempo de hora y media. En la siguiente tabla se muestran todos los costes y presupuesto:

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		25,000
Coste mantenimiento anual (€)		2,500
Años de amortización		4
Amortización (h/año)		2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		4.06
Precio Hora venta-público (€/h)		4.47
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: ThermaX PEEK GF-20 (€/Kg)		635.00
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		20
PIEZAS APOYO A Y APOYO B Y CLIP		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	34.00	21.59 €
Tiempo modelo (h)	5.02	20.38 €
Tiempo técnico-analista (h)	1.50	30.00 €
Coste TOTAL (€)		71.97 €

Tabla 8: Tabla presupuesto piezas Apoyo A, Apoyo B y Clip

2.2.Presupuesto para la pieza “Unión”.

Para esta pieza realizaremos el mismo procedimiento que antes. Para este presupuesto fabricaremos la pieza con la tecnología MDF y con ABS. Al ser un material más comúnmente utilizado no es necesaria la creación de una impresora customizada en “CURA” pero sí tenemos que ver que se cumplan las condiciones de temperatura para su correcta impresión que se muestran en el Documento III: Pliegos de condiciones.

En cuanto a los ajustes de impresión vamos a utilizar un relleno del 60% ya que esta pieza de responsabilidad soportará el peso de las piezas a soldar y hay que asegurar su buena resistencia. Esto incrementará el tiempo de impresión y a su vez el coste de fabricación, pero de ello dependerá en el futuro el correcto funcionamiento del útil. De nuevo nos ayudaremos de los datos de costes para la impresora de la universidad Dimension SST768.

Para el precio del material de la pieza se ha utilizado el obtenido del catálogo de Dynamical 3D para el ABS con un coste de 29,50 €/Kg [37]. Esta vez sí se puede usar un material de soporte común como el PVA, para eso la impresora debe tener dos extrusores y así el programa nos separará la cantidad de material de soporte y de la pieza. Los resultados de la simulación en este caso son:

- Tiempo de impresión: 3 horas y 56 minutos.
- Peso del ABS utilizado: 24 gramos (3,45m).
- Peso del material soporte PVA utilizado: 2 gramos (0,22m).

DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)		25,000
Coste mantenimiento anual (€)		2,500
Años de amortización		4
Amortización (h/año)		2000
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		4.06
Precio Hora venta-público (€/h)		4.47
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: ABS (€/Kg)		29.50
Coste material soporte: PVA (€/Kg)		111.54
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		20
PIEZA UNIÓN		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	24.00	0.71 €
Soporte modelo (g)	2.00	0.22 €
Tiempo modelo (h)	3.93	15.97 €
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	10.00 €
Coste TOTAL (€)		26.90 €

Tabla 9: Presupuesto de la pieza Unión

2.3. Presupuesto total.

Ahora debemos tener en cuenta las demás piezas del útil ya fabricadas que serán adquiridas de un proveedor externo como son los tornillos, las palomillas y los imanes. Para obtener un precio de estos elementos se ha consultado la página web de RS Componentes [54] que distribuye todo tipo de productos de electrónica, mecánica y mantenimiento industrial. Para los imanes se han consultado algunos proveedores como Aiman GZ o MgSy que ofrecen precios muy distintos desde 20€ hasta 30€ por unidad. A continuación, se ha creado una tabla con los costes totales del útil cuando se utiliza una sola pieza unión:

Pieza	Cantidad	Coste unidad	Coste total
Apoyo A, Apoyo B y Clip	1	71,97 €	71,97 €
Unión	1	26,90 €	26,90 €
Palomilla M5	2	0,1574 €	0,3148 €
Tornillo Hexagonal M5x25	2	0,089 €	0,178 €
Imán neodimio N35AH	2	20 €	40 €
TOTAL			139,363 €

Tabla 10: Coste final del útil.

Por lo tanto, el coste final para nuestro útil de control con una sola pieza de unión será de 139,363 €.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1]: José López Parada, *Fabricación aditiva y transformación logística: la impresión 3D*. Mayo de 2018. Oikonomics N°9.
- [2]: Artículo pagina web de la empresa Mizar, *Tecnologías de Fabricación aditiva: Powder Bed Fusion (PBF)*. 2016. Artículo web de la empresa Mizar.
- [3]: Susana Sanchez. *Impresión 3D por estereolitografía, te explicamos todo!*. Noviembre de 2017. Artículo de la web 3D Natives.
- [4]: "Introduction to Additive Manufacturing". Mayo de 2017. LOTAR Long Term Archiving and retrieval. Murrish Boeing.
- [5]: Catálogo de la empresa *Modelbages. Útiles y utillajes*. www.modelbages.com.
- [6]: Anónimo. *Recomendaciones para un óptimo utillaje*. 2017. Artículo de Instituto Asteco. Noticias.
- [7]: Mariano Jiménez Calzado y David Fraiz Cosano. *Fabricación aditiva: principios tecnologías actuales y tendencias. Síntesis conformación por soldadura*. Asignatura de Tecnologías de fabricación. Universidad Pontificia Comillas ICAI, GITI, curso 4°.
- [8]: Pedro Amigo Carceller. Publicación del blog *Materiales y metalurgia de la soldadura, Ciclo térmico de la soldadura*, lunes 4 de mayo de 2009.
- [9]: Jorge L. Pacheco, Miguel Olmos, Ramiro Chamorro y Jimmy Unfried. *Modelado de ciclos térmicos durante la soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido en juntas disímiles de aceros inoxidable usando una aproximación teórico-experimental*. 2015. Universidad autónoma del Caribe, Grupo de Investigación en materiales y Procesos de Fabricación. Publicado en la Revista de la Facultad de Ingeniería UCV col 30 n°3.
- [10]: Dato obtenido de tabla de temperaturas de fusión de la web: www.ikastaroak.net, *DMMF04.-Materiales para la fabricación de moldes y modelos de fundición, apartado 2: Propiedades de los materiales, sección 2.1: Propiedades físicas, térmicas y eléctricas*.
- [11]: J Wendelstorf, I Decker, H Wohlfahrt, and G Simon. *Investigation of cathode spot behavior of atmospheric argon arcs by mathematical modeling*. September 1997. In G Babucke, editor, XII International Conference on Gas Discharges and their Applications, Greifswald, Germany, volume I, pages 62-65. INP.
- [12]: Prof. Dr. U. Motschmann, Prof. Dr. M. Kock, Prof. Dr. J. Mentel. *Ab initio modelling of thermal plasma gas discharges (electric arcs)*. 6 de julio 2000. Von der Gemeinsamen Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina.
- [13]: Klas Weman. Segunda edición 2012. *Welding processes handbook*, Estocolmo, Suecia. Woodhead Publishing limited.
- [14]: Rowe. R y Jeffus.L. 2008. *Gas Metal Arc Welding, classroom manual*. Cengage Learning Parainfo, S.A.

- [15]: E.J. Martínez-Conesa, M. Estrems, V.Miguel. 2010. *Desarrollo de un modelo matemático de diferencias finitas para el análisis del campo de temperaturas en la soldadura por arco de chapas finas de acero inoxidable*. Revista de Metalurgia, 46, noviembre-diciembre 2010.
- [16]: J.C.Suárez, F.Molleda, and J.M.Gomez de Salazar, *Marter. Charact.* 28 (1992) 3-13.
- [17]: N.T. Nguyen, Y.W. Mai, S. Simpson, A.Ohta. *Weld. J.* 83 (2004) 82-93.
- [18]: J. Marulanda Arevalo, V.M. Burbano, J.A. Peláez. *Análisis de soldabilidad de aceros inoxidables con aceros de medio y bajo carbono por SMAW*. Julio-Diciembre 2013. Facultad de ingeniería, vol.22, núm 35.
- [19]: Anónimo. Artículo: *Soldadura de aceros de carbón medios/altos y aceros especiales*. Centro educacional, www.kobelco-welding.jp.
- [20]: E. Frías Valero. *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. 2004. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Eléctrica UPC.
- [21]: Joseph W.Giachino, William Weeks. *Técnica y práctica de la soldadura*.2007. Western Michigan University, Kalamazoo, Michigan. Editorial Reverté.
- [22]: Welding fixtures, Markforged. Página web www.markforged.com.
- [23]: Lucía C. *El filamento de ABS en la impresión 3D*. 2019. Artículo de la página web 3D Natives.
- [24]: Alicia M. *El plástico de policarbonato en la impresión 3D*. 2020. Artículo de la página web 3D Natives.
- [25]: Anónimo. *¿Qué es el ASA en la impresión 3D?*. 2018. Artículo de la página web filament2print.
- [26]: Alicia M. *¿Qué características tiene el nylon en la impresión 3D?*. 2020. Artículo de la página web 3D Natives.
- [27]: Hoja técnica del Inconel (IN718) obtenido del catálogo de *Materialise*. Consultar en la página web www.materialise.com.
- [28]: Susana Sánchez Restrepo. *Guía completa: plásticos en la impresión 3D*. 2020. Artículo de la página web 3D Natives.
- [29]: Lucía C. *Materiales 3D: PEEK, ULTEM y otros polímeros termoplásticos avanzados*. 2019. Artículo de la página web 3D Natives.
- [30]: Información del catálogo de los materiales de la empresa Envisiontec, consultado en www.envisiontec.com.
- [31]: Información del catálogo de los materiales de la empresa Stratasys, consultado en www.stratasys.com.

-
- [32]: Información del catálogo de los materiales de la empresa EOS, consultado en www.eos.materialdatacenter.com.
- [33]: Información del catálogo de los materiales de la empresa Ensinger, consultado en www.ensingerplastics.com.
- [34]: Información del catálogo de los materiales de la empresa Markforged, consultado en www.markforged.com.
- [35]: Información del catálogo de los materiales de la empresa Materialise, consultado en www.materialise.com.
- [36]: Información del catálogo de los materiales de la empresa 3DXTech, consultado en www.3dxtech.com.
- [37]: Información del catálogo de los materiales de la empresa Dynamical 3D, consultado en www.dynamical3d.com.
- [38]: Anónimo. *HDT Temperatura de deflexión del calor. Laborarotio, Análisis Térmicas*. Artículo obtenido de la página web www.mexpolimeros.com.
- [39]: *ISO 75-1. Plastics: Determination of temperatura of deflection under load. Part 1: General test method..* International Standard. ISO 75-1:2004(E). Second edition 2004.
- [40]: Materialise OnSite, plataforma de servicio online de impresión 3D: www.onsite.materialise.com.
- [41]: Tienda online de materiales de impresión 3D: www.jpson.com.
- [42]: Tienda online de materiales de impresión 3D: www.store.cati.com *computer aided technology store*.
- [43]: Tienda online de materiales de impresión 3D: www.filament2print.com.
- [44]: Catálogo de impresoras 3D Tractus 3D: www.tractus3d.com.
- [45]: Ludivine Cherdo. *PEEK 3D printer 2020: best 3D printers for PEEK and PEI (ULTEM)*. Julio de 2020. Artículo de www.aniwaa.com.
- [46]: Lucía C. *El filamento de ABS en la impresión 3D*. 2019. Artículo de la página web 3D Natives.
- [47]: Catálogo de impresoras 3D de la tienda online RoboSavvy. Dynamical Tools 600+. www.robosavvy.com.
- [48]: Catálogo de impresoras 3D de la tienda online Intech3D. Ultimaker 2+. www.intech3d.es.
- [49]: Anónimo. Qué impresora 3D comprar: factores a tener en cuenta, recursos para la impresión 3D y modelos destacados. 2019. Artículo de la web Xataka, www.xataka.com.
- [50]: Catálogo de impresoras PolyJet de Stratasys. Stratasys F120. www.stratasys.com.
-

[51]: Lucía C. *Las diferentes impresoras 3D SLS del mercado*. 2018. Artículo de la web 3D Natives.

[52]: Página web de la ONU. *Objetivos de desarrollo sostenible, 17 objetivos para transformar nuestro mundo*. www.un.org.

[53]: Isabel Pérez Valencia. *Querétaro es sede del primer consorcio de manufactura aditiva en Latinoamérica*. 2018. Agencia Informativa Conacyt. Artículo de Cienciamx, www.cienciamx.com.

[54]: Catálogo de la tienda online de RS Componentes. www.rs-online.com.

[55]: Catálogo de útiles de control de soldadura BuildPro™. *BuildPro™ Modular welding tables*. 2014 Metric catalog.

[56]: Catálogo de útiles de sujeción BESSEY®. *BESSEY® Clamping and Cuting Technology. Complete catalogue 2020/2021*.

[57]: Tienda online de Hare & Forbes Machinery House. *Welding Clamps and Fixtures*. www.machineryhouse.com.au.