

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Diseño y Fabricación de Útiles de Enmascarado para Procesos de Granallado



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Autor: Kevin Medina Hermida

Tutor: Ignacio Puertas Arbizu

Pamplona, Junio 2018



## *Agradecimientos*

Este proyecto que aquí se presenta, no hubiese sido posible sin la ayuda y el apoyo de mucha gente. Por ello, me gustaría dedicar y agradecer a todos ellos este momento.

A Iñaki, mi tutor, ya que sin él y su confianza en la realización de este proyecto, todo hubiese sido muy diferente. Gracias por ayudarme en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado y disculparme por los trastornos que te haya podido ocasionar.

Este es el fin de un camino que se iniciaba en el año 2012, lleno de entusiasmo, con momentos alegres y no tan alegres, pero sobre todo con ganas de aprender. En aquel entonces, no me esperaba que este viaje fuera tan fructífero. Gracias a todos los profesores que a lo largo de estos 6 años me han enseñado, no solo lo que es la ingeniería, sino una forma diferente de entender la ciencia. Iñaki, Jesús, Alain, Javier, Antonio, son algunos de los nombres que han forjado a este ingeniero.

A mis amigos, los que me han acompañado en las diferentes etapas de estos 6 años, con los que he vivido buenos momentos, muchas risas y alegrías y han sido un pilar vital en esta etapa. A Guillermo, Ramiro, Pablo, Adrián, Euken, Miguel. A mis compañeros de clase, que han estado siempre presentes para echarme una mano en los momentos más complicados y con los que he disfrutado de clases, prácticas y exámenes. A Fermín, Iban, Javier, Adur, Aitor, Eneko, Koldo, Mikel, Santos, Sergio, por los buenos momentos que hacían las clases más amenas.

Pero, sobre todo, quiero dar las gracias a los que han hecho posible que empezara la universidad y me embarcara en el camino de ser ingeniero, mi familia. Nada de esto hubiese sido posible sin su apoyo incondicional. A mi hermano Ander, por ayudarme en todo lo que le ha sido posible. A mi padre Avelino, por sus sabios consejos y a mi madre M<sup>a</sup> Carmen, por trasmitirme toda su sabiduría y ser una motivación para continuar levantándome después de cada caída. Gracias por confiar en mi. Gracias por enseñarme a no mirar las dificultades como un imposible, sino como una oportunidad de mejorar y crecer.

A todo aquel que ha forjado una parte de mí,

Gracias.

Kevin

*“Entre las dificultades se esconde la oportunidad”*

Albert Einstein



## *Resumen*

El trabajo de fin de grado que a continuación se presenta, tiene como objetivo diseñar y fabricar un útil de enmascarada con materiales termoplásticos por medio de impresión 3D, como solución alternativa al método actual utilizado, siempre y cuando el resultado planteado tenga un efectividad igual o superior.

Este tipo de proyecto surge tras realizar un seguimiento del método actual que sigue la empresa para enmascarar y proteger las piezas del proceso de granallado y comprobar, que se requiere una inversión de tiempo muy elevada en llevar a cabo esta operación, a parte de otros factores.

Para efectuar el estudio, se seleccionarán distintos materiales termoplásticos aptos para su uso en la impresión 3D, para luego ponerlos a prueba bajo los efectos abrasivos de la granalla y elegir el más óptimo, para posteriormente fabricar un útil de enmascarada que se adapte perfectamente a la pieza a proteger.

Durante el proceso de desarrollo del trabajo, se va a emplear dos impresoras 3D, que utilizan la tecnología FFF (Fabricación por Filamento Fundido) para fabricar, tanto las plantillas, como los útiles de enmascarado y los ensayos se van a realizar en las dos máquinas de granallado disponibles en la empresa.

## *Abstract*

The final degree project which is here presented deals with both the design and the manufacturing of a masking tool made of thermoplastic polymeric materials by means of 3D-printing, as an alternative solution to the current method used by the company, as long as the final result obtained has an equal or superior effectiveness.

This present project emerges after having observed the current method employed by the company to mask and to protect the parts from the shot-peening process. Furthermore, it has been observed that the current method requires a great deal of time in order to carry out this protection operation.

To carry out the study, different thermoplastic polymers which are suitable to be used in 3D-printing will then be selected to be tested under the abrasive effects of the shot-peening process so that the most appropriate one is selected. Subsequently, a masking tool that perfectly adapts to the part to protect will be manufactured.

During the development of this present study, two 3D-printers that use the FFF (Fused Filament Fabrication) technology will be used in order to manufacture both the templates and the masking tools. In addition, the shot-peening tests will be performed with the two shot-peening machines which are available at the company.





## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	- 11 -
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	- 13 -
<b>I. Introducción y Objetivos.</b> .....	- 15 -
1.1    Objetivos.....	- 15 -
1.2    Justificación .....	- 15 -
1.3    Antecedentes.....	- 16 -
1.4    Alcance .....	- 16 -
1.5    Programas y abreviaturas.....	- 17 -
1.5.1    Programas .....	- 17 -
1.5.2    Abreviaturas.....	- 17 -
<b>II. Planteamiento de la problemática a resolver</b> .....	- 19 -
2.1    Proceso de Granallado .....	- 19 -
2.1.1    Introducción .....	- 19 -
2.1.2    Cobertura .....	- 20 -
2.1.3    Intensidad Almen y saturación.....	- 21 -
2.1.4    El perdigón.....	- 23 -
2.2    Máquina de granallado .....	- 24 -
2.2.1    Introducción .....	- 24 -
2.2.2    Máquina: partes.....	- 25 -
2.3    Descripción de la problemática actual.....	- 32 -
2.4    Propuesta de nuevas soluciones.....	- 33 -
2.4.1    Síntesis de las propuestas.....	- 36 -
<b>III. Adopción de la solución final: Fabricación de utillajes de enmascarado</b> .....	- 37 -
3.1    Tipos de impresión .....	- 39 -
3.1.1    Fabricación con Filamento Fundido (FFF) .....	- 39 -
3.1.2    Estereolitografía (SLA) .....	- 40 -
3.1.3    Sinterización Selectiva Láser (SLS).....	- 41 -
3.1.4    Fotopolímero PolyJet .....	- 41 -
3.1.5    Extrusión de Jeringa (Syringe Extrusion.).....	- 42 -
3.1.6    Fabricación de Objetos Laminados .....	- 42 -
3.1.7    Impresión con Hielo .....	- 42 -



3.2	Impresoras empleadas.....	- 44 -
3.2.1	BQ WitBox 2 .....	- 44 -
3.2.2	BCN3D Sigma .....	- 45 -
3.3	Selección del material a ensayar.....	- 48 -
3.3.1	Clasificación de los materiales.....	- 48 -
3.4	Polímeros .....	- 49 -
3.5	Materiales Termoplásticos.....	- 51 -
3.5.1	PLA (Ácido Poliláctico) .....	- 51 -
3.5.2	ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) .....	- 54 -
3.5.3	Filaflex.....	- 56 -
3.5.4	Nylon (Poliamida).....	- 60 -
3.5.5	HIPS (Poliestireno de Alto Impacto).....	- 61 -
3.5.6	XT (Copolíester) .....	- 63 -
3.6	Diseño de las plantillas .....	- 65 -
3.6.1	Herramientas de trabajo.....	- 66 -
3.6.2	Plano.....	- 68 -
3.6.3	Tipos de dureza .....	- 68 -
3.7	Ensayos preliminares .....	- 72 -
3.7.1	Ensayo 1 .....	- 72 -
3.7.2	Ensayo 2 .....	- 77 -
3.7.3	Ensayo 3 .....	- 83 -
3.8	Elección final del material.....	- 85 -
3.9	Pieza a enmascarar.....	- 92 -
3.9.1	Proceso de fabricación.....	- 93 -
3.10	Diseño y fabricación del útil de enmascarado .....	- 96 -
3.10.1	Diseño.....	- 96 -
3.10.2	Fabricación .....	- 98 -
3.11	Ensayo finales y discusión de los resultados .....	- 100 -
3.11.1	Ensayos.....	- 101 -
3.11.2	Análisis general.....	- 102 -
<b>IV.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>- 105 -</b>

<b>V. Bibliografía</b> .....	- 108 -
5.1 Referencias .....	- 108 -
5.1.1 Disposiciones legales .....	- 111 -
<b>Anexo</b> .....	- 113 -
1. Planos.....	- 113 -

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Estado tensional con y sin carga respectivamente. ....	- 19 -
Figura 2. Impedimento a la propagación de grietas.....	- 20 -
Figura 3. Cráter de un único impacto. ....	- 20 -
Figura 4. Cobertura 100% de la pieza. ....	- 21 -
Figura 5. Porta probetas Almen.....	- 22 -
Figura 6. Reloj comparador con cala.....	- 22 -
Figura 7. Perdigón esférico para aviación. ....	- 24 -
Figura 8. Máquina de granallado. ....	- 25 -
Figura 9. Circuito de recirculación del perdigón.....	- 26 -
Figura 10. Ciclón. ....	- 26 -
Figura 11. Grupo de tamices.....	- 27 -
Figura 12. Zona tratamiento y "overspray". ....	- 30 -
Figura 13. Bastidor. ....	- 30 -
Figura 14. Manipulador. ....	- 31 -
Figura 15. Pieza con elementos de protección. ....	- 32 -
Figura 16. Plantillas con base de aluminio. ....	- 34 -
Figura 17. Fabricación por filamento fundido.....	- 39 -
Figura 18. Tecnología SLA. ....	- 40 -
Figura 19. Sinterización Selectiva Láser. ....	- 41 -
Figura 20. Impresora con extrusor de jeringa.....	- 42 -
Figura 21. BQ Witbox2. ....	- 44 -
Figura 22. Impresora BCN3D Sigma. ....	- 46 -
Figura 23. Ejemplo de impresión 3D con filamento de PLA. ....	- 51 -
Figura 24. Filamento de ABS y piezas en 3D del mismo material. ....	- 54 -
Figura 25. Zapatillas de impresión 3D con filamento Filaflex.....	- 56 -

Figura 26. Muestra de la flexibilidad del Ninjaflex.....	58 -
Figura 27. Zapatos de Nylon obtenidos por impresión 3D.....	61 -
Figura 28. Ejemplo del uso del D-Limoneno sobre el HIPS. ....	62 -
Figura 29. Granulado de XT para la posterior fabricación en botellas.....	64 -
Figura 30. Autodesk Mechanical Desktop. ....	66 -
Figura 31. Instrumento para realizar el método Shore. ....	70 -
Figura 32. Ensayo dinámico de dureza por rebote. ....	70 -
Figura 33. Medidores Shore "In Situ". ....	71 -
Figura 34. Probeta y plantillas listas para el primer ensayo. ....	73 -
Figura 35. Plantilla de PLA antes y después del ensayo respectivamente. ....	74 -
Figura 36. Plantilla de Filaflex antes y después del ensayo respectivamente ....	75 -
Figura 37. Plantilla de ABS antes y después del ensayo respectivamente. ....	76 -
Figura 38. Estado de la probeta una vez finalizado el ensayo 1. ....	76 -
Figura 39. Probeta junto a las cinco plantillas.....	78 -
Figura 40. Placa-probeta doblada por los continuos ensayos.....	79 -
Figura 41. Plantilla de PLA + Filaflex después del ensayo.....	80 -
Figura 42. Plantilla de ABS después del ensayo. ....	80 -
Figura 43. Plantilla de Nylon después del ensayo.....	81 -
Figura 44. Plantilla de HIPS después del ensayo. ....	82 -
Figura 45. Plantilla del XT después del ensayo.....	82 -
Figura 46. Aspecto de la placa-probeta después del segundo ensayo. ....	83 -
Figura 47. Plantillas y probetas listas para el tercer ensayo. ....	84 -
Figura 48. Plantilla de XT después del ensayo.....	86 -
Figura 49. Plantilla de Nylon después del ensayo. ....	86 -
Figura 50. Plantilla HIPS con supuesta deformación.....	87 -
Figura 51. Plantilla HIPS sin deformación alguna después del ensayo.....	88 -
Figura 52. Plantilla de ABS después del ensayo. ....	89 -
Figura 53. Plantilla de PLA + Filaflex una vez finalizado el ensayo. ....	89 -
Figura 54. Aspecto de la placa-probeta al final del tercer ensayo. ....	90 -
Figura 55. Pieza para la que se va a fabricar el útil de enmascarado. ....	92 -
Figura 56. Pieza con la zona detallada a proteger. ....	93 -
Figura 57. Detalle del anclaje en forma de cilindro junto al útil inferior. ....	97 -
Figura 58. Detalle del enganche rápido en forma de “click” junto al útil inferior. ....	98 -



Figura 59. Útil inferior y superior de la pieza respectivamente. ....	- 99 -
Figura 60. Útiles inferiores de "click" y cilindro (izquierda) y útil superior de fijación (derecha). ....	- 100 -
Figura 61. Pieza y útil con sus elementos de fijación. ....	- 101 -
Figura 62. Piezas junto a sus útiles ya tratadas. ....	- 102 -

## ***ÍNDICE DE TABLAS***

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del PLA [23]. ....	- 52 -
Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas del ABS [25]. ....	- 55 -
Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas del Filaflex [27]. ....	- 59 -
Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas del Nylon [27]. ....	- 60 -
Tabla 5. Propiedades físicas y mecánicas del HIPS [27]. ....	- 62 -
Tabla 6. Propiedades físicas y mecánicas del XT [27]. ....	- 64 -
Tabla 7. Tabla de durezas. ....	- 72 -

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN



## **Introducción**

**“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES  
DE ENMASCARADO PARA PROCESOS  
DE GRANALLADO”**

## **I. Introducción y Objetivos.**

### **1.1 Objetivos**

En el presente Trabajo Fin de Grado, se pretende solventar la problemática actual que tiene la empresa Mecanizaciones Aeronáuticas, Sociedad Anónima (en adelante conocida como M.A.S.A.) para proteger las partes de las piezas que no deben someterse al proceso de granallado (también conocido como “Shot Peening”), creando un útil de enmascarado con materiales termoplásticos que se acoplen a la morfología de la pieza, dejando al descubierto aquella superficie que, según el cliente, debe ser tratada. Con esta mejora, se pretende minimizar los costes, incrementar el proceso de producción y, en general, mejorar la calidad del proceso actual.

### **1.2 Justificación**

Actualmente, la sociedad se encuentra en un constante desarrollo, la cual, sigue creciendo a pasos agigantados. Los continuos avances tecnológicos y la implantación de nueva maquinaria dentro de una empresa, facilitan las labores de fabricación, lo que conlleva a un incremento del proceso productivo. Por ello, es muy importante adaptarse a las nuevas tecnologías y analizar hasta donde puede llegar su campo de actuación.

Hasta el día de hoy, el método utilizado para proteger las piezas se basa en colocar cinta americana en aquellas superficies donde la granalla no debe intervenir, dejando al descubierto las zonas a tratar, tal y como indica el cliente. Este proceso de enmascarado es muy costoso, en cuanto a tiempo se refiere, lo que se traduce en una alta intervención de mano de obra. Debido a esto, se ha planteado la idea de encontrar una posible solución a través del proceso de impresión 3D. Aunque el mundo de la impresión 3D aún es muy joven y resulta muy complicado encontrar impresoras capaces de fabricar útiles de enmascarado de gran tamaño, se quiere ensayar en piezas pequeñas, creando un útil de enmascarado capaz de acoplarse a la superficie de la pieza, cubriendo aquellas zonas que no se han de tratar. Este sistema facilitaría las labores del operario, con la idea de que en un futuro se pueda aplicar en el resto de piezas.

Otra de las justificaciones para realizar dicho proyecto, es el ahorro económico que esto supondría. Un solo útil de enmascarado tendría un uso ilimitado de veces y además eliminaría la necesidad de recurrir a una subcontrata para realizar la labor de enmascarar de ciertas piezas, como sucede actualmente.



### 1.3 Antecedentes

Hasta ahora se ha tendido a enmascarar las piezas con cinta americana, dejando al descubierto las zonas que requieren el tratamiento. Esto implica una inversión de tiempo muy elevada, ya que en algunas piezas puede durar hasta 45 min la retirada de la cinta de enmascarado, debido a la degradación que sufre con los impactos del perdigón.

Respecto a la homogeneidad del proceso mientras se han realizado las prácticas extracurriculares, el autor de este Trabajo Fin de Grado, desarrollaba un estudio paralelo para plantear una posible solución a este problema, que consiga reducir el sobre coste de mano de obra que conlleva este proceso y, por consiguiente, un ahorro económico, siempre y cuando la solución aportada tenga una efectividad igual o superior al proceso actual.

### 1.4 Alcance

En este trabajo, se pretende diseñar y fabricar un nuevo útil de enmascarado que mejore el que actualmente se está haciendo uso en M.A.S.A., dado que el sobre coste actual a la hora de realizar el proceso en enmascarado y desenmascarado es muy elevado. A continuación, se detallarán los puntos que se han ido abordando a lo largo de todo el proyecto:

- Búsqueda de los posibles materiales termoplásticos aptos para este proyecto.
- Fabricación de las plantillas mediante impresión 3D de los diferentes materiales elegidos.
- Ensayos previos con los que verificar que material cumple mejor las condiciones predeterminadas.
- Diseño y posterior fabricación del útil de enmascarado.
- Ensayo y conclusiones finales.

Se ha de aclarar que la solución final aportada para este proyecto se ha llevado a cabo en base al ensayo-error realizado y no está sujeta a demostración, ni explicación teórica alguna.



## 1.5 Programas y abreviaturas

### 1.5.1 Programas

**Cura:** Es un programa “Open Source” desarrollado por Ultimaker, para realizar el corte de las piezas 3D en capas (slicer), generando el código para que nuestras impresoras lo comprendan, permitiendo convertir los archivos STL que contienen nuestro diseño 3D, en piezas físicas.

**SolidWorks:** es un software CAD (diseño asistido por ordenador) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción.

En concreto, con la ayuda del Solidworks, se han generado los planos tanto de las probetas como de los útiles de enmascarado finales.

**Catia V5:** Es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador comercial por Dassault Systèmes. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo, desde la concepción del diseño, hasta la producción y el análisis de productos.

**Mechanical Desktop:** viene detallado en el apartado 10.1. “Herramientas de trabajo”.

### 1.5.2 Abreviaturas

- mm: milímetros
- kg: kilogramos
- s: segundos
- m: metros
- Pa: Pascal
- N: Newton
- g: gramos
- cm: centímetros
- GPa: Gigapascales
- MPa: Megapascales
- °C: Grados centígrados
- µm: micrómetros

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN



## **Memoria I**

**“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES  
DE ENMASCARADO PARA PROCESOS  
DE GRANALLADO”**

## II. Planteamiento de la problemática a resolver

### 2.1 Proceso de Granallado

#### 2.1.1 Introducción

El proceso de granallado [1], también conocido como “Shot Peening”, se usa para aumentar la vida a fatiga de las piezas, sobre todo de las destinadas a aviación. Se trata de un proceso caro, que requiere de un estudio previo de grietas en la superficie del material, porque el proceso de granallado hace que las grietas sean indetectables. Lo que se consigue con este proceso es un incremento de la resistencia de las piezas con una sección mucho menor de lo que sería para una pieza sin este tratamiento.

Este último, se consigue haciendo impactar los perdigones a alta velocidad sobre el material, creando una capa tensiones residuales de compresión, como se expone en la Figura 1. En la primera de ellas, no hay tensión aplicada de tracción en la fibra superior, mientras que, en la segunda, sí, lo que hace disminuir la tensión resultante sobre el material y permitir muchos más ciclos de carga.

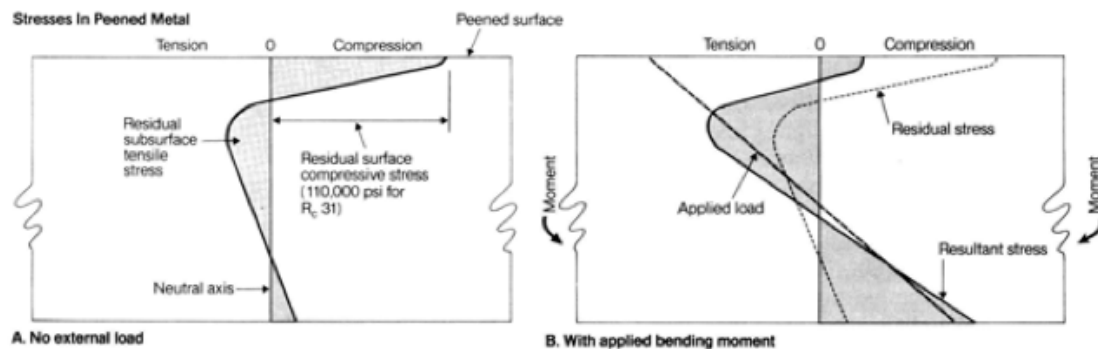


Figura 1. Estado tensional con y sin carga respectivamente.

Como se puede apreciar, la resultante es mucho menor en la superficie de la pieza, por lo que se tendrá una menor probabilidad de que se produzcan las primeras grietas por fatiga. Además, tiene un efecto colateral positivo, ya que esas piezas en reposo hacen mucho más difícil, una vez creada la grieta, que se propague llegando hasta el punto de rotura del material como se presenta en la Figura 2.

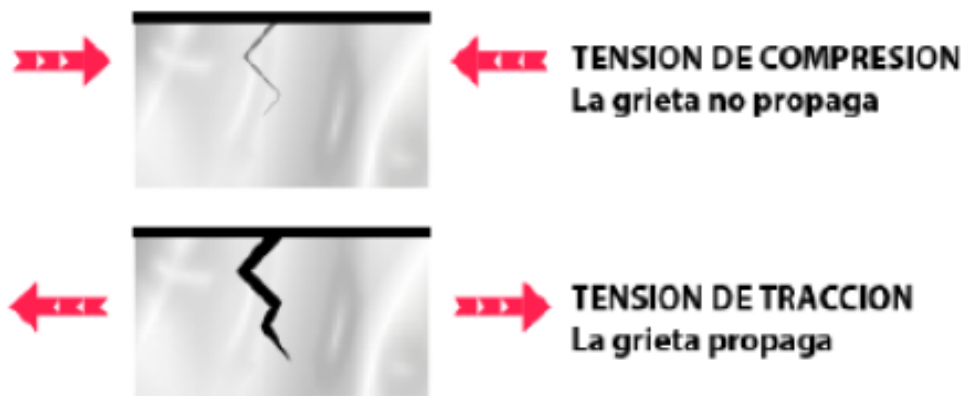


Figura 2. Impedimento a la propagación de grietas.

Una vez se conocen los fundamentos en los que se basa el proceso de granallado se procede a explicar como se consigue dicho efecto y los factores que se deben controlar para que el tratamiento sea repetitivo y se puedan establecer unos criterios de calidad.

### 2.1.2 Cobertura

Aunque hay distintas formas de proporcionar energía al perdigón para crear el efecto deseado, todas ellas se basan en lo mismo; perdigón de acero que impacta contra la superficie del material. Pero no por cumplir este criterio, se puede decir que se controla el proceso. El perdigón impacta contra el material, dejando un cráter en éste que depende de la velocidad del perdigón, del tamaño y de la dureza superficial de ambos materiales. Para conseguir un efecto homogéneo en la superficie a tratar, los distintos cráteres dejados por los impactos se deben superponer unos con otros, no dejando ningún hueco entre ellos como se expone en las Figuras 3 y 4.

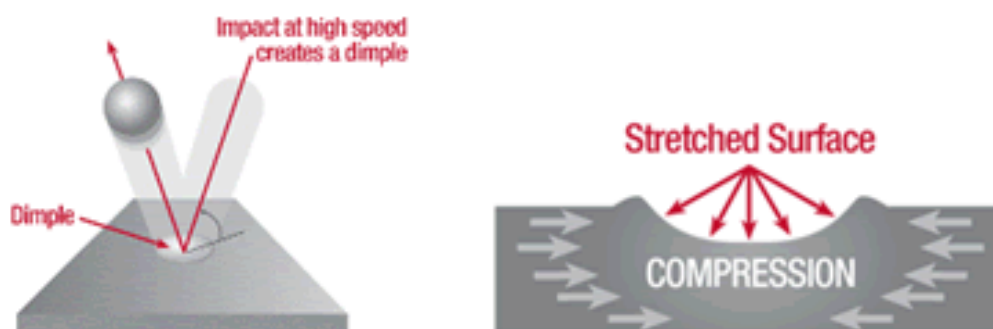


Figura 3. Cráter de un único impacto.



*Figura 4. Cobertura 100% de la pieza.*

Mediante las Figuras 3 y 4, más el anterior párrafo, queda definido el concepto de cobertura. En todas las piezas a tratar se debe conseguir un 100% de cobertura, de lo contrario, la pieza deberá ser reprocesada, con la consiguiente pérdida económica para la empresa.

Una vez se ha conseguido una pieza con el 100% de cobertura, no se está seguro de si el tratamiento corresponde con las exigencias del cliente, por lo que se necesita algún parámetro más para poder controlar el proceso. En el siguiente apartado entran en juego dos conceptos nuevos, Intensidad Almen y saturación.

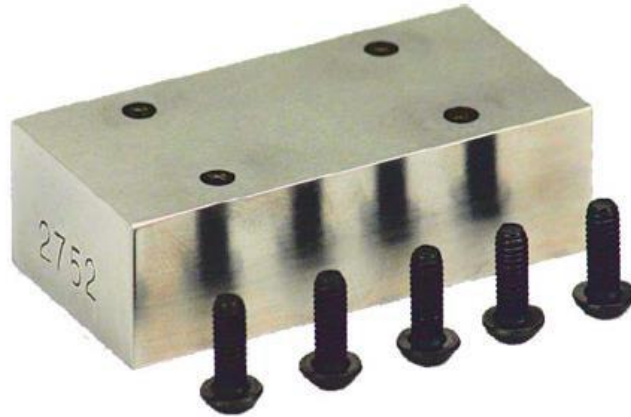
### 2.1.3 Intensidad Almen y saturación

Para comprobar la energía que se ha aplicado a la pieza solo hay un método a seguir, el de Intensidad Almen. Este método se basa en la curvatura que se produce debido a las tensiones residuales en una placa plana de acero de unas dimensiones y dureza superficial determinadas, que viene dadas por la norma SAE J442 [2]. Se agrupan en tres tipos:

- Almen A de espesor igual a 1,295 mm y dureza 44 – 50 HRc
- Almen N de espesor igual a 0,81 mm y dureza 72,5 – 76 HRc
- Almen C de espesor igual a 2,41 mm y dureza 44 – 50 HRc

Los tres tipos comparten la misma dimensión tanto en anchura como en longitud y siempre es 76,098 mm x 18,987 mm.

Para procesos de perdigoneado con bola de acero, como al que está destinado este proyecto, se suele utilizar el tipo de probetas Almen A. Una vez está elegida el tipo de probeta Almen, se debe colocar en un porta probetas que también se rige por la norma SAE J442, cuya dureza estipula la norma y debe ser HRc 58. A continuación, se incluye la figura 5, que muestra un porta probetas Almen.



*Figura 5. Porta probetas Almen*

Este porta probetas deberá mantener condiciones de planitud mientras esté en uso, de lo contrario se desechará por uno nuevo.

Como apunte, hay que aclarar que las probetas Almen tienen unos rangos de planitud en términos de tolerancias, por lo tanto, suelen venir de fábrica con deformaciones iniciales, las cuales habrá que descontar cuando se haga el estudio de Intensidad Almen. Para realizarlo se actuará de la siguiente forma:

- Se pondrá el reloj a cero con la cala destinada a ello (ver Figura 6):



*Figura 6. Reloj comparador con cala*

- Posteriormente, se situará la placa Almen en el reloj para conocer su deformación inicial (siempre viene serigrafiado, pero se debe comprobar), que se llamará prearco.
- Se coloca la probeta en el porta probetas y se le da el tratamiento por granallado.
- Se saca del porta probetas y se vuelve a medir, lo que da el arco final con deformación.
- Se resta el arco final con deformación al prearco y, de esta forma, obtenemos el arco.

Una vez obtenido el arco, habrá que repetir el proceso doblando el tiempo del tratamiento hasta que, de una prueba a otra, el arco no exceda el 10 % del arco de la anterior prueba. En este punto, se considera que se ha alcanzado el tiempo de saturación, siendo el arco en ese tiempo la Intensidad Almen.

#### 2.1.4 El perdigón

El perdigón usado en el proceso de granallado, puede ser de diferentes tamaños y dos tipos de procedencia. El utilizado en aviación es esférico y este se consigue mediante chorros de agua a través del acero fundido, que posteriormente se selecciona en tamaños específicos según las diferentes normativas. La razón de ser esférico, es que al tratar normalmente piezas de aluminio, pueden crearse inclusiones no deseadas de material y producir corrosión galvánica, lo que conllevaría a producirse grietas, que es lo que se pretende evitar con este proceso. El otro tipo de procedencia es de cable cortado, aunque también existen otros materiales como, bolas cerámicas, de vidrio, incluso de resina. La finalidad de estas últimas, es remover capas de óxido o pintura, sobre todo las resinas, ya que no dañan el material y tienen una eficiencia superior a la hora de retirar capas superficiales.

Para el perdigón usado en aviación existe una sola norma a seguir, la AMS 2431 [3], que tipifica los tamaños de perdigón usados y sus correspondientes tamices. En concreto, en M.A.S.A., se utiliza el perdigón denominado ASR 230, que tienen un diámetro de 6 mm y una dureza de 42 a 52 HRc, el cual se ha empleado para desarrollar este proyecto. Esta norma también tipifica los tamices usados ya que, como se explicará más adelante, las máquinas de granallado deben reciclar el perdigón y seleccionarlo. Además, el procedimiento MASA 205 establece que cada ocho horas de uso de la máquina se debe recoger una muestra de perdigón y realizar un análisis de forma y tamaño en otro grupo de tamices.

A continuación, se mostrará la Figura 7, donde se puede apreciar con claridad el aspecto visual que tiene los perdigones empleados:



*Figura 7. Perdigón esférico para aviación.*

## 2.2 Máquina de granallado

### 2.2.1 Introducción

Pese a la variedad actual de maquinaria para procesos de granallado, en cuanto a formas de dar energía cinética al perdigón, sólo hay dos tipos:

- **Máquina por turbina:** En este tipo de máquinas el perdigón se ve impulsado por una turbina. Es apta para perdigonear grandes superficies y que no requiera una gran precisión en cuanto a intensidad y saturación.
- **Máquina por Venturi:** Mediante una tolva presurizada y por gravedad se hace avanzar al perdigón que llega a una válvula en “Y”, donde se junta una manguera de aire comprimido y el perdigón. Por efecto Venturi, el perdigón es impulsado por la manguera hasta llegar a la boquilla.



Actualmente, en M.A.S.A., disponen de dos máquinas de granallado automático por efecto Venturi. Este tipo de máquinas, a diferencia de las de por turbina, permiten una repetitividad en el proceso consiguiendo un mejor control de la energía de los perdigones.

Como es de suponer, el desarrollo de este proyecto se ha llevado a cabo con estas dos máquinas propias de la empresa. En la Figura 8 se puede observar la máquina usada en estas instalaciones.



*Figura 8. Máquina de granallado.*

### 2.2.2 Máquina: partes

La maquinaria utilizada actualmente en M.A.S.A. se puede dividir en dos partes diferenciadas [4]. Una parte está dedicada al desplazamiento de la pieza a tratar y a los manipuladores donde van instaladas las boquillas. Mientras que la otra está destinada al tratamiento del perdigón, el cual como se ha explicado, debe tener un tamaño y una forma determinadas para poder realizar el proceso. A continuación, se van a detallar todos los sistemas que recirculan el perdigón y como funcionan estos.

### 2.2.2.1 Sistema de recirculación del perdigón

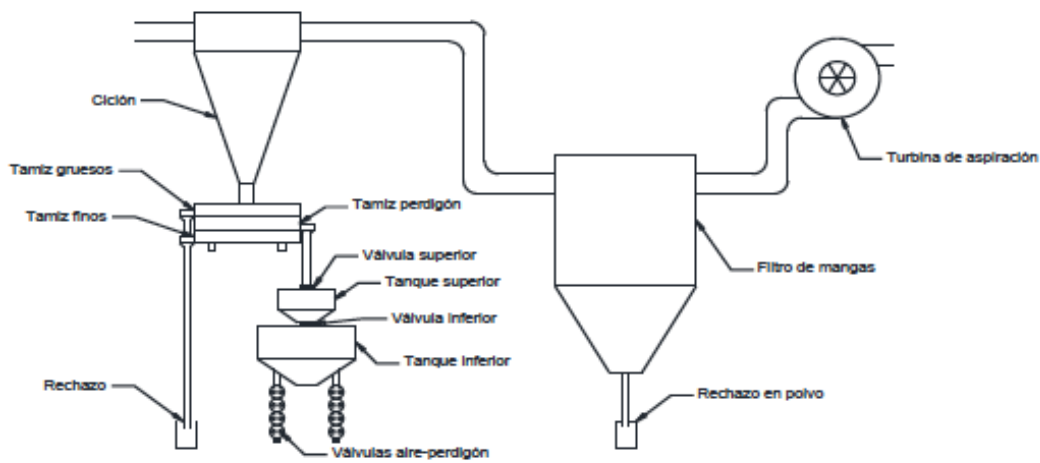


Figura 9. Circuito de recirculación del perdigón.

El perdigón es absorbido desde la máquina por unas tolvas que hay debajo de esta y, por aspiración, recorre una tubería hasta llegar a una altura aproximada de 10 m, donde entra a la parte superior del ciclón. De tal forma que, toda la succión necesaria para llevar el perdigón, se consigue mediante el último de los elementos, la turbina de aspiración, que desemboca en la salida al exterior con aire limpio (ver Figura 9).

#### ➤ Ciclón

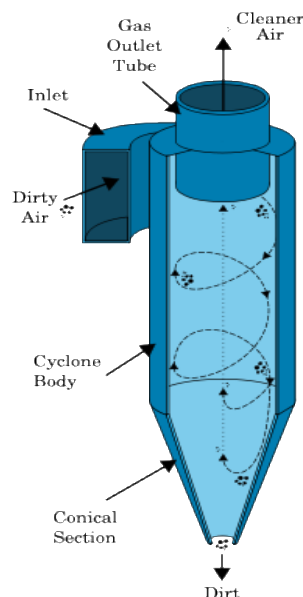


Figura 10. Ciclón.

Como se aprecia en la Figura 10, un ciclón actúa de la siguiente manera; se crea un vórtice del aire con las partículas en suspensión (en este caso, el perdigón) y como éstas tienen una inercia superior al aire y al polvo, chocan con la pared y van recorriendo dicho ciclón por el cono hasta caer por la parte inferior. De este modo, el perdigón que pasa está libre de polvo.

A continuación, se seguirá el flujo del perdigón en la explicación. Más tarde se volverá al tratamiento de aire y polvo que sale del ciclón.

### ➤ Tamices

En la Figura 11 se muestra un grupo de tres tamices con dos mallas de separación. Como se ha expuesto anteriormente, el tamaño de los perdigones y su forma deben ser precisos. Para conseguir esto, se instalan dos mallas, la primera se dedica a dejar pasar todo lo que sea de diámetro inferior a 0,6 mm, por lo tanto, el perdigón deformado irá directamente al rechazado. En la segunda malla no se deja pasar todo lo superior a 0,6 mm de diámetro, por lo que el perdigón que sale por el lateral del tamiz número 2, es el apto para volver a utilizarlo en el proceso de granallado.



*Figura 11. Grupo de tamices.*

Para conseguir que el proceso sea lo suficientemente rápido y no se acumule perdigón en un solo punto del tamiz, pudiendo deformarlo y perder con ello la funcionalidad óptima de este, se le insertan unos resortes en la base y un motor con excentricidad para que vibre, haciendo que el perdigón vaya describiendo un movimiento en espiral por el tamiz. A continuación, se expone una imagen de un tamiz de una sola malla en el que se pueden observar todos estos sistemas.

El sistema también consta de una toma de aire comprimido (en la Figura 11, los tubos rojos) conectada a una vejiga para poder alzar el grupo de tamices o dejarlos bajos para realizar labores de mantenimiento. En el caso de estar en producción, siempre deberán tener la vejiga inflada para que los resortes actúen.

➤ **Válvula superior e inferior**

Estas válvulas conocidas coloquialmente como “setas”, actúan como lo harían las válvulas de admisión y escape de un motor de combustión por pistones. Su funcionamiento es coordinado para que la presión del aire en el tanque inferior no caiga en exceso, por lo tanto, cada 30 s la válvula superior se abre, dejando caer el perdigón a presión de aire atmosférico en el tanque superior y una vez han pasado esos 30 s, la válvula vuelve a cerrarse. Mientras ha ocurrido todo este proceso, la válvula inferior ha estado cerrada, dejando el tanque inferior a la presión comandada. Una vez se ha cerrado la válvula superior, se abre la inferior y deja caer el perdigón, produciendo una leve bajada de presión, para, pasados unos 20 s, volver a cerrarse y permitir así reiniciar el ciclo.

➤ **Tanque superior**

La función del tanque superior es servir de enlace y que la caída de presión dentro del tanque inferior no caiga en exceso. Para minimizar dicha caída, el tanque superior tiene una entrada de aire a 6 bar para que, en el tiempo entre el cierre de la válvula superior y la apertura de la inferior, el tanque se presurice y la caída de presión sea menor.

➤ **Tanque inferior**

El tanque inferior tiene un tamaño más espacioso con respecto al superior, esto es así porque se usa como tanque de almacenaje de perdigón y cuyo nivel se puede comprobar de dos formas. La primera, es con tres sondas metálicas colocadas a distintos niveles y, dependiendo de la continuidad eléctrica entre cada una de ellas, se pueden llegar a conocer los niveles de perdigón. Por ejemplo, situando una sonda en el nivel inferior, otra a la mitad y la tercera en el superior. Si hay continuidad eléctrica entre las dos primeras, significa que el perdigón se sitúa entre el nivel medio y superior. La otra forma, es abrir una de las trampillas para inspeccionar el tanque de forma visual, pero requiere que la máquina este parada.

Este tanque inferior tiene otra función no menos importante, sirve como distribuidor de caudal de aire entre las boquillas. Por ello, es insertada en este una manguera a 6 bares y del cual salen otras 16 mangueras a la presión comandada. Esto se consigue por un manómetro dentro del tanque que, además de regular la presión en este, también regula la de las boquillas. Por lo tanto, la presión de trabajo para las piezas no coincide con la que salen por las boquillas ya que hay pérdidas, ya sea de tipo primario o secundario. Las

primeras por la propia composición del material de las mangueras y su longitud, y las segundas producidas por los giros a las que están sometidas éstas, además de que el propio perdigón genera pérdidas en el flujo de aire comprimido.

#### ➤ **Válvulas aire-perdigón**

Estas válvulas se encargan de dos funciones, por un lado, regulan el flujo de perdigón y, por el otro, sirven como válvulas en “Y” para succionar, por efecto Venturi, dicho perdigón.

Respecto a la primera función se puede hacer de dos maneras. La primera, y la cual se utiliza actualmente en M.A.S.A., es mediante una válvula de compuerta que se abre mediante un pistón neumático que encuentra el tope en un tornillo fijado previamente, limitando así el recorrido de la apertura.

La segunda función se hace por medio de otra válvula que controla la apertura del aire comprimido. En este caso, la apertura no se puede graduar, pero también es controlada por un cilindro neumático. Una vez aire y perdigón confluyen, ambos salen por la manguera acoplada al frontal.

#### ➤ **Manguera y boquilla**

La manguera es la encargada de transportar el perdigón a presión hasta la boquilla. Para ello, se utiliza un tipo de mangueras especiales, resistentes a la abrasión, que constan de tres capas: la primera de ellas, la interior, está formada de caucho natural de 6 mm de espesor a la que sigue una capa de refuerzo formada de hilo sintético, caucho y cobre para evitar descargas electroestáticas. Como capa superficial se utiliza una de caucho sintético.

La boquilla se puede escoger de diferentes modelos. La que actualmente se usa tiene un ángulo de apertura de ocho grados, con el fin de impactar a una superficie media, produciendo un degradado en el tratamiento (denominado “overspray”) que a veces es requerido en determinadas piezas. Para el uso en la máquina por CNC (Control Numérico) se aconseja utilizar un complemento llamado lanza que puede ir sujeto a la boquilla y aplica el tratamiento a escasos milímetros de la pieza, consiguiendo contornos definidos. No obstante, la norma más estricta en cuanto a la superficie cubierta por el tratamiento deja 3 mm de margen positivo. Esto significa que, siempre que se trate la superficie

dispuesta por el cliente, se podrá tratar ese área más el margen establecido, pero nunca menos.



*Figura 12. Zona tratamiento y "overspray".*

En la Figura 12 se muestra una de las imágenes tomadas por el autor, para tener una breve noción práctica del área de actuación, cuando se usa el cono de distribución durante un tratamiento.

#### *2.2.2.2 Sistema de movimiento de piezas y boquillas*

Para que toda la pieza reciba el mismo tratamiento, esta se amarra en un bastidor que está suspendido en unos railes, avanzando por medio de un sistema de cadena-piñón a velocidad constante, hacia el interior de la cabina y retornando por la zona de entrada (ver Figura 13).

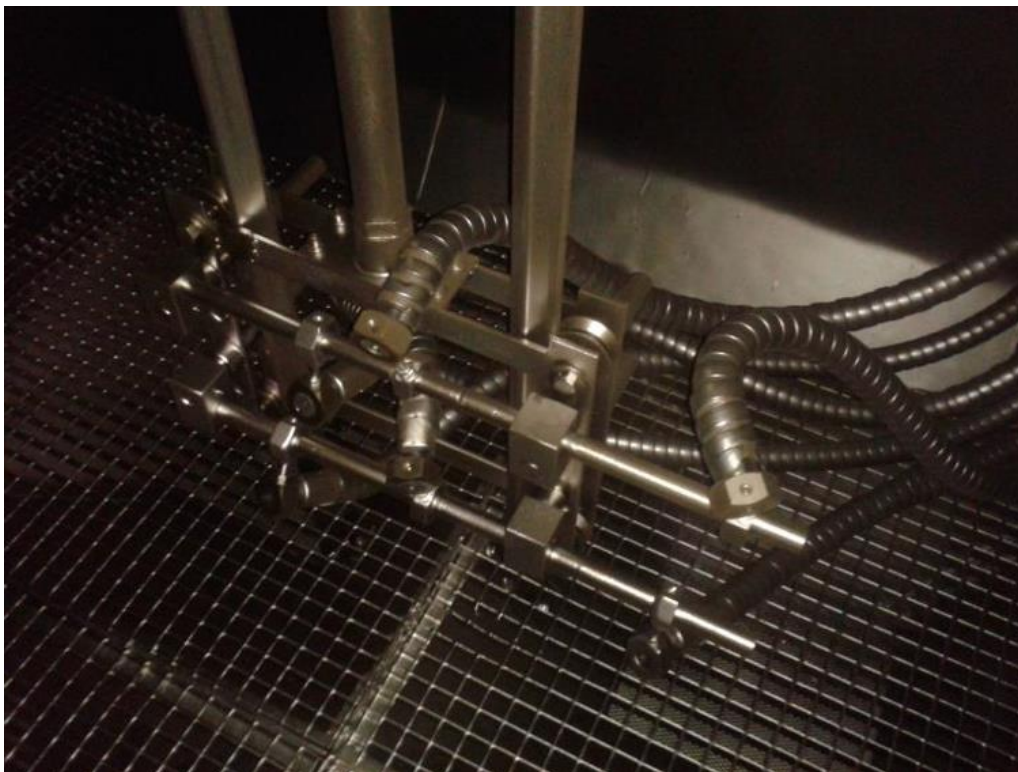


*Figura 13. Bastidor.*

Para tratar la superficie de la pieza, las boquillas se montan en unas bancas donde pueden variar su orientación independientemente. Estas bancas se mueven verticalmente con dos cilindros hidráulicos situados en el exterior de la cabina y hay dos grupos de boquillas, uno a cada lado de la pieza. En el caso de la máquina 1, consta de 13 boquillas dispuestas en dos grupos, 8 a un lado y 5 al otro, ofreciendo una presión 2,5 bar, una velocidad de 240 mm/min y una intensidad de 0.150-0.250 mA. La máquina 2, a diferencia de la anterior, posee una boquilla más, ubicadas 8 a un lado y 6 al otro, manteniendo la misma velocidad e intensidad que la anterior, pero con una intensidad de 2,0 bar. Con estas distribuciones y parámetros se consigue un tratamiento total y simétrico, para que la pieza quede lo menos deformada posible.

En el fondo de la cabina, se encuentran las tolvas desde donde está conectada la aspiración de la máquina, que lleva el perdigón al ciclón donde se inicia el proceso de reciclaje del perdigón. Es por ello que bajo las máquinas, hay un foso instalado para la supervisión de dichas tolvas.

A continuación, se muestra la Figura 14 las boquillas con su bastidor. Todo el conjunto se llama manipulador.

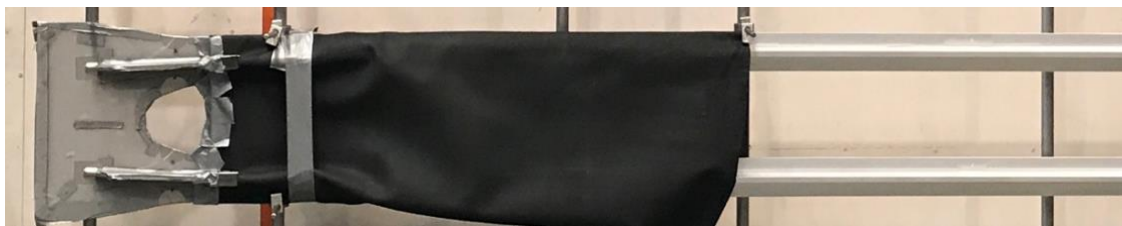


*Figura 14. Manipulador.*

### 2.3 Descripción de la problemática actual

La mayor parte de las piezas que se fabrican en M.A.S.A. deben ser tratadas, para incrementar su vida a fatiga, a parte de lidiar con las tensiones residuales que se generan. Para conseguir este efecto, las piezas son sometidas al proceso de granallado, un proceso comúnmente usado en el sector aeronáutico. Sin embargo, el problema reside en que el tratamiento solo se aplica en lugares concretos, establecidos previamente por el cliente, por lo que el resto de la pieza debe estar bien protegida de la fuerza abrasiva del perdigón.

Actualmente, el método que utiliza la empresa para cubrir y proteger las piezas es la cinta americana convencional. Este método, es capaz de ofrecer la suficiente protección como para no verse afectada la superficie de la pieza y porque permite ser recortada en función de la geometría requerida. Cuando las superficies a proteger son muy grandes, se utiliza una lona elástica y plástica como elemento de protección, tal y como se puede apreciar en la Figura 15.



*Figura 15. Pieza con elementos de protección.*

Hay piezas como las cuadernas, que son tan numerosas, que el proceso de enmascarado se realiza a través de una subcontrata, manteniendo el mismo criterio de enmascarar que el que se ha explicado anteriormente. Estas piezas van alojadas a lo largo del fuselaje, que, por así decirlo, son “las costillas” del avión.

El tiempo medio que lleva proteger una pieza suele estar en torno a los 20 min y siempre está en manos de un solo operario, de manera que pueda manejar la pieza con soltura y le permita realizar su trabajo con mayor facilidad. En el momento en el que las piezas salen de la máquina de granallado, hay que retirarle la cinta de enmascarado y si a esto se le suma, un posterior examen visual para verificar que ninguna traza de pegamento de la cinta se quede adherida a la pieza, debido a la degradación que sufre durante el proceso de granallado, hace que el tiempo de preparado pueda llegar hasta los 45 min en algunos casos, haciendo un total de 60 min aproximadamente por cada pieza.



Esta última revisión visual, es esencial para evitar que en el estudio previo de grietas el producto utilizado no se pegue en esas trazas de pegamento, ya que, si fuese así, el estudio no se daría por bueno y se tendría que analizar el porqué, lo que desembocaría en un retraso en toda la cadena de producción. A parte de esto, los trabajos realizados por las subcontratas hay que revisarlos para asegurarse de que todo esta en regla y se han cumplido con las indicaciones establecidas por el cliente.

Todos estos factores crean verdaderos quebraderos de cabeza dentro de la empresa. El hecho de que un operario invierta tanto tiempo hace saltar las alarmas. El tiempo, junto con la eficiencia y la productividad, son factores muy relevantes dentro de una empresa. Cuanto menos tiempo se invierta en lograr el resultado deseado, mayor será el carácter productivo de una empresa y, por consiguiente, su eficiencia, lo que se traduce en un gran ahorro de costes y una mayor agilidad en el negocio empresarial. Para conseguir esto, hay que apostar por nuevas soluciones que faciliten las labores de enmascarado y que consigan incrementar la capacidad productiva de los operarios, siempre y cuando la solución aportada tenga una efectividad igual o superior al proceso actual.

## 2.4 Propuesta de nuevas soluciones

Frente a la problemática actual a la que se enfrenta la empresa, se ha planteado la idea de buscar una posible solución que facilite la labor de los operarios y que de algún modo se consiga acabar con la necesidad de recurrir a una subcontrata para enmascarar ciertas piezas.

Resulta bastante complicado la idea de encontrar nuevas soluciones para este caso, ya que cada pieza tiene diferentes formas geométricas y, a parte, las zonas a tratar no son las mismas, por lo que sería necesario crear una plantilla diferente por cada pieza. Aun así, se han presentado tres alternativas como posibles soluciones:

- Una de las primeras opciones que se han planteado, es crear plantillas con un material muy similar al de la cinta de enmascarado. Mediante una impresora plotter de corte y utilizando un material plástico con el reverso de superficie adhesiva, diseñar las plantillas con la configuración adecuada a las necesidades de cada pieza a tratar. De esta manera, solo hay que elegir las plantillas adhesivas que corresponden a esa pieza y pegarlas en las zonas que no deben ser tratadas.

Con este sistema se conseguiría solucionar parte del inconveniente, porque no sería necesario tanta mano de obra a la hora de enmascarar, pero aún seguirían abiertos varios frentes a solucionar. El problema con el adhesivo se seguiría manteniendo, ya que, el continuo impacto del perdigón sobre la plantilla anexionaría partículas de adhesivo a la superficie de la pieza, teniendo que ser revisada después de cada tratamiento. A parte de esto, se ha de tener en cuenta que el adhesivo de la plantilla acabaría por deteriorarse, hasta el punto de anular su función y, por consiguiente, la plantilla sería inservible, teniendo que hacer unas nuevas cada cierto tiempo.

Otro inconveniente que presenta el fabricar las plantillas con este método, es que solo pueden ser utilizadas en superficies planas o que presenten una geometría muy similar, debido a que resulta muy complicado crear plantillas con diseños muy complejos como se da en las zonas con intersecciones o en superficies donde hay nervios, teniendo que recurrir a la cinta americana y todo lo que conlleva utilizar esta medida de protección.

- Otra de las opciones que se ha barajado como posible solución, es la fabricación de plantillas del mismo método que la opción uno, pero esta vez introduciendo una placa de aluminio entre dos plantillas.



*Figura 16. Plantillas con base de aluminio.*

El propósito es el siguiente; con la impresora plotter de corte se fabrica las plantillas de material plástico con adhesivo en el reverso, muy similar a la cinta americana, pero dando la forma deseada, con la diferencia de que esta vez irán pegadas sobre una chapa de aluminio de un grosor predeterminada y con el mismo molde que las plantillas. El corte de los moldes de aluminio se haría mediante chorro de agua a presión y para conseguir que estas plantillas se asienten a la pieza, se usarán unas pinzas que irán enganchadas en aquellos nervios que no han de ser tratados. La idea se puede observar en la Figura 16.

Pero como es de saber, toda propuesta tiene alguna controversia. Al igual que ocurría en la opción anterior, en aquellas zonas de difícil acceso se ha de seguir colocando cinta americana, no obstante, la cantidad requerida es mucho menor por lo que el trabajo requerido se minimiza con creces. A esto, hay que sumarle la dificultad que presenta el diseñar las plantillas para que encajen correctamente en su correspondiente lugar, debido a que las superficies elevadas, como los nervios, hay que interpretarlos en el programa de diseño como una superficie plana y resulta bastante costoso. También resulta dudoso y no se puede asegurar con total certeza que, en las zonas críticas donde no hay suficiente aporte de material, pueda soportar con total seguridad la fuerza que produce la granalla sin deformarse, evitando que la granalla penetre por debajo y ataque a zonas donde no se debe tratar.

- Como tercera y última opción, se ha valorado el uso de la impresión 3D. Desde hace ya una década, este tipo de impresión comenzó a coger fuerza debido a las numerosas aplicaciones que tenía y que se creía que podía llegar a tener. Aunque no se tiene mucha noción sobre este tipo de impresión, el hecho de que se consigan obtener piezas en tres dimensiones ha creado mucha expectativa. Se ve muy factible diseñar una carcasa que encaje a la perfección en la pieza a proteger, ya que todos los clientes proporcionan un modelo 3D de todas sus piezas. Para que la carcasa quede fijada a la pieza, se ha estudiado usar tornillos que anclen los útiles de enmascarado a la pieza o incluso diseñar unos elementos de sujeción propios del útil de enmascarado, pero son ideas que habría que analizar con más detalle. El dilema que surge con esta opción es su eficacia. Al tratarse de una tecnología moderna, de la que no se tiene muchas referencias, crea esa incertidumbre de si esta idea tendrá salida o pasará a formar parte del olvido.

Otro de los inconvenientes que se han observado hasta el día de hoy, es que la mayor parte de las impresoras 3D no permiten generar piezas de gran tamaño debido a sus tamaños tan compactos, lo que limitaría mucho el campo de actuación.

#### 2.4.1 Síntesis de las propuestas

Una vez plasmadas estas tres posibles alternativas y haciendo un balance de las ventajas y desventajas de cada propuesta, se ha llegado a la conclusión que de las tres opciones propuestas, la más acertada es la última; la impresión en tres dimensiones.

Tal y como se ha mencionado antes, se trata de una tecnología de la que no se tiene muchas referencias, pero la idea de pensar que este método omitirá el uso de cinta adhesiva en su totalidad, resulta una opción bastante esperanzadora. A todo esto, hay que sumarle, el ahorro tanto económico, como temporal, puesto que no se invertiría más de 15 min en poner y retirar el útil de protección de una pieza. Las impresoras 3D tienen la ventaja de fabricar todo tipo de estructuras geométricas por muy abstractas que parezcan, en multitud de materiales y aquí, es donde reside el factor más importante; su permisibilidad de elegir el material que mejor se ajuste a las exigencias de la situación.

Se ha de mencionar el desembolso económico inicial que esta opción supone. Es de saber, que el precio en el mercado de estas impresoras convencionales puede ir desde los 500 € hasta los 6 000 €. Aunque supone un desembolso inicial bastante notable, se puede considerar una buena inversión, puesto que su versatilidad podría ser aprovechada para sacarle partido en otros campos dentro de la empresa.

La tecnología basada en la impresión en tres dimensiones esta en un continuo proceso evolutivo y se especula que esta tecnología seguirá creciendo hasta un punto inimaginable [5]. Por ello, a pesar de que actualmente no se tenga muchas referencias y, hasta el momento, solo se puedan crear útiles para piezas que no superen el tamaño máximo de impresión permitido por estas máquinas, se ha considerado como recurso para fabricar los nuevos útiles de enmascarado.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN



## **Memoria II**

**“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES  
DE ENMASCARADO PARA PROCESOS  
DE GRANALLADO”**

### **III. Adopción de la solución final: Fabricación de utillajes de enmascarado**

Tal y como se ha mencionado en el punto anterior, la idea de utilizar el método de impresión 3D como adopción para fabricar los útiles de enmascarado, se ha considerado la solución más tangible.

Aunque el mercado de las impresoras 3D se encuentra en un estado incipiente, debido a que se trata de un mercado muy joven en vías de desarrollo, muchas de las empresas del sector industrial están haciendo de esta actividad un uso casi imprescindible, debido al numeroso abanico de posibilidades que ofrece, permitiendo crear desde los diseños más sencillos, hasta las geometrías más complejas que uno pueda imaginar con acabados de gran calidad.

La impresión 3D se fundamenta en la fabricación por adición de objetos tridimensionales mediante la superposición del material en sucesivas capas. La impresión en tres dimensiones destaca por que es un proceso más rápido, barato y fácil de usar en comparación con otros procedimientos de adición. Además, ofrecen la capacidad de imprimir partes y montajes de gran complejidad, hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades mecánicas.

Para conseguir la impresión 3D de un elemento, se tiene que generar el diseño en un programa asistido por ordenador (Solidworks, Catia, Autodesk Inventor, etc), que permita generar una interfaz estándar de datos entre el software CAD y el de la máquina, que es el formato de archivo conocido como STL (siglas provenientes del inglés “STereo Lithography”). Es un formato de archivo informático de diseño asistido por ordenador que define geometría de objetos 3D, excluyendo información como colores, texturas o propiedades físicas. A través del programa CURA [5], el cual se ha empleado para el desarrollo de este trabajo, se pueden realizar todos los pasos necesarios para pasar de un modelo 3D en formato STL, a un objeto real y configurar los parámetros básicos de impresión (densidad y espesor del material, velocidad, calidad y temperatura de impresión, entre otros) en función de las necesidades que se requieran. Las instrucciones para ir disponiendo el material fundido y construir así la forma del modelo, se suelen describir usando G-Code. El G-Code [6] es el lenguaje de programación que utiliza el programa CURA para guardar las órdenes de impresión que debe ejecutar la impresora

3D. En realidad, el G-Code es un estándar muy difundido para programar máquinas de control numérico, como tornos o fresadoras.

### 3.1 Tipos de impresión

Existe un gran número de tecnologías disponibles para la impresión [7] [8]. El aspecto que mayor las diferencia, es la forma en la que las diferentes capas son usadas para crear piezas. Algunos métodos usan fundido o ablandamiento del material para producir las capas y otros depositan materiales líquidos que son curados con diferentes tecnologías. A continuación, se hará una breve descripción del funcionamiento y de las características de cada una:

#### 3.1.1 Fabricación con Filamento Fundido (FFF)

Anteriormente conocida como **Modelo por Deposición Fundida (MDF)** (en inglés “**Fusion Deposition Modeling**”). La impresión con esta tecnología se basa en la utilización de un fino hilo de plástico que pasa a través de un extrusor que es, un dispositivo que calienta el material hasta el punto de fusión, el cual va depositando el material plástico en sucesivas capas, empezando siempre por la inferior. Tras ser depositado en su lugar, el material se enfría y se solidifica, una vez acabada esa capa, la boquilla se desplaza verticalmente una pequeña distancia, gracias a que puedes desplazarse en los tres ejes cartesianos, para comenzar la siguiente capa (ver Figura 17).

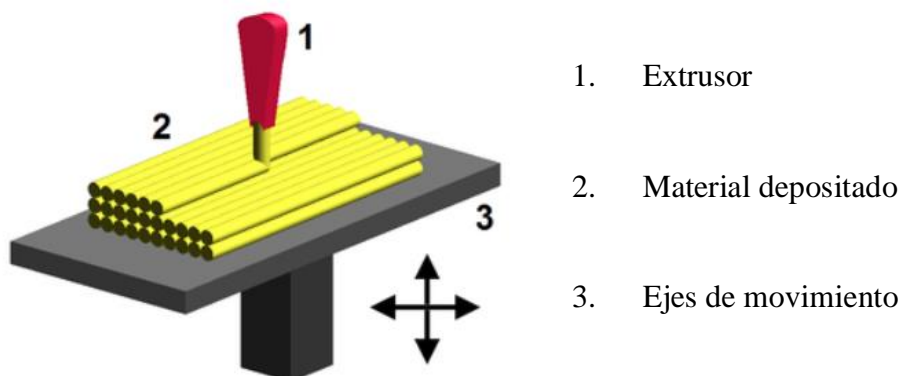
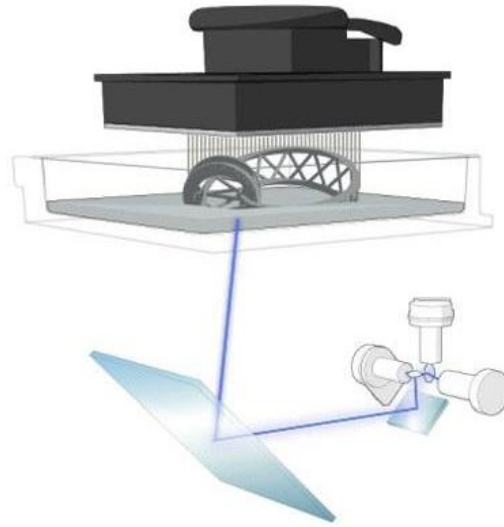


Figura 17. Fabricación por filamento fundido.

En ciertas ocasiones, dependiendo de la dificultad que presente la pieza a fabricar, es posible que sea necesario la utilización de soportes que se eliminan a posteriori.

### 3.1.2 Estereolitografía (SLA)

La **Estereolitografía** [9] es un proceso de fabricación por adición que emplea resina que se cura mediante luz ultravioleta en un tanque, para obtener los objetos tridimensionales. El láser de luz ultravioleta activa la curación de la resina líquida, sofocándola, quedando así la capa recién solidificada pegada a la capa previa que existía debajo suya (ver Figura 18).



*Figura 18. Tecnología SLA.*

Una vez que la capa a imprimir ha sido creada, la plataforma de elevación del equipo desciende una distancia equivalente al grosor de una capa de resina solidificada (típicamente entre 0,05 y 0,15 mm). Una hoja barre la pieza dejando una nueva capa de resina líquida en la superficie de la cubeta, lista para la siguiente impresión. Una vez que la pieza tridimensional se ha completado, esta se sumerge en el baño químico que retira el exceso de resina y, posteriormente, cura en un horno de luz ultravioleta.

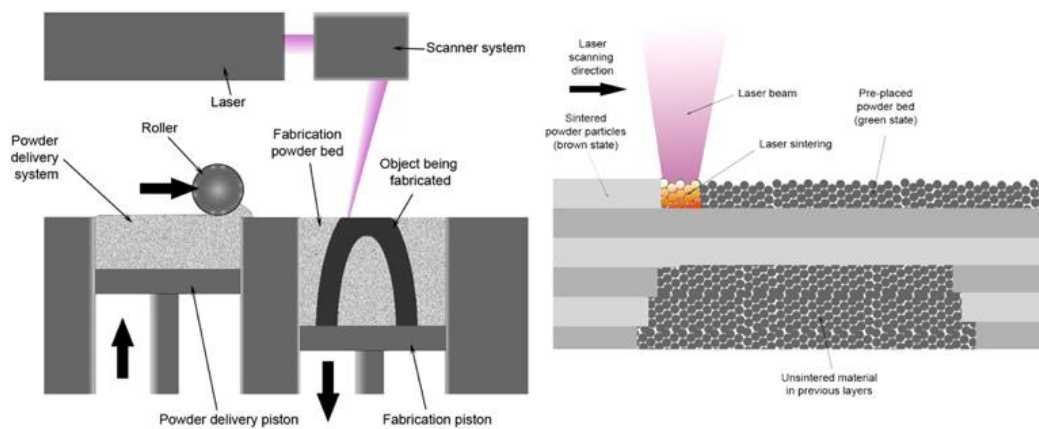
Gracias a este método se consiguen figuras con gran calidad, aunque se desperdicia gran cantidad de material si se necesitan fabricar soportes auxiliares. Las resinas que se suelen utilizar son:

- Resina blanca opaca tipo ABS Especial (no es ABS realmente).
- Resina blanca ABS Especial con infiltraciones para mejorar sus propiedades mecánicas.
- Resina translúcida.



### 3.1.3 Sinterización Selectiva Láser (SLS)

Su funcionamiento es muy similar a la SLA, pero en vez de hacer uso de un polímero líquido fotocurable, se utiliza un material en polvo (poliestireno, materiales cerámicos, cristal, nylon y materiales metálicos) de unas décimas de milímetro, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un laser CO2 sinteriza el polvo, haciendo que las partículas se fusionen y, posteriormente, se solidifiquen (ver Figura 19). Las piezas terminadas tendrán una densidad que depende de la potencia pico del láser más que de su duración [10].



*Figura 19. Sinterización Selectiva Láser.*

Existe otro método muy similar, la **Fusion Selectiva por Laser** (en inglés “**Selective Laser Melting**”), que es muy similar al SLS pero que derrite el material en polvo en lugar de solo fundirlo a baja temperatura.

La **Fusión por Haz de Electrones** (en inglés “**Electro Beam Melting**”) es un proceso equivalente al SLM, pero a diferencia de este, el EBM utiliza un haz de electrones en lugar de un láser UV para fundir el polvo.

### 3.1.4 Fotopolímero PolyJet

Su funcionamiento se asemeja a la manera en la que las impresoras de tinta depositan la tinta. Se expulsa un fotopolímero líquido y entonces se va solidificando gracias a una luz ultravioleta. Al igual que en el resto de impresoras, la impresión se realiza por capas, permitiendo hacer uso de distintos materiales y colores de manera simultánea en capa a capa.

### 3.1.5 Extrusión de Jeringa (Syringe Extrusion.)

Es un sistema basado en aporte de material, en formato viscoso o cremoso, por medio de un extrusor a modo de manga pastelera/jeringuilla, situando el material en la posición adecuada (ver Figura 20). En función del material que se utilice, se requerirá de un extrusor caliente (chocolate) o no (silicona).



*Figura 20. Impresora con extrusor de jeringa.*

### 3.1.6 Fabricación de Objetos Laminados

Este modo de impresión, también conocido como “**Laminated Object Manufacturing**” (LOM), se basa en solapar capas de material (papel adhesivo, plástico o láminas de metal) son situadas una encima de otra y se pegan con resina/pegamento y son cortadas con la forma apropiada con láser.

### 3.1.7 Impresión con Hielo

Recientemente se han desarrollado técnicas que, por medio de un enfriamiento controlado de agua tratada, son capaces de producir una auténtica impresión 3D con hielo como material. Aunque es una tecnología en desarrollo y sus ventajas a largo plazo están aún por ver, el ahorro de material específico para llevar a cabo la impresión, independientemente del coste del proceso, parece una de ellas [11].

La mayor parte de estas máquinas disponen de una bandeja o cama [12] donde se deposita el material de estratificación/aglutinante hasta que se solidifica. Esta bandeja donde se imprimen las piezas, suele incorporar una resistencia integrada para calentarla, así como una superficie desmontable, que permite sacar las piezas más fácilmente mientras se enfrían. La razón de calentar la bandeja, está en evitar que el filamento fundido pierda adherencia y termine despegándose, además de combarse por la gran diferencia de temperatura que se da entre el HotEnd y la cama. Este elemento es imprescindible para la impresión de ciertos plásticos (ABS, Nylon, etc.) que, debido a su complejidad estructural, necesitan mantener constante la temperatura del material durante todo el proceso de impresión, ya que suelen ser propensos a dar fallos por pandeo (conocido como warping). Es conveniente que aquellas impresoras que dispongan de bandeja, al inicio de cada impresión, se realice un reequilibrado por motivo de posibles desajustes, evitando así, fallos durante el proceso de impresión. Se aconseja la aplicación de laca para mejorar la adherencia de la pieza a la cama.

Cada método presenta una ventaja diferente y se elegirá aquella que mejor se ajuste a las necesidades del usuario. En concreto, para este Trabajo Fin de Grado se ha utilizado el método de fabricación por filamento fundido (FFF) [13]. Se trata de un método que, hasta la fecha, es el más extendido además de económico y fiable, por no mencionar que era el único método a disposición del usuario. El funcionamiento de las impresoras con este método de trabajo, como se ha mencionado anteriormente, se basa en ir soltando un termoplástico fundido en capas, una sobre otra, a lo largo de un recorrido, para formar poco a poco los perfiles e interiores de la pieza de una manera fiable, rápida y eficiente. Todas las impresoras que trabajan con este método, disponen de una cama, caliente o no, donde imprimir la pieza, contenida en una estructura que evita las vibraciones y oscilaciones de los componentes. Otro componente imprescindible que se encuentra alojado dentro de la estructura, es el cabezal de extrusión de filamento, el cual dispone de un sistema para calentar el plástico, que suele utilizar una resistencia o un cartucho calentador cerámico, colocado dentro de una estructura metálica con una apertura por donde pasa el filamento. Algunos plásticos necesitan más de 200 °C para fundirse, por lo que para evitar que el conjunto se sobrecaliente o se termine quemando, suele contar con un termistor para controlar la temperatura y un ventilador para refrigerar el cabezal. Por último, está la boquilla, que suele tener una apertura de entre 0,3 y 1 mm, y que marca,

junto a la velocidad de alimentación de filamento, el flujo de plástico y la resolución de las capas a imprimir. La electrónica y todo el sistema de transmisión del movimiento de los motores son elementos de los que también disponen estas impresoras. Este sistema de transmisión del movimiento se realiza habitualmente por correas dentadas, cables o varillas roscadas, facilitando el desplazamiento del cabezal en los ejes X, Y y Z. El sistema de coordenadas más utilizado es el cartesiano, en el que los ejes X e Y delimitan la superficie de la bandeja y el Z indica la altura, pero también se usan otros como el polar o delta.

## 3.2 Impresoras empleadas

Actualmente, las impresoras que trabajan con este método de impresión 3D abarcan la mayor parte del mercado español. La variedad en cuanto al precio, su facilidad de uso y la amplia gama de materiales plásticos que permite, entre otros, hacen de ellas un producto muy demandado, siendo la mejor opción si se quiere iniciar en el mundo de la impresión 3D. Gracias a la multitud de funciones que tienen, se puede conseguir desde las piezas más básicas hasta las formas geométricas más complejas que se pueda imaginar, trabajando los materiales con unos acabados muy buenos y con tolerancias centesimales. Para el desarrollo de este proyecto, se ha dispuesto de dos tipos de impresoras 3D diferentes: la BQ WitBox 2 y la BCN3D.

### 3.2.1 BQ WitBox 2

La impresora BQ Witbox 2 [14], la cual se muestra en la Figura 21, es una impresora 3D de ejes cartesianos que realiza impresiones mediante el sistema de impresión Modelo por Deposición Fundida (MDF).



*Figura 21. BQ Witbox2.*

Con sus más de 30 kg, debido a que el 90% del chasis es de acero y a sus generosas dimensiones (508 mm x 485 mm x 461 mm) necesarias para albergar en su interior un área de impresión de gran tamaño (297 mm x 210 mm x 210 mm), hacen de ella un equipo pesado y robusto.

Posee una resolución de impresión de hasta 20 micras, a velocidades de incluso 200 mm/s. Solo tendremos que limitar estos valores cuando utilicemos algunos filamentos específicos, como por ejemplo el filamento flexible, que se aconseja imprimirlo a no más de 60-80 mm/s. Gracias al extrusor con sistema “Doble Engranaje de Accionamiento” desarrollado por BQ, se pueden usar una amplia gama de filamentos de 1,75 mm de grosor. Se trata de un componente de buena calidad con el que se ha impreso todos los materiales a los que se ha podido acceder (metal, madera, corcho, filamento flexible, PETG, etc.), siempre y cuando su impresión no requiera cama caliente. Este extrusor incorpora ruedas dentadas a ambos lados del filamento para aumentar la tracción que se realiza al arrastrar el material hacia el hotend. También incorpora un tubo de PTFE (teflón) que reduce la fricción del filamento en su desplazamiento hacia el hotend, asegurando que el filamento sólo se caliente una vez ya se haya introducido en el hotend. Todos estos añadidos aseguran que no se produzcan atascos en la impresión, independientemente del filamento que se utilice.

El principal inconveniente de este sistema, es que el tubo de teflón no soporta temperaturas superiores a 240 °C, por lo que la impresión de ABS y filamentos que requieran altas temperaturas queda totalmente descartada. Cada cierto tiempo hay que sustituir el tubo de PTFE que tiene en su interior, de todos modos, es un proceso sencillo, que no supondrá más de 10 min. Sin embargo, pasarán muchas horas de impresión antes de tener que realizar el primer reemplazo.

### 3.2.2 BCN3D Sigma

La BCN3D Sigma [15] es una impresora 3D profesional, también de ejes cartesianos, de sistema FFF (Fabricación por Filamento Fundido) capaz de reproducir cualquier objeto que se tenga en mente, con un gran nivel de detalle. Se caracteriza por su sistema Extrusor Doble Independiente (en inglés “Independent Dual Extruder” (IDEX)), que le permite imprimir sin limitaciones geométricas y ofrece la posibilidad de combinar técnicas existentes como impresiones multimateriales con soportes o multicolores.

El sistema IDEX, consiste en un doble extrusor independiente, cuya principal ventaja reside en su fácil calibración y los resultados obtenidos al combinar dos colores o materiales. Esto es posible, ya que cada extrusor imprime su parte, mientras el otro permanece en un lado, evitando que ningún rastro de material fundido caiga sobre la pieza impresa.

La ventaja de imprimir con dos materiales diferentes, hace que este sistema sea ideal para la fabricación de piezas que puedan requerir estructuras de soporte, combinando con facilidad PVA (material hidrosoluble, que al sumergirlo en agua se desvanece), para dichos soportes y el PLA (Ácido Poliláctico), para la pieza. Así, el usuario tendrá acceso a un número ilimitado de piezas, superando casi todas las limitaciones de la tecnología FFF.

Este doble extrusor independiente (ver Figura 22) también permite a la BCN3D Sigma imprimir piezas multicolor en una misma impresión, dando otro gran paso hacia adelante en el mundo de la impresión 3D. Esta opción dota a las piezas de una gran complejidad y las hace más atractivas, sin afectar a la calidad de la impresión.



*Figura 22. Impresora BCN3D Sigma.*

Gracias a su cama caliente (210 mm x 297 mm x 210 mm), la sigma puede imprimir cualquier material que se necesite, desde el PLA común hasta los más avanzados plásticos como el Nylon o PC, entre otros.

El exclusivo sistema IDEX de la BCN3D sigma permite combinar diferentes tamaños de hotend. Los tamaños van desde 0,3 mm, empleados para imprimir los contornos u objetos minúsculos y detallados, hasta de 1 mm, perfectos para imprimir rellenos o piezas macizas y sólidas. También incluye un hotend especial con una boquilla de 0,5 mm en acero inoxidable endurecido, ideal para imprimir con materiales abrasivos. Cada hotend presenta una cualidad diferente, por lo que es apropiado elegir el adecuado para cada trabajo, debido a que la velocidad de impresión también puede variar hasta tres veces más rápido llegando a las 12 micras, en función del hotend que se utilice.

Todas las funciones y ajustes de impresión se llevan a cabo a través de la pantalla táctil a color. La interfaz está completamente equipada con características avanzadas que guían al usuario por el menú paso a paso.

Inicialmente, cuando se tomó en consideración este proyecto, solo se disponía de la Witbox 2, limitando las opciones de ensayo con diferentes materiales a tres, ya que esta impresora solo permite trabajar con PLA y derivados, Filaflex y ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), siendo este último no apto para la impresora, aunque se consiguió fabricar una plantilla. Posteriormente, se contactó con un estudiante que se encontraba en prácticas en la empresa BCN3D Technology, especializada en venta de impresoras 3D, lo que permitió ampliar el abanico de materiales a verificar, ya que la impresora BCN3D Sigma, que se empleó para la fabricación de estas plantillas, es más sofisticada que la Witbox 2 y permite trabajar con materiales más complejos y que requieren de unas condiciones de impresión más específicas, como es el caso del Nylon.

A priori, se barajó la posibilidad de localizar un negocio especializado en impresiones e impresoras 3D por la zona, pero los costes de impresión de materiales con unas propiedades físicas y mecánicas superiores a las opciones que proporciona la Witbox 2, como el Nylon o el HIPS (Polietileno de Alto Impacto), resultaba tan caro, que se descartó esta opción.

### 3.3 Selección del material a ensayar

#### 3.3.1 Clasificación de los materiales

Los continuos avances tecnológicos hacen que actualmente existan un gran número de materiales disponibles para la impresión 3D. De manera genérica, es posible clasificar los materiales [16] que se pueden utilizar en los distintos procesos de fabricación aditiva:

##### 3.3.1.1 *Extruíbles (para FDM)*

Se trata de materiales que pueden ser empujados hacia una boquilla para crear las capas del modelo a fabricar. En general, hablamos de los polímeros (ABS y PLA, entre otros) pero también es común la extrusión de pastas tanto alimentarias (azúcares, purés, chocolates, etc.) como técnicas (cerámicas, cementos, etc.) e incluso de tejido humano (piel, órganos, etc.).

También existen, pero son menos comunes, los conocidos como materiales exóticos, que son aquellos que presentan partículas de materiales no extruíbles dentro de los filamentos: madera, yeso, bambú, coco, cobre, bronce, etc.

Estos materiales, tienen la ventaja de poder imprimirse tanto rígidos como flexibles y cabe la posibilidad de conseguir la transparencia en alguno de ellos, aunque es algo bastante complicado.

##### 3.3.1.2 *Fotocurables (para SLA)*

Se trata de materiales, normalmente resinas sintéticas, que pueden ser solidificados mediante la exposición a un haz de luz de longitud de onda determinada. Habitualmente se trabaja con resinas que reaccionan a la luz ultravioleta.

Se suelen considerar de mayor calidad superficial, pero no es posible encontrar resinas fotocurables con buenas propiedades mecánicas. Existen resinas tanto rígidas como flexibles y a diferencia de los materiales extruíbles, es menos complicado conseguir elementos transparentes.

Cabe mencionar la posibilidad de combinar distintos materiales fotocurables para conseguir, por ejemplo, distintos niveles de dureza. Estos son comúnmente conocidos como materiales digitales.



### *3.3.1.3 Polvos (para SLS, DMLS, Full Color, etc.)*

En esta categoría entrarían dos tipos de procesos de fabricación. Unos que fusionan los polvos mediante el uso de una fuente de calor puntual (normalmente un láser) y otros que utilizan algún tipo de resina o agente aglutinante.

En el primer caso, se suele trabajar con materiales técnicos como las composiciones basadas en poliamida (Nylon), que pueden contener cargas de otros agentes para aprovechar parte de las propiedades de estos: aluminio, fibra de vidrio, etc. Este mismo método es el que se emplea también para conseguir materiales metálicos (Aluminio, Hierro, etc.)

En el segundo caso, se suele hablar de materiales cerámicos. Es habitual en procesos full color.

### *3.3.1.4 Otros (para LOM)*

La impresión 3D no es un único proceso. Existen muchos tipos de máquinas para aplicar técnicas o procesos, con el fin de conseguir elementos por adición. De esta forma, existen distintos sistemas que son capaces de trabajar con láminas de materiales (papel, plásticos, corchos, etc.) que son recortadas y pegadas formando la pieza final.

## **3.4 Polímeros**

Básicamente, casi todas las impresoras 3D que ocupan la mayor parte del mercado, son las que utilizan el método de extrusión, en concreto la extrusión de polímeros.

Los polímeros están formados por la unión de cientos a miles de pequeñas cadenas de moléculas llamadas monómeros. El proceso de unión de estos monómeros se llama polimerización. Muchos de los polímeros son llamados en base al monómero principal junto con el prefijo poli-; como puede ser el poliestireno que viene de la polimerización del grupo estireno. Existen tres tipos de polímeros [17] en base a su comportamiento mecánico y naturaleza:

- **Termoplástico:** Son polímeros lineales, ramificados o no. Al no encontrarse entrecruzados, son polímeros solubles en algunos disolventes orgánicos, son capaces de fundir y por lo tanto reciclables. Los polímeros termoplásticos pueden presentar una temperatura de transición vítrea  $T_g$  (en caso de ser amorfo) o una temperatura de fusión  $T_m$  (para material cristalino) superior a la temperatura ambiente. Generalmente

no existen polímeros 100% cristalinos con lo que se registra una Tg de la parte amorfa y una Tm. Lo que les hace interesantes a los termoplásticos es que pueden fundir y solidificar varias veces.

- **Termoestables:** Son materiales que adquieren un estado final reticulado o entrecruzado, con lo que los hace incapaces de fundir. Requieren métodos de transformación lentos y presentan buenas propiedades a altas temperaturas. Una vez curados, son muy estables térmicamente y no se pueden reprocesar.
- **Elastómeros:** Son generalmente polibutadienos o compuestos que contienen dobles enlaces en la cadena principal. Las cadenas de polímeros se encuentran enrolladas sobre sí mismas y esto les confiere gran flexibilidad. Los elastómeros casi no sufren deformación plástica cuando se les aplica una tensión y en ocasiones pueden deformarse hasta el 400 %.

Además de estas tres grandes clasificaciones, también se suelen añadir las clasificaciones de: plásticos de altas prestaciones, materiales compuestos, plásticos espumados y cristales líquidos.

Contando con que inicialmente solo se disponía de una impresora 3D que se basaba en el método de extrusión, no quedo mucha alternativa para barajar la posibilidad de contemplar otras opciones. Aunque esta fuese unas de las razones por las que se eligió este método, sí que es cierto que con anterioridad se acordó el uso de polímeros termoplásticos. Los materiales termoplásticos tienen la propiedad de poder fundirse y moldearse si se les aplica cierto calor y solidificarse cuando se enfrían. Este tipo de materiales se pueden fundir y solidificar muchas veces por lo tanto se podrían reutilizar. Esta propiedad de poder calentarse y moldearse una y otra vez, e incluso de que algunos puedan llegar a ser flexibles, hace que los termoplásticos sean unos de los materiales más utilizados en la actualidad e idóneos para el desarrollo de este proyecto.

El hecho de que los termoplásticos sea uno de los materiales más utilizados y que la impresión en 3D este en continuo crecimiento, hace que actualmente muchas empresas hayan querido involucrarse en este sector, haciendo que los precios de estos materiales sean muy competitivos, factor que fue determinante para decantarse por esta opción. Siempre y cuando se tenga en consideración, que la calidad de los materiales termoplásticos fabricados por terceros puede verse afectada. En el caso de que el precio

de los filamentos hubiese sido muy elevado se tendría que haber valorado la opción de si este proyecto hubiese sido rentable frente al método actual usado por la empresa.

### 3.5 Materiales Termoplásticos

Cada día crece la variedad de materiales disponibles para imprimir en 3D [18]. Algunos de estos filamentos parecen más una moda pasajera que una verdadera utilidad. Para este proyecto, se tomó en consideración aquellos materiales que eran compatibles con las impresoras de las que se disponía y los cuales, tras leer sus especificaciones, se creían aptos para este experimento. A continuación, se especificarán los materiales empleados junto con sus características más singulares:

#### 3.5.1 PLA (Ácido Poliláctico)

Este termoplástico [19] [20], también conocido como "ácido láctico" o "poliácido láctico", tuvo sus orígenes sobre el año 1780 cuando fue descubierto por el químico Schelle, pero no fue hasta los años 90 cuando empezaron a implantarse las primeras empresas en fabricar estos filamentos. El PLA (Ácido Poliláctico) es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico, proveniente del almidón de maíz. Puede obtenerse por dos vías: la química o la biotecnológica. La producción química está basada en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico para dar así lactonitrilo, el cual se hidroliza para obtener ácido láctico. La parte biotecnológica está basada en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por microorganismos. La degradación del PLA es más lenta si la cristalinidad es elevada y si el peso molecular es elevado. En la Figura 23 se puede observar el aspecto visual del PLA.



*Figura 23. Ejemplo de impresión 3D con filamento de PLA.*

El PLA es mayormente conocido por su facilidad de impresión, lo que hace uno de los primeros materiales con los que los consumidores empiezan a imprimir en 3D, incluso sin tener mucha idea. Además de esta gran cualidad del PLA, se detallarán a continuación otras características de las que dota este material:

- 1) El rango de temperatura de impresión está entre 190-220 °C. La temperatura a la cual se debe imprimir, debe estar entre las dos; aunque la temperatura óptima de impresión suele estar entre 198-210 °C.
- 2) Presenta una resistencia mecánica baja, es decir, se trata de un material frágil a la vez que duro. Esto implica que, una vez impresa la pieza no es muy aconsejable realizar tratados mecánicos sobre ellas (taladros, lija, etc.). No obstante, se pueden realizar con sumo cuidado y sin aplicar demasiado esfuerzo sobre las mismas.
- 3) El PLA puede tomar diversas características mecánicas dependiendo del proceso de fabricación seguido. Las propiedades físicas y mecánicas [21] [22] establecidas para este material son:

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del PLA [23].

<b>Propiedades físicas y mecánicas del PLA</b>	
<b>Densidad (ISO 1183)</b>	1,25 g/cm <sup>3</sup>
<b>Tolerancia</b>	±0,10 mm
<b>Elongación a la rotura (ISO 527)</b>	6 %
<b>Módulo de elasticidad (Young)</b>	3,5 GPa
<b>Módulo de flexión (ISO 178: 2001)</b>	4 GPa
<b>Módulo de corte</b>	2,4 GPa
<b>Resistencia a la flexión (ISO 178: 2001)</b>	80 MPa
<b>Resistencia a la tracción (ISO 527)</b>	50 MPa
<b>Resistencia a la rotura (ISO 180)</b>	15 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Relación fuerza-peso</b>	40 kN·m/kg
<b>Temperatura de transición vítrea (ISO 75)</b>	55-60 °C
<b>Comienzo de fusión</b>	160-175 °C
<b>Capacidad calorífica específica</b>	1800 J/kg·K
<b>Conductividad térmica</b>	0,13 W/m·K

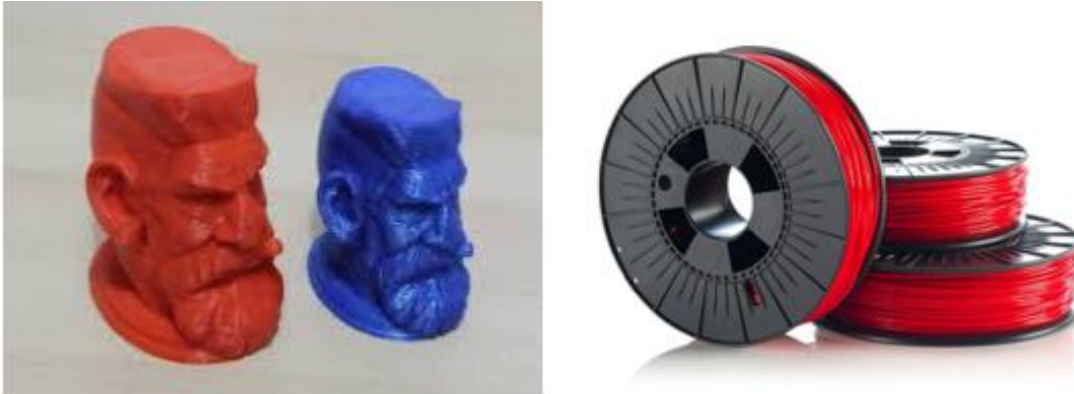
- 4) En referencia a la temperatura, cualquier objeto o pieza impresa en PLA se vuelve endeble a temperaturas entorno a 60-65 °C. Esto hace que este material plástico sea poco útil para aquellas piezas que requieran soportar temperaturas altas.
- 5) Según sea la marca del filamento, este puede presentar un aspecto translúcido, opaco e incluso fosforescente que brillen en la oscuridad. Los PLAs translúcidos poseen un determinado brillo, cuando la luz incide sobre el material y los filamentos opacos tienen la opción de encontrarlos en el mercado con una amplia gama de colores.
- 6) Menos contracción entre capas, al mantener un estado más líquido durante todo el proceso de impresión. Esto permitirá que no se produzca el "efecto pandeo" o que las capas intermedias-altas se agrieten por mala adhesión entre ellas (todo lo contrario al ABS), facilitando la impresión de este material en impresoras 3D que carezcan de cama caliente. Es conveniente aplicar en el área de impresión un adhesivo como laca para mejorar la adhesión de la capa inicial con la cama.
- 7) Posee un olor agradable y no tóxico, puesto que, como ya se ha mencionado anteriormente, el PLA se fabrica a partir de maíz. Esto lo hace ideal para impresiones en hogares y sobre todo en entorno frecuentados por muchas personas.

Como cualquier otro filamento 3D, el PLA tiene una vida útil aproximada de 1 año, una vez que ha sido extraído de su envase al vacío, ya que se trata de un material muy propenso a absorber humedad. Para mantener el filamento en buen estado, es aconsejable volver a envasarlo al vacío, si no se va a usar o almacenarlo en algún entorno cerrado (caja, almacén, etc.), donde no ataque notablemente la humedad.

Finalmente, queda por decir que la presencia de este material se agradece cuando las situaciones se complican con otros tipos de materiales, o bien, cuando se quieren hacer impresiones desde lo más fácil, hasta impresiones de gran envergadura.

### 3.5.2 ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) [17] [24], también conocido como plástico de ingeniería porque su elaboración y procesamiento es algo más compleja que en los plásticos comunes, es un termoplástico amorfo muy resistente al impacto, que junto con el PLA es uno de los materiales más empleados en el mundo de la impresión 3D (ver Figura 24).



*Figura 24. Filamento de ABS y piezas en 3D del mismo material.*

El ABS es un polímero compuesto por tres monómeros, acrilonitrilo, butadieno y estireno por lo que se le denomina terpolímero. Cada uno de los tres monómeros aporta características distintas. El acrolonitrilo, rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza y estabilidad a las altas temperaturas. El butadieno, tenacidad a la temperatura, cuando ésta es especialmente baja y resistencia al impacto; y el estireno, resistencia mecánica, rigidez, brillo y dureza. Siendo estas las características más significativas del ABS, existen otras a mencionar:

- 1) Para conseguir la temperatura de fundido hay que programar la boquilla a 230-240 °C. Con este material es necesario disponer de cama caliente entre 85-110 °C, puesto que tiende a solidificarse rápidamente. Instalando una cama caliente se consigue mantener el estado líquido del filamento, mejorando así la adhesión entre capas durante el proceso de impresión y evitando el "efecto pando". Algunos usuarios consideran que el ABS es más difícil de utilizar que el PLA.
- 2) El ABS posee unas propiedades físicas y mecánicas excelentes que se detallaran a continuación [25] [26]:

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas del ABS [25].

<b>Propiedades físicas y mecánicas del ABS</b>	
<b>Densidad (ASTM D-792)</b>	1,03 a 1,38 g/cm <sup>3</sup>
<b>Tolerancia</b>	±0,10 mm
<b>Elongación a la rotura (ASTM D-638)</b>	3 % al 75 %
<b>Módulo de elasticidad (Young)</b>	1,7 a 2,8 GPa
<b>Módulo de flexión (ASTM D-790)</b>	2,1 a 7,6 GPa
<b>Resistencia a la flexión (ASTM D-790)</b>	69 a 97 MPa
<b>Resistencia a la tracción (ASTM D-638)</b>	33 a 110 MPa
<b>Resistencia a la rotura (ASTM D-256)</b>	25 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Relación fuerza-peso</b>	31 a 80 kN·m/kg
<b>Temperatura de transición vítrea (ASTM D-1525)</b>	100 °C
<b>Comienzo de fusión (ASTM D-648)</b>	190-200 °C
<b>Capacidad calorífica específica</b>	1080 a 1400 J/kg·K
<b>Expansión térmica</b>	83 a 95 μm/m·K

- 3) El ABS es opaco y puede ser de color oscuro o marfil. También está disponible en un abanico más amplio de colores, sobre todo por la buena tolerancia de éste a la pigmentación de sí mismo.
- 4) El ABS es soluble en acetona y, aunque no es biodegradable, no es resistente a la radiación UV. No es tóxico y no contiene cloro, lo que lo hace especialmente popular para aplicaciones de agua potable o alimentos.

El ABS es un plástico muy resistente, y a diferencia del PLA, no es tan propenso a coger humedad, ya que no absorbe apenas agua. Por eso, es uno de los más usados en ingeniería e industria y está presente en múltiples objetos rutinarios tales como: carcasas de televisores, radios, ordenadores y equipos informáticos e incluso las piezas de Lego están hechas en este tipo de plástico.

### 3.5.3 Filaflex



*Figura 25. Zapatillas de impresión 3D con filamento Filaflex.*

El filamento flexible [26] (ver Figura 25) es un compuesto plástico al que se le añade un agente químico (plastificante), para aumentar su flexibilidad o “distensibilidad”. La adición de un plastificante puede hacer que disminuya la viscosidad en estado fundido, el módulo de elasticidad, y la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de un plástico, y permite que las impresoras 3D puedan fundirlo y darle la forma deseada, quedando el producto final como una pieza consistente de gran resistencia al impacto, que presenta como propiedad principal a destacar su flexibilidad. La ductilidad y la tenacidad de los polímeros también pueden mejorarse con la ayuda de los plastificantes, cualidades de las que carecen otros compuestos como puede ser el PLA estándar o el ABS en estado puro. Dentro de los filamentos flexibles podemos destacar cuatro grupos:

#### ➤ **SOFT PLA**

Se trata de un PLA flexible con unas propiedades de goma duradera. Es útil para realizar piezas que necesitan ser flexibles, que no se rompan al doblarse y además ser duras. Lo que hace tan especial a este material frente a otros filamentos flexibles es su resistencia y durabilidad. Los materiales flexibles presentan una dureza Shore de 85 A; en cambio el filamento Soft PLA es un poco más firme y tiene una dureza Shore 92 A.



El Soft PLA se imprime parecido al PLA estándar. La principal diferencia de impresión es que se debe imprimir a menos velocidad que el PLA estándar para obtener mejores resultados. La textura del Soft PLA es como de goma y con un acabado blanco puro. Este filamento es un bioplástico (biodegradable) hecho a partir de recursos renovables como el maíz. Suele emplearse en la fabricación de neumáticos, piezas de maquinaria o en juguetes para niños [27].

➤ **FILAFLEX**

Es un elastómero desarrollado en España, con una capacidad de estiramiento antes de romperse de un 700 % respecto al tamaño original. Esa propiedad lo hace idóneo para fabricar topes, juntas, plantillas de calzado, zapatillas, ruedas neumáticas, pulseras de relojes y, en definitiva, todo lo que pueda precisar doblarse mucho sin romperse.

Al tratarse del material que se escogió para este proyecto, se tomará partida de él posteriormente [28].

➤ **TCP FLEX (Co-Poliéster Termoplástico) y PET**

También es flexible, pero su mayor ventaja está en la fuerza estructural y en su memoria flexible. Básicamente imprime piezas que vuelven a su forma original por mucho que se arruguen, doblen, aprieten o golpeen. Su resistencia térmica, química y a los rayos UVA también es excelente y resulta bastante fácil imprimir con él.

El poliéster es un polímero termoplástico de condensación, conocido como PET (tereftalato de polietileno). El tereftalato de polietileno es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. Se obtiene mediante una reacción química entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Es lineal y tiene un alto grado de cristalinidad, lo que le hace muy resistente al desgaste y a la corrosión.

Sus aplicaciones son diversas; se puede fabricar desde envases de bebidas gaseosas, fibras textiles o fibras poliéster, hasta reforzantes en telas de neumáticos junto con el nylon.

➤ **TPE o NINJAFLEX**

Las características de este elastómero termoplástico fabricado en EE.UU. son similares a las del FILAFLEX, pero con un nivel de estiramiento más bajo. A pesar de lo cual también imprime piezas de gran flexibilidad. Su consistencia es como la de una cuerda de goma y soporta muy bien las deformaciones. El aspecto físico de estos filamentos es muy similar entre ellos tal y como se puede observar en la Figura 26.



*Figura 26. Muestra de la flexibilidad del Ninjaflex.*

Tal y como se ha hecho referencia anteriormente, de los cuatro filamentos flexibles que se pueden encontrar actualmente en el mercado, se tomó la determinación de elegir el Filaflex como candidato para este ensayo, simplemente por el hecho de ser el material flexible que más se comercializa por los usuarios a nivel nacional y por poseer buenos parámetros de impresión.

El Filaflex es un elastómero termoplástico con base de poliuretano y mezcla de varios aditivos. Destaca por su alta elasticidad y resistencia a la abrasión. Permite ser utilizado en cualquier sitio de superficie sin verse afectado gracias al alto coeficiente de fricción que posee y además se puede jugar con su grado de dureza en función del porcentaje de aditivos que tenga, pudiendo llegar desde una dureza Shore 85 A hasta los 97 A. Estas son algunas de sus características técnicas más significativas [21] [22]:

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas del Filaflex [27].

<b>Propiedades físicas y mecánicas del Filaflex</b>	
<b>Densidad (ISO 1183)</b>	1,22 g/cm <sup>3</sup>
<b>Tolerancia</b>	+/- 0.03mm
<b>Elongación a la rotura (ISO 527)</b>	700 %
<b>Resistencia a la flexión (ISO 37)</b>	14 MPa
<b>Resistencia a la tracción (ISO 527)</b>	45 a 54 MPa
<b>Resistencia al desgarro (ISO 34-1)</b>	130 kN/m
<b>Temperatura de transición vítrea</b>	80 °C
<b>Comienzo de fusión</b>	120 °C

Para garantizar una buena impresión, es necesario seguir las especificaciones del fabricante, puesto que, al tratarse de un material flexible, suele traer alguna complicación a la hora de imprimir. La temperatura de impresión se encuentra entre los 210-230°C y es aconsejable el uso de una cama caliente a una temperatura entre los 80-97°C, aunque si se carece de ella también es factible el proceso de impresión.

La variable que se deberá de tener en cuenta, al imprimir con Filaflex, es la velocidad de impresión junto con la boquilla a utilizar. Normalmente, para evitar que se generen altas presiones en el tramo final del HotEnd, se recomienda utilizar boquillas con orificios de salida de 0,4 mm en adelante y una velocidad de impresión de 20-50 mm/s. En caso contrario, la velocidad de impresión debe ser muy baja (10-20 mm/s) corriendo el riesgo de atasco.

El filamento mantiene sus propiedades y diámetro durante toda la impresión, consiguiendo un excelente acabado exterior. No obstante, será necesario utilizar el ventilador de capa, debido a que es bastante líquido al fundirse. No contiene químicos tóxicos, aun así, no se recomienda para el uso en grado alimenticio o médico, pero al menos es más sano para imprimir en interiores que el ABS. Se puede pegar utilizando pegamento de gorila, pero es más recomendable la unión por calor.

### 3.5.4 Nylon (Poliamida)

Las poliamidas, conocidos como nylon (PA), son polímeros semicristalinos que destacan por sus buenas propiedades mecánicas, una gran resistencia al desgaste y por su elevada tenacidad. El valor que toman las propiedades más significativas se especifica a continuación [21] [22]:

Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas del Nylon [27].

Propiedades físicas y mecánicas del Nylon	
Densidad (ASTM D-792)	1,157 g/cm <sup>3</sup>
Tolerancia	±0,10 mm
Elongación a la rotura (ASTM D-638)	231,3 %
Módulo de elasticidad (ASTM D-790)	1,99 GPa
Resistencia a la flexión (ASTM D-790)	84.9 MPa
Resistencia a la tracción (ASTM D-638)	64,6 MPa
Resistencia a la rotura (ASTM D-256)	28.3 kJ/m <sup>2</sup>
Temperatura de transición vítrea (ASTM D-1525)	75 °C
Comienzo de fusión (ASTM D-648)	219-225 °C

No obstante, en el mercado se puede encontrar una amplia gama de filamentos de Nylon, desde el blando y flexible hasta el duro y tenaz. Se trata de un material idóneo para la creación de piezas flexibles y a la vez resistentes. En cuanto a su post-proceso, el filamento de Nylon puede ser tintado con cualquier tinte de ropa, permitiendo unos acabados personalizados y un elevado grado de perfección. Se puede diferenciar dos tipos de filamento de Nylon:

- **Filamento Nylon de color natural:** Presenta una alta resistencia, acompañada de una elevada flexibilidad y durabilidad, en cuanto a rotura y rendimiento se refiere.
- **Filamento Nylon Translúcido:** Reúne las características del anterior, pero ofreciendo un acabado casi transparente en espesores delgados.

Los principales problemas que surgen de la impresión con Nylon son el alabeo y la consistencia entre capas. En referencia al primer término, el alabeo, es consecuencia tanto de la configuración del material como de su tratamiento. En cuanto a la consistencia entre capas, deberemos prestar atención al factor humedad. Dependiendo del tipo de poliamida

que elijamos, la cantidad de humedad absorbida será distinta, hecho que influirá en las propiedades mecánicas y de precisión dimensional. Por ello, antes de empezar a trabajar con el filamento de Nylon se deberá secar, a ser posible, en un horno durante cuatro horas, a 50-80 °C. Acto seguido, se reservará el material en un espacio cerrado, si es posible con algún tipo de desecante, con el fin de evitar la absorción de humedad del ambiente lo máximo posible.

La impresión del filamento de Nylon se realiza mediante temperaturas que pueden superar los 245 °C, razón por la cual es recomendable la utilización de un hotend totalmente metálico. Durante el proceso de impresión, es probable que salga humo del extrusor, debido al vapor de agua procedente de la propia humedad que posee el filamento. Es aconsejable que la base de impresión esté caliente, entre 30-65 °C, junto con la colocación de BuildTak o Kapton Tape para que se adhiera bien y así conseguir un mejor resultado de impresión (minimizar al máximo el efecto pandeo) [28]. A continuación, se muestra la Figura 27 de lo que se puede conseguir con en Nylon.



*Figura 27. Zapatos de Nylon obtenidos por impresión 3D.*

### 3.5.5 HIPS (Poliestireno de Alto Impacto)

El filamento HIPS, también conocido como “Poliestireno de alto impacto”, es un termoplástico obtenido por polimerización de alta resistencia al impacto. Es un material indicado para realizar piezas técnicas ligeras y de alta calidad. Es resistente a los aceites, grasas y álcalis, pero no al combustible y, al igual que el ABS, soporta mal los rayos UV, por lo que largas exposiciones al sol lo decoloran y vuelven quebradizo. En estado natural del filamento HIPS es de color blanco brillante, si bien suele comercializarse en varios colores, ya que es un material que permite realizar tratados mecánicos sobre él (cromar, pintar, pegar, lijar, etc.).

Es un plástico biodegradable, por lo que no hay efectos adversos cuando se pone en contacto con las personas. Se suele utilizar con frecuencia en los prototipos, ya que tiene una excelente estabilidad dimensional. A parte, presenta una baja conductividad eléctrica, lo que le hace perfecto para usarse como aislante. Por sus propiedades físicas y mecánicas [21] [22], que se mencionarán a continuación, suele usarse en instalaciones de alta frecuencia.

Tabla 5. Propiedades físicas y mecánicas del HIPS [27].

Propiedades físicas y mecánicas del HIPS	
Densidad (ISO 1183)	1,04 g/cm <sup>3</sup>
Tolerancia	±0,01mm
Elongación a la rotura (ISO 527)	45 %
Módulo de elasticidad (ISO 178)	2,5 GPa
Resistencia a la flexión (ISO 37)	440 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción (ISO 527)	230 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la rotura (ISO 34-1)	11 KJ/m <sup>2</sup>
Temperatura de transición vítrea (ISO 306B)	95 °C
Comienzo de fusión	217 °C

Aunque la mayoría de sus propiedades mecánicas y físicas (rigidez, resistencia a tracción y a impacto, estabilidad térmica, etc.) son similares a las del ABS, hay una característica que lo hace diferente respecto a todos los demás, que es su solubilidad en D-Limoneno, permitiendo realizar formas irrealizables con un material de soporte soluble y que se harán realidad una vez se sumerja la pieza en D-Limoneno y el HIPS desaparezca, quedando la pieza sin ningún material de soporte y con una gran calidad superficial (ver Figura 28).

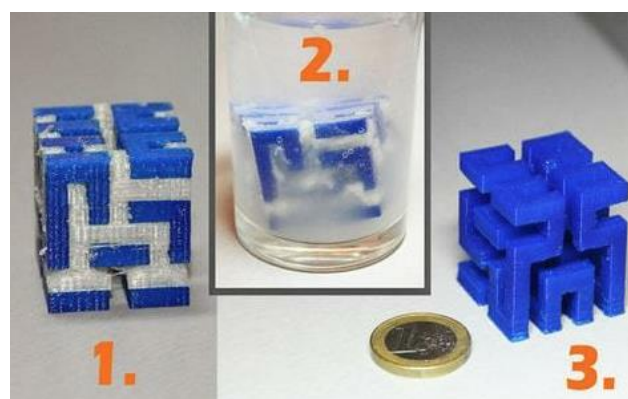


Figura 28. Ejemplo del uso del D-Limoneno sobre el HIPS.

Eso sí, se recomienda, que antes de retirar la pieza de la cama de impresión y ponerla a remojo en un frasco de vidrio con limoneno, esperar a que se enfríe por completo la pieza: el HIPS es más flexible mientras está caliente, así que se podría deformar la pieza si aún no está fría.

El filamento HIPS es un poco más ligero que el ABS, es por eso que se puede imprimir a una temperatura ligeramente inferior. La temperatura de impresión óptima es de 230-235°C. Para evitar el alabeo y los problemas de adhesión, es recomendable que la temperatura de la cama caliente sea de 55-65°C, aunque siguiendo estas indicaciones no es un material dado a presentar problemas durante el proceso de impresión. Una vez finalizada la impresión, se debe esperar a que la pieza enfríe antes de retirarla, para evitar que se pueda producir alguna deformación debido a la temperatura de impresión.

Este material es muy común en la industria alimentaria para el embalaje de los productos. Otro ejemplo de uso del HIPS, es la carcasa en la que vienen empaquetados los discos CD y DVD. Su uso es tan habitual fuera de la impresión 3D que después del polietileno, polivinilo, cloruro, se encuentra entre los polímeros más fabricados en todo el mundo, así que era normal que acabase dentro de los materiales elegidos para ponerlo a prueba [29].

### 3.5.6 XT (Copolíester)

El XT es uno de los materiales plásticos más novedosos en el mundo de la impresión 3D y que se caracteriza por ser considerado como “Food contact approved”, es decir, que puede entrar en contacto con los alimentos gracias a que este plástico no contiene Bisfenol A, compuesto orgánico usado en numerosos plásticos sospechoso de ser dañino para los humanos.

Es un material con unas propiedades excelentes, de gran resistencia mecánica y alta dureza. Entre otra de sus propiedades cabe destacar que los filamentos de XT son totalmente transparentes y sin color, ideal si se necesita un material de alta resistencia o un alto grado de transparencia. Son muy utilizados en la fabricación de todo tipo de botellas plásticas (ver Figura 29).



Figura 29. Granulado de XT para la posterior fabricación en botellas.

El fabricante europeo de filamentos ColorFabb, pionero en este sector, es uno de los encargados en diseñar este filamento. Actualmente, esta empresa está trabajando en la creación de nuevos filamentos XT mezclados con otros materiales, modificando así sus propiedades en función de las necesidades del usuario. A continuación, se detallará una tabla con la propiedades físicas y mecánicas [21] [22] propias del XT.

Tabla 6. Propiedades físicas y mecánicas del XT [27].

Propiedades físicas y mecánicas del XT	
Densidad (ISO 1183)	1,26 g/cm <sup>3</sup>
Tolerancia	±0,01mm
Elongación a la rotura (ISO 527)	180 %
Módulo de elasticidad (ISO 178)	1,9 GPa
Resistencia a la flexión (ISO 37)	65 MPa
Resistencia a la tracción (ISO 527)	48 MPa
Resistencia a la rotura (ISO 34-1)	10,5 KJ/m <sup>2</sup>
Temperatura de transición vítrea (ISO 306B)	72 °C
Comienzo de fusión	250 °C

El XT es un material extremadamente resistente a las temperaturas y a los abrasivos químicos. Aunque la temperatura de deformación (75-80 °C) es algo mayor que la del PLA, las condiciones de impresión son bastante similares. Se recomienda que la



temperatura del extrusor alcance los 240-260 °C con velocidades de impresión ente 40-70 mm/s sobre una placa de construcción calentada (50 °C aproximadamente). Al igual que el PLA, al enfriarse no se contrae y en consecuencia no se tendrá problemas de adherencia y alabeo, de manera que la cama caliente tampoco es necesaria. En este caso, el fabricante aconseja desactivar el ventilador de enfriamiento del filamento extruido durante las primeras capas, para obtener mejores resultados [20] [30].

Todas las propiedades y especificaciones que se han detallado de cada uno de los materiales utilizados, corresponden al material natural, ya que la mayor parte de los fabricantes utilizan aditivos adicionales para mejorarlos, incrementando así las propiedades físicas y mecánicas originales del material.

Tal y como se ha mencionado superficialmente en apartados anteriores, el precio actual que mantienen estos materiales en el mercado, hizo aún más factible el desarrollo y el interés por este proyecto. Los precios varían en función del material. El material más económico que hay en el mercado es el PLA junto con el ABS, rondando los 20-25 €/kg de bobina. En cambio, el precio de Nylon o del Filaflex puede llegar a alcanzar los 70-80 €/Kg. Estos precios están aplicados, como ya se ha mencionado antes, al material en su estado natural, ya que, dentro de cada material en función de los componentes que tenga o con que se mezcle, su precio se verá incrementado.

Otro aspecto determinante, es que el fabricante a predispuesto a disposición del cliente bobinas con diferente, peso para ajustarse mejor a las necesidades de cada uno y resulta poco conveniente adquirir filamentos de segundas marcas, debido a que se puede ver comprometida las propiedades del material, afectando a sus características.

### 3.6 Diseño de las plantillas

Habiendo elegido los materiales con los que se iban a realizar los ensayos, el siguiente paso era diseñar una plantilla con cada uno de los materiales, que tuviese una morfología específica donde poder observar, tras someterlas bajo los efectos de la granalla, posibles fallos o deterioros del material. Para ello, se estableció una serie de criterios elementales de manera que ninguna forma geométrica se quedase sin analizar:

- La plantilla en cuestión no debía ser muy grande, ya que con una superficie de 10 cm<sup>2</sup> se tendría más que suficiente para verificar si el material es óptimo o no, aparte de evitar gastos innecesarios de material y tiempo de fabricación.
- El espesor debía de ser el mínimo posible, siempre y cuando garantizase la protección del útil (2-3 mm aproximadamente).
- La presencia de aristas vivas donde poder observar el comportamiento y desgaste de estas frente a la acción de la granalla. Además, estos elementos iban a permitir observar la precisión que tienen las impresoras 3D a la hora de imprimir formas complejas y minuciosas.
- La incorporación de orificios o elementos de unión donde poder fijar la plantilla a la probeta, evitando así la pérdida y posibles desplazamientos de la misma y garantizando que la zona a proteger, quede bien cubierta sin riesgo a que penetre la granalla. En este caso, al tratarse de ensayos donde la misión principal era observar el comportamiento de los materiales y la capacidad de protección que otorgaba cada uno, se optó por diseñar la plantilla con un orificio por donde introducir un tornillo, dejándola bien fija a la probeta.
- Se creyó oportuno introducir una zona crítica reduciendo el aporte de material, como si de un cuello de botella se tratase, el cual iba a permitir observar el comportamiento de los diferentes materiales en situaciones conflictivas.

Una vez se han tenido en cuenta todos estos factores, se puede pasar a diseñar la plantilla.

### 3.6.1 Herramientas de trabajo



*Figura 30. Autodesk Mechanical Desktop.*

Para poder diseñar las piezas, es necesario crear un modelo 3D previo. Para este proyecto, se ha utilizado el programa conocido como Mechanical Desktop, con el cual se trabaja en esta empresa. Autodesk Mechanical Desktop (ver Figura 30) [31], a diferencia del programa AUTOCAD más extendido del mundo, permite el diseño mecánico en dos y tres dimensiones. Integra los módulos Designer para el modelado de sólidos y ensamblajes en 3D, AutoSurf para el modelado de superficies en 3D y AutoCAD IGES Translator para el intercambio de archivos con otros sistemas de CAD.

Las características del programa son las que podemos encontrar en las aplicaciones más modernas del diseño mecánico. Las operaciones se realizan definiendo las restricciones geométricas, relacionales y dimensionales de las características del modelo, utilizando directamente conceptos típicos de ingeniería, como son el taladro, el barrido, la extrusión, el vaciado, el roscado, etc. que son conscientes de su posición y función, pudiendo ser editadas en su totalidad cambiando una sola dimensión. Otra de sus características importantes, es la utilización de geometría avanzada basada en curvas NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) para crear, editar, ensamblar y analizar superficies básicas y complejas con formas libres.

El programa trata también una de las cuestiones que más utilizan los diseñadores mecánicos; el modelado mediante ensamblaje. Este tipo de modelado permite a los diseñadores trabajar sobre piezas individuales, para posteriormente ser combinadas creando el conjunto mecánico final, observando las posibles interferencias y obteniendo las listas de materiales de los componentes de forma automática. Se pueden obtener fácilmente conjuntos en explosión, de forma que el usuario puede ver con facilidad cómo y dónde se ensamblan cada una de las piezas.

Aunque una de sus virtudes es la utilización de AutoCAD como motor central y, en consecuencia, sus ficheros se guardan en el formato más utilizado en el sector del CAD (DWG), Autodesk Mechanical Desktop soporta varios filtros para la importación y exportación de proyectos y datos, como: IGES, STL, DXF, SAT-ACIS, 3DS, etc. Para este caso en concreto, era necesario trabajar con un programa que permitiese exportar los proyectos en STL, que como ya se ha mencionado en el apartado 3, es el formato de archivo informático necesario para que el programa Cura, cree las interfaces que debe seguir la impresora 3D para fabricar la pieza.

### 3.6.2 Plano

La gestión de los planos correspondientes a un modelo determinado, se realiza con herramientas creadas expresamente para facilitar su control. Existe una asociatividad bidireccional entre el modelo y el dibujo, que permite la actualización automática de un diseño cada vez que se modifica una de las piezas que lo componen, y viceversa.

Se puede ver el plano de la plantilla en el *Anexo*.

### 3.6.3 Tipos de dureza

Para llevar a cabo un mejor estudio de las propiedades elásticas y plásticas de cada uno de los materiales, se realizaron mediciones de dureza sobre las plantillas una vez impresas.

La dureza [32] es la propiedad que tiene los materiales de resistir la penetración de un indentador bajo carga. En este sentido la dureza se define como la resistencia de un material a la deformación plástica localizada. De hecho, se utiliza el término dureza para definir conceptos tan distintos como los siguientes:

- Dureza por rayado.
- Dureza por penetración o indentación.
- Dureza por impacto o capacidad de rebote.
- Dureza por desgaste o abrasión.

Los diferentes métodos desarrollados para medir la dureza en general consisten en producir una deformación local, en el material que se ensaya, a través de un indentador. Los valores obtenidos son siempre dependientes del método y las condiciones en las que se ensaya, por lo que, debe estar acompañado de la indicación del método utilizado y las condiciones del ensayo, para que un valor de dureza sea útil y permita su comparación.

Los diferentes métodos utilizados para obtener los valores de dureza, se pueden clasificar en dos grandes grupos según la forma de aplicación de la carga:

- **Ensayos estáticos:** donde la carga se aplica de forma estática o cuasi-estática. En este caso, un indentador se presiona contra la superficie de ensayo con una carga que se aplica de forma relativamente lenta. La medida de dureza en este tipo de ensayo

resulta del cociente de la carga aplicada y el área de la huella que deja el indentador en la superficie. Este tipo de ensayos es comúnmente usado con los métodos Brinell, Vickers y Knoop, o bien, si es una medida de la profundidad de la indentación, como en el ensayo Rockwell.

- **Ensayos dinámicos:** en los que la carga se aplica en forma de impacto. En general, el indentador es lanzado sobre la superficie a ensayar con energía conocida y el valor de dureza, se obtiene a partir de la energía de rebote del penetrador después de impactar en la muestra, tal y como sucede en el método de Shore y en el de Leeb, ambos conocidos como métodos de dureza por rebote. Si bien, se pueden clasificar en este grupo métodos como el de Poldi, o uno mucho más moderno, el ICU (Impedancia de Contacto Ultrasónico).

En los ensayos dinámicos, los resultados obtenidos son dependientes de las propiedades elásticas del material que se ensaya y, en general, los valores son comparables entre materiales en los que dichas propiedades son iguales, o bien se requiere la calibración del instrumento antes de ensayar un material cuyo módulo elástico es desconocido.

Son múltiples las utilidades que proporcionan los resultados de la medición a la dureza. Gracias a estas mediciones se consigue; analizar la maquinabilidad de un material, comprobar la homogeneidad de un tratamiento térmico, obtener su resistencia al desgaste y realizar una evaluación aproximada de la resistencia a la tracción. En general, la dureza se mide cuando se ha establecido una correlación entre la dureza y alguna otra propiedad del material, como por ejemplo la resistencia a la abrasión o al desgaste, la resistencia a la tracción, etc.

En este caso, al tratarse de un proyecto basado en el ensayo-error no se buscaba un fin en concreto, más bien se ha procurado recabar más información acerca de los materiales empleados. Al tratarse de materiales termoplásticos, se creyó oportuno realizar ensayos dinámicos de dureza mediante el método Shore, ya que se trata de un método específico para este tipo de materiales y su ensayo no es destructivo, dejando la pieza intacta para posteriores usos.

### 3.6.3.1 Método Shore

El método Shore [32] [33], consiste en determinar el rebote que sufre un percutor al chocar contra la superficie que se ensaya (ver Figura 31), cuando se lo deja caer desde una altura determinada o se intenta penetrarlo con un material más duro.

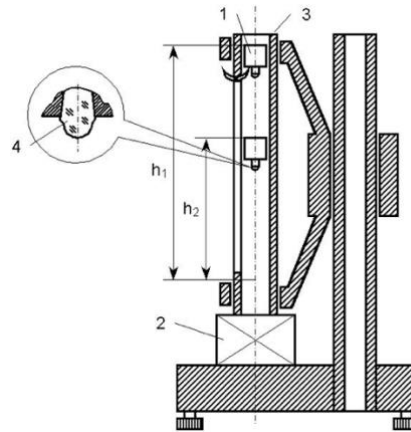


Figura 31. Instrumento para realizar el método Shore.

El percutor utilizado, es de acero duro de forma cilíndrica y punta redondeada de gran calidad, e incluso puede ser de diamante. El percutor, cuyo peso varia de 3 a 7 g, se deja caer desde una altura de 250 mm y la lectura del rebote se hace directamente en una escala de 140 divisiones, en la que un rebote que alcanza 100 divisiones corresponde a un acero templado (martensítico) para herramientas. En la Figura 32 se muestra en forma esquemática el principio de este método. Cuando el percutor cae sobre una superficie, una parte de la energía potencial inicial es absorbida por la deformación plástica que sufre la superficie en la penetración. De esta manera, si el percutor se deja caer en un material blando y en uno comparativamente más duro, el rebote del percutor alcanzará menor altura después de impactar en la superficie del material más blando, ya que habrá una mayor penetración y, por lo tanto, una mayor absorción de energía.

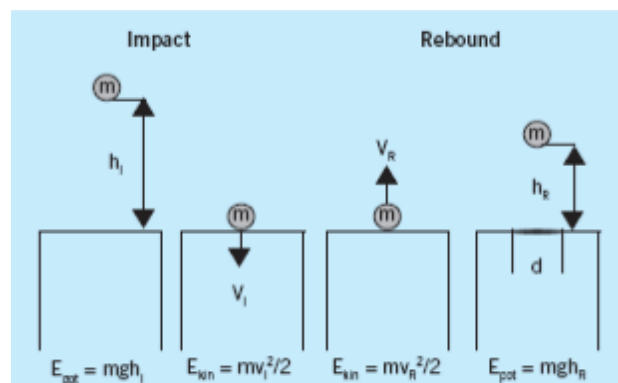


Figura 32. Ensayo dinámico de dureza por rebote.

Existe también el método Shore “*In Situ*”, el cual se ha empleado para realizar las mediciones en este proyecto. Este método permite realizar ensayos directos mediante un durómetro Shore analógico. La medición se realiza introduciendo el percutor en el material de forma manual hasta hacer tope y el valor queda registrado en el indicador de seguimiento (ver Figura 33).



*Figura 33. Medidores Shore "In Situ".*

En ambos métodos existen distintas escalas de medida adaptadas a distintos tipos de material [34]:

- ❖ **ESCALA A** (Gomas blandas, plásticos, elastómeros) Penetrador: Cono truncado 35° de ángulo. Carga 822 g
- ❖ **ESCALA B** (Elastómeros, plásticos duros, papel y material fibroso. Penetrador: Cono 30° de ángulo. Carga 822 g.
- ❖ **ESCALA C** (Revestimientos de yeso o perlita, elastómeros y plásticos de dureza media) Penetrador: Cono truncado 35° de ángulo. Carga 4536 g.
- ❖ **ESCALA D** (Gomas duras y termoplásticos) Penetrador: Cono 30° de ángulo. Carga 4536 g.
- ❖ **ESCALA DO** (Materiales granulares densos y bobinas textiles. Penetrador: Bola 3/32”). Carga: 4536 g.
- ❖ **ESCALA O** (Elastómeros muy blandos, bobinas textiles, materiales granulares blandos) Penetrador: Bola 3/32”). Carga 822 g.
- ❖ **ESCALA OO** (Espumas ligeras, esponjas) Penetrador: Bola 3/32”). Carga: 113 g.
- ❖ **ESCALA OOO** (Geles y esponjas) Penetrador: Bola 1/2”). Carga: 113 g.

A continuación, se detallarán en una tabla los resultados de las mediciones tomadas a los materiales, en función de la escala utilizada.

Tabla 7. Tabla de durezas.

Material	Escala dureza	Valor
PLA	Shore D	73
ABS	Shore D	66
Filaflex	Shore A	77
Nylon	Shore D	63
HIPS	Shore D	74
XT	Shore D	68

### 3.7 Ensayos preliminares

Para poder corroborar cuál de los materiales termoplásticos elegidos es el más óptimo para fabricar el útil de protección, es necesario la realización previa de ensayos, con los que poder observar cuál de ellos se comporta mejor bajo un continuo ataque abrasivo de la granalla.

Se han llevado a cabo tres ensayos. Cada uno de ellos posee una característica diferente, lo que ha permitido recopilar la suficiente información y visualizar aspectos que han sido decisivos para la elección final del material con el que fabricar el útil de enmascarado.

#### 3.7.1 Ensayo 1

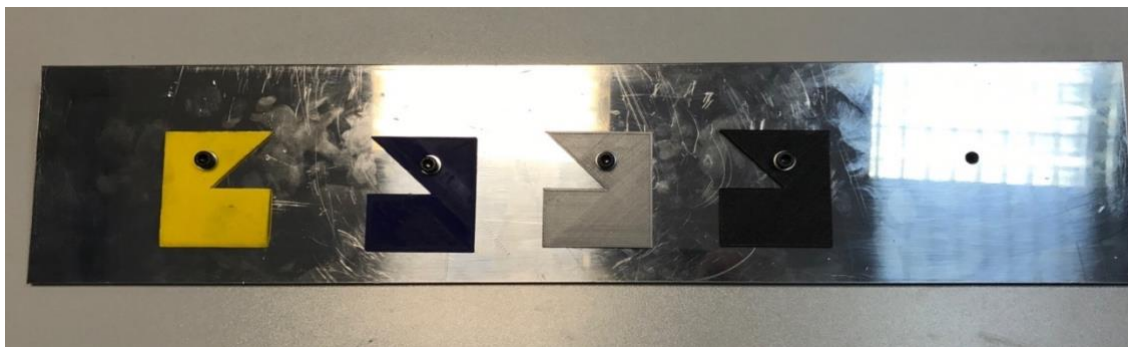
Para este primer ensayo se han analizado únicamente tres materiales: PLA, Filaflex y ABS, ya que solo se dispone de la impresora Witbox 2 que únicamente permite imprimir un número limitado de materiales. A pesar de que solo se ha experimentado con tres materiales, este primer ensayo es el más importante y decisivo. El resultado va a permitir, confirmar si el material polimérico impreso es capaz de soportar la fuerza de la granalla sin degradarse y, por consiguiente, ser aptos para esta investigación.



Los tiempos de elaboración de cada pieza han sido de aproximadamente 1 h y 12 min y se ha empleado un extrusor de 0,6 mm de diámetro. Posteriormente, se han dispuesto las plantillas en una probeta de ensayo, donde han sido sometidas al choque de la bola de acero, para observar su resistencia y la capacidad de protección que otorgan frente a esto.

La placa-probeta pertenece a una parte de la estructura inservible de un Boeing, con un acabado superficial de gran calidad, similar al de un espejo (dato relevante para posteriores conclusiones). Se han dispuesto 4 plantillas en la probeta de forma longitudinal, una de PLA, dos de ABS y otra de Filaflex. El motivo por el que existen dos plantillas de ABS se debe a que se realizaron con la Witbox 2, la cual no es compatible con este polímero. Al realizar un primer intento de fabricación este salió bastante defectuoso, por lo que se llevó a cabo un segundo intento algo más satisfactorio, pero presentando el “efecto de pandeo” que se produce en este tipo de materiales al no disponer de cama caliente.

Dichas plantillas se han fijado a la probeta a través de un tornillo pasante enroscado a una tuerca y en el caso del Filaflex, además del tornillo, se le ha añadido un adhesivo en uno de los lados de la plantilla, ya que al tener poca consistencia y rigidez tiende a levantarse. El hecho de haber incorporado cinta adhesiva no afecta en absoluto al ensayo, sino que permite ver con más detalle el posible deterioro del perfil de la plantilla y comprobar si se rasga o se cuartea con la retirada de la misma una vez finalizado el ensayo (ver Figura 34). Es conveniente cubrir los tornillos y tuercas con cinta americana, para evitar que las bolitas de la granalla penetren en los filetes y se deformen.



*Figura 34. Probeta y plantillas listas para el primer ensayo.*

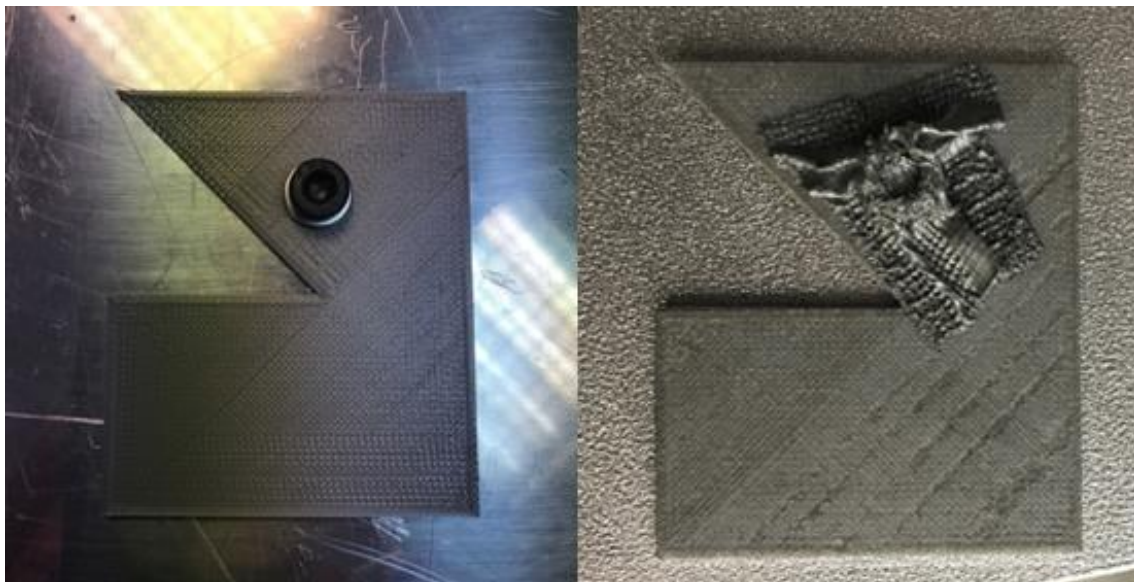
Una vez se ha preparado la probeta de ensayo, se introduce a la máquina de granallado a través de unos railes, donde va sujeta mediante unas bridas especiales. Para este primer ensayo, se ha hecho uso de las dos máquinas de granallado disponibles en la empresa.

Inicialmente, se ha realizado una primera prueba en la máquina 1, que consta de dos pasadas de aproximadamente 30 min cada una. Finalizada esta primera prueba, se ha analizado el resultado visualmente para asegurarse de que las plantillas han permanecido intactas, sin presentar ningún cambio físico en su estructura, y al obtener un resultado tan satisfactorio se ha proseguido con el ensayo. Se han llevado a cabo tres pruebas más, una en la máquina 1 y otras dos en la máquina 2.

Los resultados de este primer ensayo han resultado ser bastante positivos. A continuación, se hará un breve análisis de los aspectos más significativos presentes en los diferentes materiales empleados para este primer ensayo:

➤ **PLA**

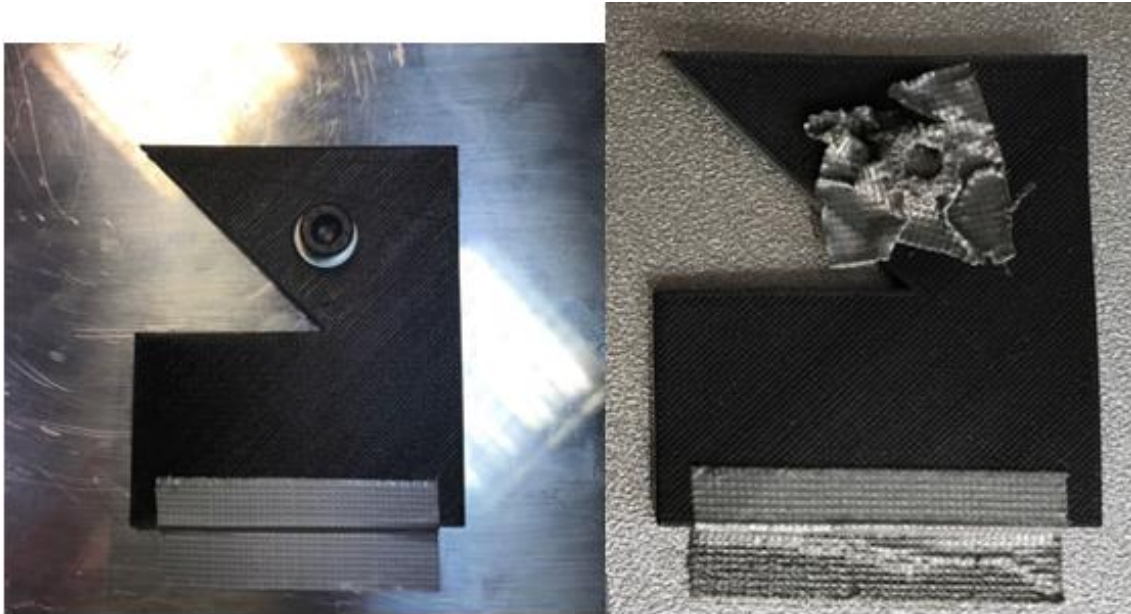
Los resultados obtenidos por parte del PLA han sido sorprendentes. A pesar de tratarse de un material biodegradable con una dureza relativamente baja, su rendimiento ha resultado ser digno de admirar. La granalla no ha pasado por debajo de la plantilla y tanto los cantos, como las aristas vivas, no han sufrido deformación alguna. Sí que se ha observado una pequeña deformación de levantamiento sobre la arista más crítica y un aspecto superficial más áspero y rugoso, pero nada que preocupar. En la Figura 35 se puede ver el antes y el después de la plantilla de PLA.



*Figura 35. Plantilla de PLA antes y después del ensayo respectivamente.*

➤ **Filaflex**

En el caso del Filaflex (ver Figura 36), ha soportado la granalla a la perfección, sin agrietarse ni rasgarse, tal y como se esperaba, pero tiene el inconveniente de que, al ser poco rígido, permite la entrada de la granalla por debajo de la plantilla y, por lo tanto, no cumpliendo la función de proteger el material. Este es un detalle a solucionar.



*Figura 36. Plantilla de Filaflex antes y después del ensayo respectivamente*

➤ **ABS**

Por parte del ABS el ensayo ha sido fallido. Se trata de un material que posee una complejidad a la hora de imprimir, ya que necesita de una cama caliente para compactar bien el material que se va depositando por capas, evitando lo que se conoce como "efecto pando" y en este caso, como ya se ha mencionado anteriormente, la impresora 3D con la que se ha trabajado carecía de ello. Esto ha hecho que las propiedades mecánicas se vean afectadas, produciendo alteraciones estructurales en las capas superiores de la plantilla a cada pasada que realiza la máquina de granallado, tal y como se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Plantilla de ABS antes y después del ensayo respectivamente.

A la hora de retirar las plantillas de la placa-probeta y hacer una valoración de la capacidad de protección que ha proporcionado cada una, se ha observado un detalle de lo más curioso. La probeta de ensayo presenta un acabado superficial de una calidad excelente, lo que ha permitido ver con detalle que, aunque el ABS se ha ido descomponiendo con cada pasada, ha protegido con mejor calidad la superficie de la pieza que el PLA, dejándola menos magullada y con un aspecto muy similar al inicial (ver Figura 38). Se especula que esto, ha podido deberse a la baja dureza que presenta el PLA frente al ABS y ha permitido transmitir esos golpes a la pieza, dejándola marcada y no con el aspecto del acabado superficial que presentaba inicialmente.

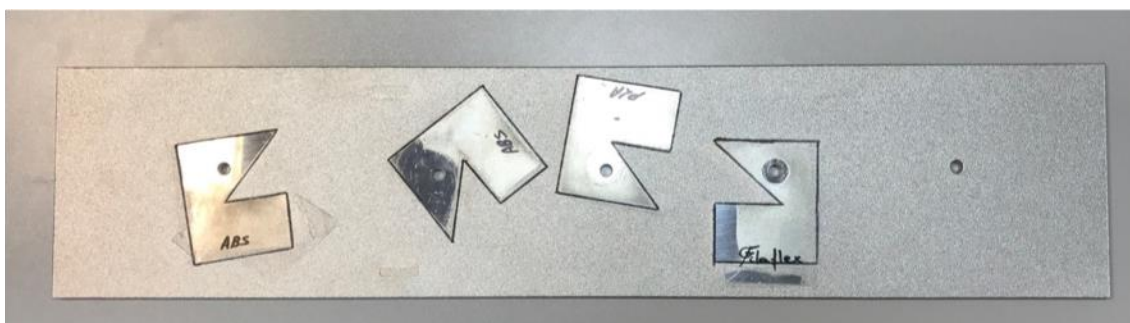


Figura 38. Estado de la probeta una vez finalizado el ensayo 1.

Cabe aclarar, que piezas con acabados superficiales de tan alta calidad no son sometidas al proceso de granallado, pero este hecho crea la incertidumbre de si puede plantearse como un agravante, por miedo a desconocer si este efecto puede comprometer

a las propiedades mecánicas de la pieza y, por lo tanto, una opción a desechar como material para enmascarar piezas con acabados superficiales peores. Este, es otro frente abierto que queda pendiente de estudiar.

Tras finalizar el primer ensayo, se ha llegado a la deducción de que no ha sido muy concluyente, puesto que una de las plantillas ha fallado y las otras dos no han convencido en cuanto a la protección que ofrecen de manera independiente. No obstante, a pesar de la poca información que se ha podido recopilar, los resultados han sido útiles para demostrar y confirmar que estos materiales soportan el proceso de granallado, dato muy relevante y que, gracias a él, se confirma que este proyecto puede seguir adelante.

Debido a los contratiempos que han surgido, se va a realizar un segundo ensayo utilizando tres nuevos materiales (Nylon, HIPS y XT), una nueva pieza de ABS y la combinación del PLA con el Filaflex. Con esta idea, de combinar ambos materiales, se pretende paliar el problema que presenta cada una por separado, la falta de rigidez del Filaflex y la carencia de protección por parte del PLA.

### 3.7.2 Ensayo 2

Valorando los resultados obtenidos en el ensayo 1 y no siendo muy concluyentes, se ha procedido a realizar un segundo ensayo, con la ventaja de disponer de tres materiales nuevos y una nueva plantilla de ABS, pero esta vez, fabricada con la máquina adecuada y respetando las indicaciones del fabricante.

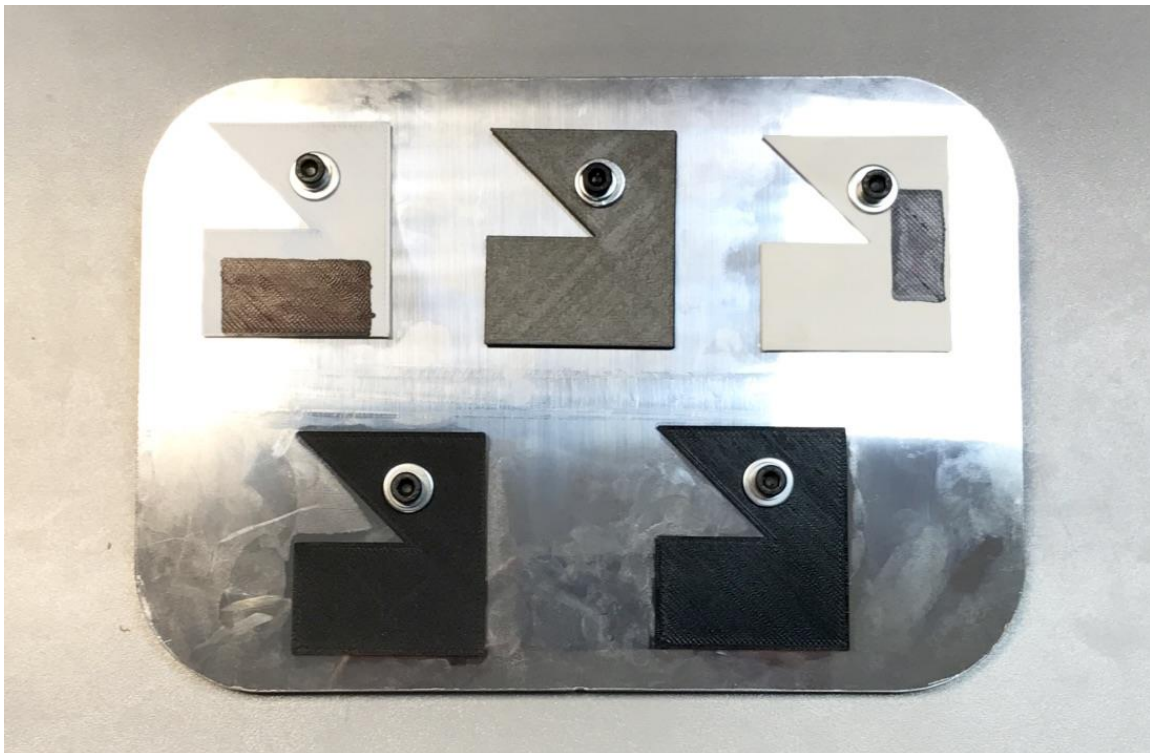
La impresión de estos nuevos materiales ha sido posible gracias a la intervención de un compañero de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), Mikel Uceru Zamarbide, que actualmente se encuentra en una empresa joven especializada en impresoras 3D, localizada en campus de la Universidad Politécnica de Cataluña (Castelldefels). Para la impresión de estas piezas se ha utilizado la impresora BCN3D Sigma, cuyas características vienen detalladas en el apartado 3.2. Los nuevos materiales son: Nylon, HIPS y XT, para los que se ha empleado un extrusor con una boquilla de 0,6 mm y cuyo tiempo de impresión ronda los 30 min por plantilla.

Tal y como se ha mencionado, a estas tres plantillas hay que sumarle una cuarta de ABS y la quinta, y última, que corresponde a la combina de PLA con el Filaflex, superpuesto uno encima de otro como si fuese una única plantilla, de manera que el Filaflex, en contacto con la probeta, amortigüe el impacto de la granalla sobre el PLA,

evitando así posibles muescas sobre la superficie de la probeta, y encabezando el PLA para otorgar esa rigidez y consistencia de la que carece el Filaflex, paliando el problema de que tienda a doblarse o levantarse.

Para este segundo ensayo, al igual que el primero, se ha provisto de una probeta con un acabado superficial de gran calidad, muy similar a la primera, con el propósito de lograr dos objetivos: comprobar si los nuevos materiales tomados soportan la granalla, sin romperse ni degradarse, y observar la calidad de protección que ofrecen sobre la superficie de la probeta frente a las bolas de acero.

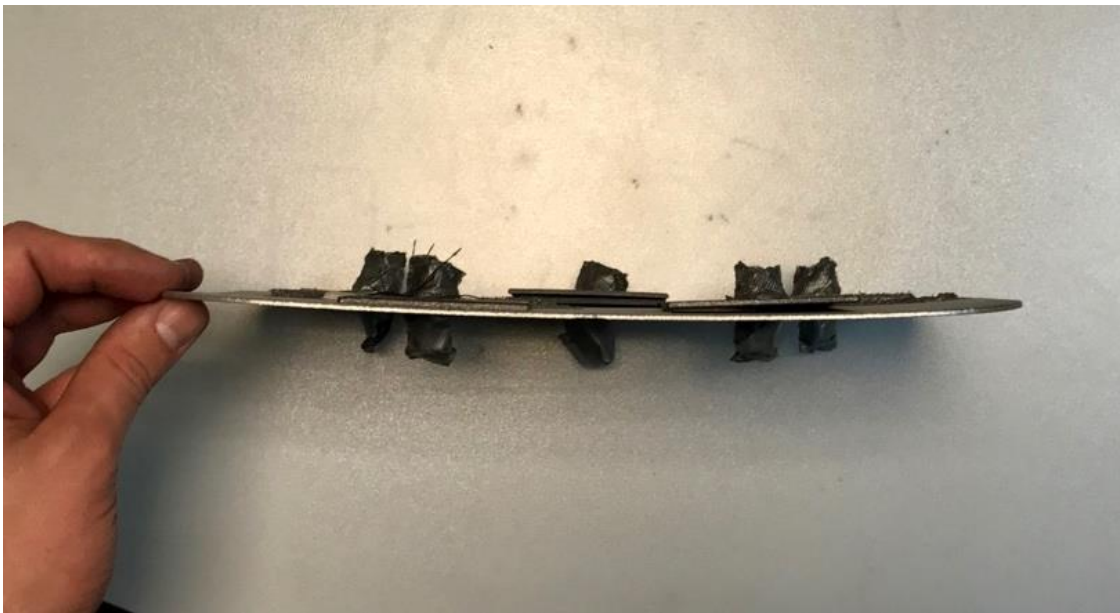
Las plantillas van colocadas en la chapa-probeta de manera aleatoria, colocando cinta americana en alguna de ellas, puesto que al tratarse de una chapa inservible de una pieza rulada no poseía una planitud total y alguna de las plantillas tiende a elevarse. Se ha utilizado el mismo sistema de anclaje que en el ensayo 1 y siempre protegiendo los tornillos y tuercas con cinta americana. En la Figura 39 se muestra las cinco nuevas plantillas preparadas para realizar el ensayo.



*Figura 39. Probeta junto a las cinco plantillas.*

Para este ensayo se han llevado a cabo tres pruebas de dos pasadas cada una, todas ellas en la máquina 2. Al igual que en el ensayo 1, una vez finalizada la primera prueba,

se ha realizado un análisis visual para confirmar que las plantillas inicialmente soportan la granalla y obteniendo un efecto positivo se ha proseguido con el ensayo. Con la finalización de la tercera prueba se ha tenido que dar por concluido este segundo ensayo debido a un contratiempo que se estaba dando en la placa-probeta. Al haber sido previamente rulada y no poseer un espesor lo suficientemente ancho, ha hecho que en cada pasada realizada la placa-probeta tienda a doblarse cada vez más, llegando al punto de que el ensayo resultase ser inconcluyente (ver Figura 40).



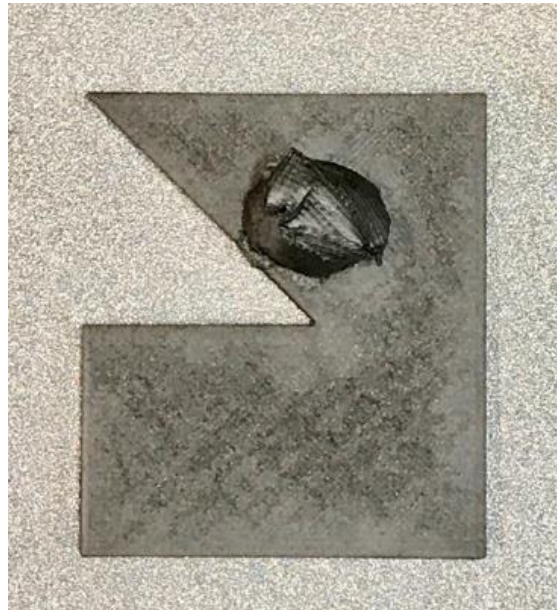
*Figura 40. Placa-probeta doblada por los continuos ensayos.*

A pesar de que el ensayo se ha tenido que suspender, se ha conseguido recopilar información suficiente y clave para tener una pequeña orientación de los materiales que pueden ser los más propicios para este proyecto. Para conocer a detalle los efectos producidos en cada material, se va a realizar una breve descripción de cada uno de ellos:

➤ **PLA + Filaflex**

La idea de combinar dos materiales en una misma plantilla ha resultado ser todo un éxito. Al colocar el Filaflex en contacto con la placa-probeta y protegerle con el PLA, se ha conseguido el efecto que se quería. El PLA le ha otorgado una rigidez al Filaflex que ha evitado la penetración de la granalla por la parte inferior y a su vez, el Filaflex, ha absorbido el impacto de la granalla sobre la plantilla de PLA, haciendo que la superficie de la placa-probeta no quede marcada, paliando así el problema presente.

Cabe destacar que el desgaste del PLA ha sido mínimo y su superficie no ha presentado alteración alguna con respecto al inicio de este segundo ensayo (ver Figura 41).



*Figura 41. Plantilla de PLA + Filaflex después del ensayo.*

➤ **ABS**

Tal y como se había supuesto, en este ensayo se ha podido corroborar que el hecho de que el ABS hubiese fallado en el primer ensayo se ha debido a un error de impresión. La nueva plantilla de ABS se ha comportado de manera excepcional, sin sufrir daño alguno y sin deshilacharse, protegiendo con gran calidad la superficie de la placa-probeta y sin dejar aparentemente muesca alguna (ver Figura 42).



*Figura 42. Plantilla de ABS después del ensayo.*



➤ **Nylon**

A excepción de los demás materiales, este ha sido el único, que al igual que el ABS en el primer ensayo, ha presentado indicios de desprendimiento de los hilos que conforman el material, pero en menor grado. Posiblemente este fallo derive de un ajuste erróneo en los parámetros de impresión, haciendo que el material no unifique correctamente, afectando en las características del material. Es sabido, que el Nylon es el material que más complejidad entraña a la hora de ser impreso, por su facilidad a producirse el "efecto pandeo" y absorber humedades, lo que afecta a la morfología de la pieza, como ha pasado en este caso. En la Figura 43, se puede observar como ha quedado la pieza después de someterla a seis pasadas en la máquina de granallado.



*Figura 43. Plantilla de Nylon después del ensayo.*

En cuanto a la protección cabe decir que, a pesar de que la probeta estaba un poco rulada y era inevitable que alguna bolita penetrase, puede clasificarse de excelente. La probeta seguía manteniendo el acabado superficial intacto, cuando se refiere a la zona donde no ha penetrado la granalla.

➤ **HIPS**

Este material hace honor a su nombre “Poliestireno de Alto Impacto”. Lo asombroso de este material es que al finalizar el ensayo y realizar un análisis general de la pieza, se ha observado que la cara que permanecía en continuo contacto con la granalla ha permanecido intacta, manteniendo el mismo tacto y aspecto que recién impresa.

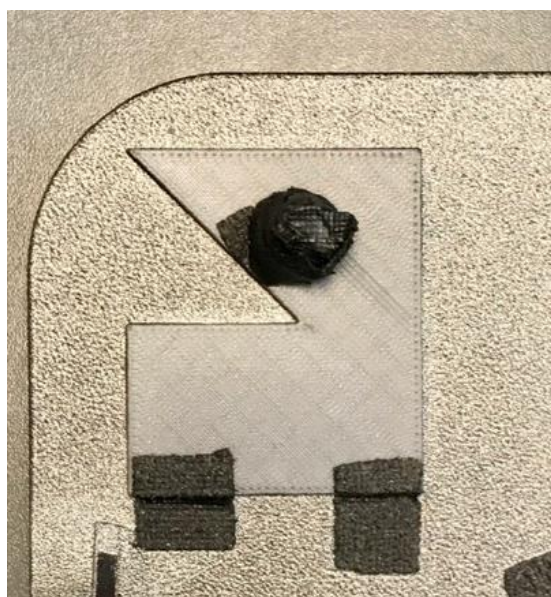
El hecho de que la probeta estuviese un poco doblada, ha hecho que no se pueda valorar objetivamente la capacidad de protección, pero las sensaciones han sido bastante favorables (ver Figura 44).



*Figura 44. Plantilla de HIPS después del ensayo.*

➤ **XT**

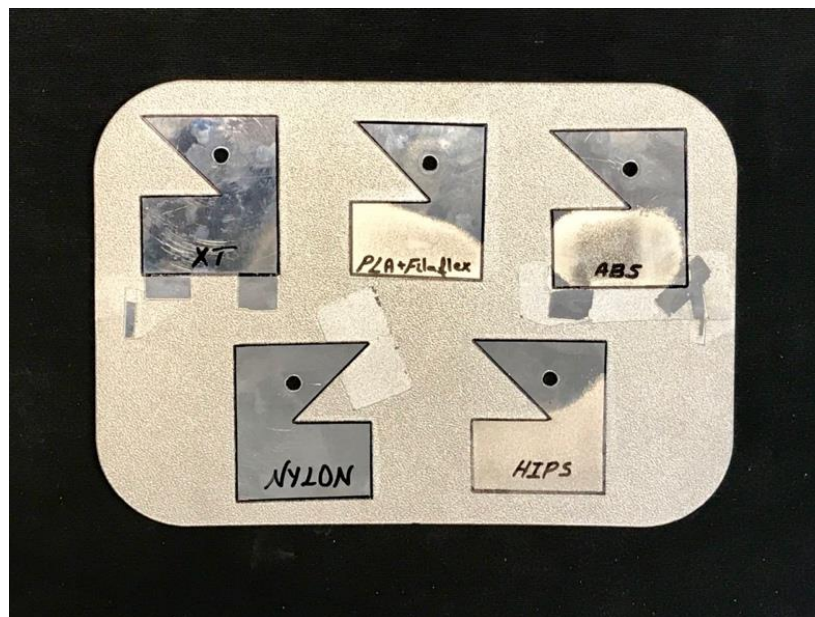
La plantilla de XT, al igual que la HIPS, ha permanecido intacta, sin presencia de alteración alguna (mismo acabado superficial). Al igual que el resto de las plantillas, no se puede realizar una valoración objetiva de su capacidad de protección por el fallo en la probeta. A continuación, en la Figura 45, se muestra el aspecto que mantiene el XT una vez finalizada esta segunda prueba.



*Figura 45. Plantilla del XT después del ensayo.*

Este segundo ensayo no ha aportado ninguna información que pueda ser relevante para la elección final del material. Los resultados referentes en cuanto a la protección no se han podido tomar como una referencia, puesto que al doblarse la placa-probeta, esta no ha sellado bien con la plantilla, permitiendo el paso de la granalla y por consiguiente alterando su resultado.

A pesar de no aportar una información relevante, ha permitido comprobar la evolución sufrida por los diferentes materiales durante el ensayo y tener en consideración, la importancia que tiene conformar el material mediante impresión 3D en base a sus indicaciones y de la forma más perfecta posible. Esta optimización es determinante para obtener unos buenos resultados. A continuación, en la Figura 46, se puede observar como ha quedado la placa-probeta después del ensayo y la correspondiente protección que ha ofrecido cada pieza.

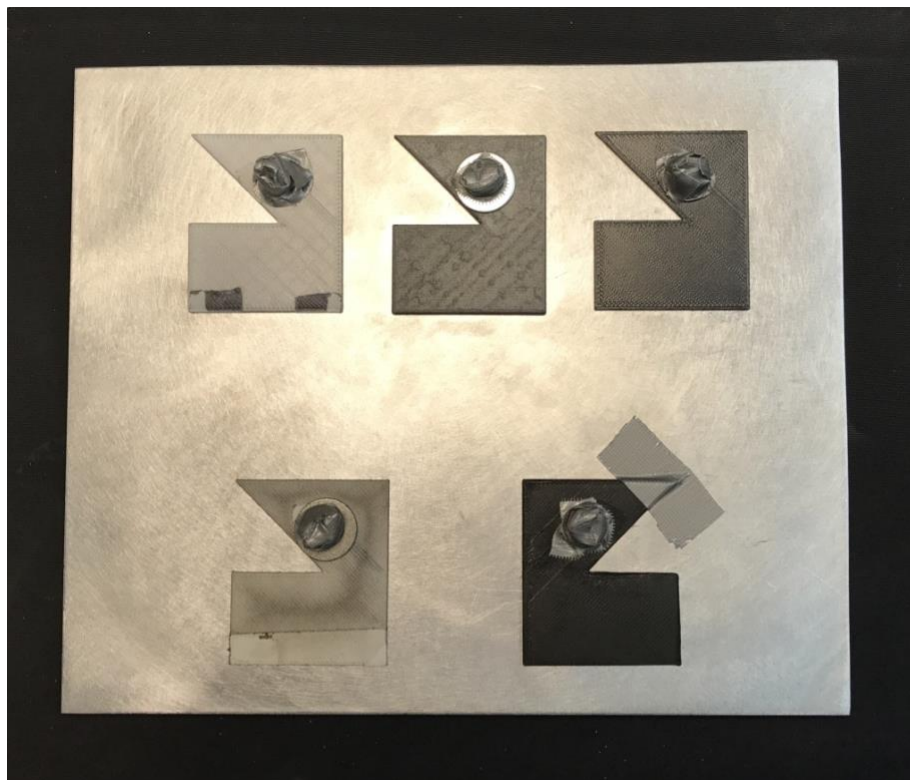


*Figura 46. Aspecto de la placa-probeta después del segundo ensayo.*

### 3.7.3 Ensayo 3

Debido al contratiempo que se ha producido en el segundo ensayo, se ha realizado un tercero y último. Con este ensayo, se pretende evaluar de forma exhaustiva cuál de los materiales seleccionados alberga las mejores condiciones, en función de la resistencia a la granalla, la protección que proporciona a la pieza, la degradación que sufre, el precio en el mercado, la complejidad que puede presentar a la hora de ser impreso, etc., y obtener una conclusión en claro de que material o materiales se van a escoger y cuáles se van a descartar.

Para ello se ha provisto de una chapa-probeta lo más plana y gruesa posible, para evitar su deformación, descartando así posibles errores por falta de planitud y se han seguido los mismos criterios para posicionar las plantillas que en el segundo ensayo (ver Figura 47).



*Figura 47. Plantillas y probetas listas para el tercer ensayo.*

La idea es llevar la resistencia y durabilidad de las plantillas a una situación límite, sometiéndolas durante el máximo periodo posible a la fuerza de la granalla y comprobando su evolución progresivamente.

Durante una semana entera se ha estado introduciendo las plantillas, alternando entre la máquina 1 y la máquina 2 de granallado, de forma ininterrumpida, observando su comportamiento. El hecho de haber empleado las dos máquinas no ha sido por ningún motivo aparente, ya que ambas poseen unos parámetros muy similares, más bien ha sido por aprovechar cada uso en función de la máquina de granallado que estuviese en funcionamiento.

Hasta aproximadamente las dos primeras pasadas, los resultados han sido bastante propicios, tal y como era de esperar. Aparentemente, las plantillas han aguantado bien, sin apenas presentar deformación alguna y en un principio, sus propiedades físicas no se

han visto afectadas. Pero a medida que las pasadas han ido sucediendo, los primeros efectos se hacían visibles. Materiales como el XT y el Nylon han comenzado a sufrir deformaciones plásticas y desgaste en su superficie.

Este problema se ha ido agravando con el paso de las pruebas, hasta el punto de llegar al límite plástico del XT, lo que ha significado la rotura de la misma por su zona más crítica, e incluso en la placa-probeta se ha podido apreciar como ha comenzado a ovalarse ligeramente, perdiendo esa planitud de la que dotaba.

Materiales como el HIPS y el ABS, a pesar de experimentar ligeras deformaciones elásticas, han resistido de manera notable durante todo el ensayo y la combinación de PLA + Filaflex ha sorprendido de forma muy positiva en cuanto a protección y resistencia frente a la granalla.

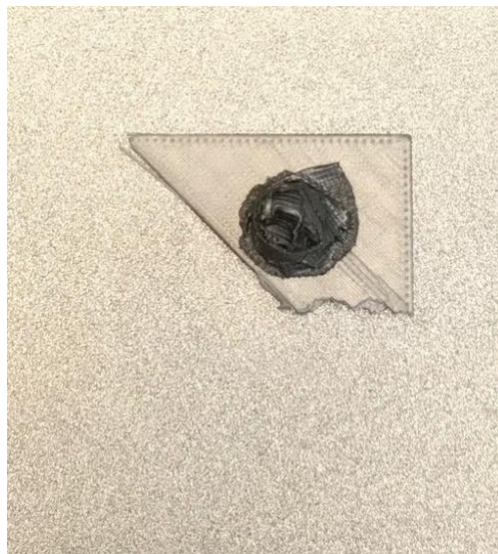
Con esto, además de por qué los resultados han sido muy concluyentes a la hora de recopilar información relevante para esclarecer cual es el material óptimo con el que fabricar el útil de enmascarado, se ha dado por concluido este tercer y último ensayo.

### 3.8 Elección final del material

Los ensayos preliminares han sido un pilar clave para este proyecto. Han permitido recabar suficiente información, como para esclarecer que material cumple mejor los requisitos exhibidos. Ese material juega un papel muy importante, ya que va a ser el elegido para fabricar el útil de enmascarado, con el que proteger la pieza y con el cual se valorará si el proyecto ha sido todo un éxito o un mero trabajo sin fin alguno. A continuación, se ha realizado un análisis minucioso de la evolución que ha sufrido cada material durante los periodos de ensayo:

#### ➤ **XT**

El Copoliéster ha sido uno de los materiales donde comenzaron a reflejarse los primeros efectos de la fuerza de la granalla. Durante las dos primeras pasadas el material aguantó de un modo impecable, otorgando protección a la pieza, pero a medida que las pasadas iban sucediendo los primeros efectos se hacían visibles. La plantilla estaba sufriendo una elevación en uno de sus laterales, lo que permitía que la granalla penetrara por debajo de ella, dejando de cumplir su misión de proteger a la probeta. El problema fue incrementándose hasta que, en una de las pruebas, al sacar la placa-probeta de la máquina de ensayo, la plantilla apareció partida por su zona más crítica (ver Figura 48).



*Figura 48. Plantilla de XT después del ensayo.*

Esta ha sido una prueba más que evidente para descartar este material como posible solución para diseñar los útiles de enmascarado.

#### ➤ **Nylon**

Con el Nylon no se obtuvo nada en claro. Se trata de un material muy resistente, que protege muy bien la pieza de la granalla, pero la gran complejidad que presenta a la hora de ser impreso, lo hace muy vulnerable a la fuerza abrasiva producida por la granalla, produciendo ligeras deformaciones y el desprendimiento de las capas superiores del material que ya empezó a darse en el ensayo 2, pero que fue incrementándose a lo largo del ensayo 3 (ver Figura 49).



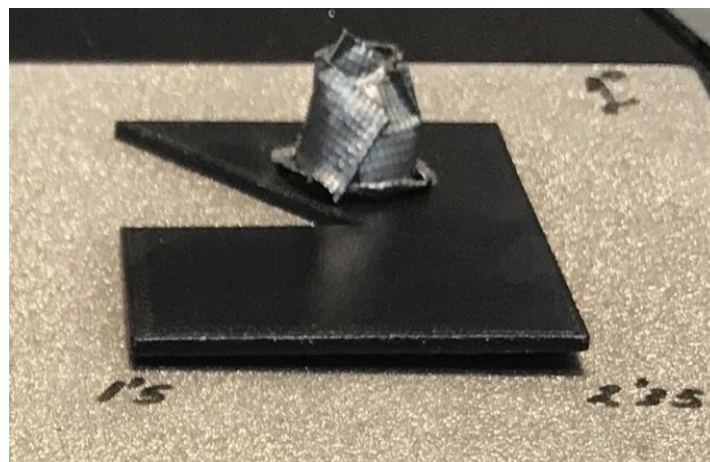
*Figura 49. Plantilla de Nylon después del ensayo.*

Se trata de un material con unas propiedades mecánicas excelentes, mejor que ningún otro polímero que existe, pero esos efectos que se producen, han hecho que por el momento quede apartado de ser una opción como material para proteger las piezas. Se espera que con el tiempo este problema de fabricación se consiga solucionar en su totalidad, ya que puede considerarse como alternativa para otras actividades internas dentro de la empresa.

### ➤ **HIPS**

En cuanto al HIPS se refiere, es un material que da mucho que hablar. Desde el inicio sorprendió su resistencia al desgaste. A pesar de todos los ensayos que se han realizado, la superficie en contacto con la granalla ha permanecido intacta, como si se acabase de imprimir.

Lo curioso es el efecto que se produjo. Inicialmente, se pensó que las deformaciones que iban surgiendo en las plantillas eran plásticas (ver Figura 50), de manera que, por medio de galgas, se fueron tomando medidas para registrar esas deformaciones que sufría en función de las veces que se sometían al granallado, y tener así un análisis de su evolución.



*Figura 50. Plantilla HIPS con supuesta deformación.*

Pero la suposición se desvaneció cuando al retirar las plantillas de la placa-probeta y depositarla encima de una mesa de planitud, se observó que, en el caso de la plantilla de HIPS, esta permanecía totalmente plana, como de no haber sufrido alteración ni deformación alguna (ver Figura 51).



*Figura 51. Plantilla HIPS sin deformación alguna después del ensayo.*

Se ha llegado a la conclusión de que este fenómeno ha podido deberse a que, el continuo choque de la granalla sobre la plantilla, produjese el efecto de depositar las bolitas de acero entre la plantilla y la probeta, justamente en la zona por donde permanecen ancladas, incrementando la presión del tornillo sobre la plantilla y produciendo así la elevación característica que se estaba dando.

Cabe mencionar que, al darse este efecto, la capacidad de protección ha permanecido en todo momento totalmente anulada, permitiendo a la granalla acceder debajo de la plantilla viéndose afectada la probeta, hecho más que considerable para saber que este material no es el más apropiado para utilizarse como solución en este proyecto.

#### ➤ **ABS**

Tal y como se había supuesto, con el segundo y tercer ensayo se ha podido corroborar que, el hecho de que el ABS hubiese fallado en el primer ensayo, se ha debido a un error de impresión. Este fenómeno ha sido un factor clave, para tener constancia de la importancia que tiene imprimir los materiales bajo las más estrictas indicaciones, tanto del fabricante de la impresora, como del material.

La nueva plantilla de ABS se ha comportado de manera excepcional, sin sufrir daño alguno y sin deshilacharse, protegiendo con gran calidad la superficie de la placa-probeta y sin dejar aparentemente muesca alguna. Este comportamiento ha traído una gran atención por este material, ya que no se esperaba que actuase de una manera tan eficaz.



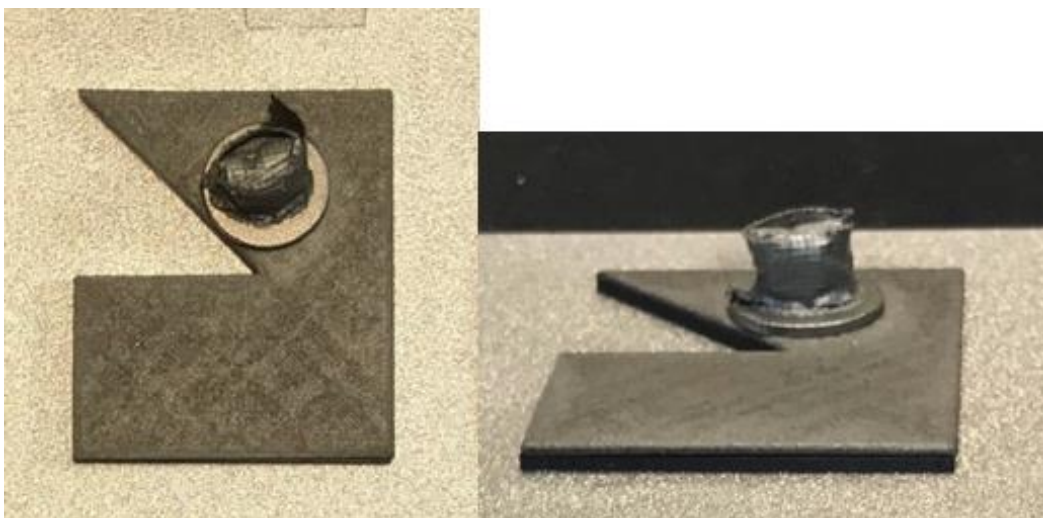
Se ha de mencionar que, en cuanto al aspecto visual, la plantilla ha experimentado un cambio de tonalidad (como se puede apreciar en la Figura 52), ya que inicialmente era blanca y ha pasado a tener un tono grisáceo (del mismo color que el perdigón), pero nada que haya puesto en peligro la integridad física o mecánica de la pieza.



*Figura 52. Plantilla de ABS después del ensayo.*

#### ➤ **PLA + Filaflex**

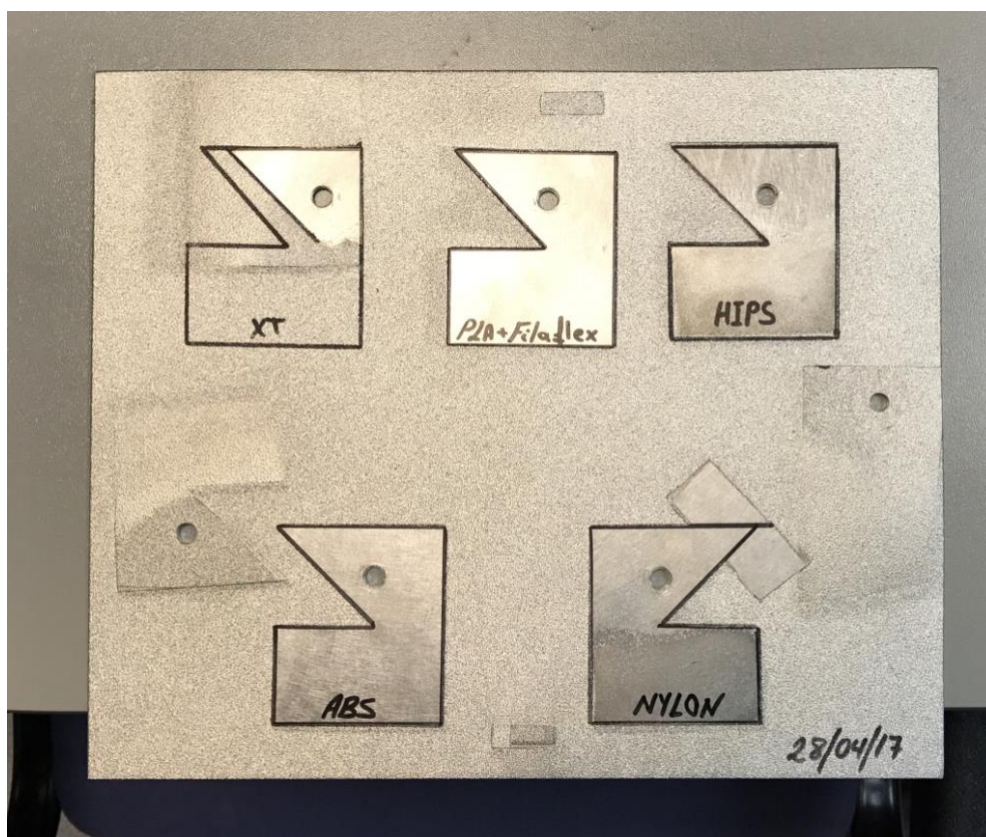
La idea de combinar dos materiales para contrarrestar entre ellos los problemas que presentaba cada uno, ha sido un acierto total. La capacidad de protección que ha proporcionado a la placa-probeta, es inigualable a la de ninguna otra plantilla y su resistencia, se puede equiparar a la de un polímero con unas propiedades mecánicas excelentes, aunque las capas superiores son propensas a sufrir desgaste, presentando un aspecto granulado y rugoso (ver Figura 53).



*Figura 53. Plantilla de PLA + Filaflex una vez finalizado el ensayo.*

En vista al desgaste que estaba sufriendo, se han realizado mediciones del antes y el después de cada ensayo, para llevar un seguimiento de la pérdida de material que estaba sufriendo, pero se observó que apenas se perdían unas centésimas por cada ensayo. A pesar de que el desgaste era mínimo, se han creado especulaciones de la vida útil del PLA o de cuándo puede dejar de ser efectiva su protección en función de la pérdida de material.

A modo de información, se ha recurrido a repasar el contorno de la plantilla con un permanente sobre la probeta ya usada, ayudando a visualizar con mayor precisión, la protección que ha ofrecido cada plantilla en función de la impenetrabilidad que presenta frente a la granalla (ver Figura 54).



*Figura 54. Aspecto de la placa-probeta al final del tercer ensayo.*

Teniendo en consideración el análisis llevado a cabo del proceso evolutivo que han sufrido los diferentes materiales con cada ensayo realizado, se ha concluido lo siguiente; en cuanto a las plantillas de XT, Nylon y HIPS, a pesar de ser unos materiales que teóricamente presentan unas características muy buenas, es más que evidente (gracias a lo reflejado en los ensayos) que no son aptos para este tipo de acciones, por lo tanto,

quedan excluidos de este proceso de selección. A diferencia de los anteriores, como ya se ha mencionado, la plantilla de PLA + Filaflex y la de ABS han sido las que mejor han respondido sin duda alguna. El hecho de que en estos dos materiales se hayan obtenido unos resultados muy similares, ha abierto la puerta al debate de cual es el más idóneo como solución final.

Ambas plantillas son propicias para estas condiciones, pero solamente una de ellas posee un elemento clave para este proyecto y es la capacidad elástica propia del Filaflex, de cual carece el ABS por independiente. A parte de garantizar una protección muy efectiva amortiguando los golpes de la granalla sobre la superficie de la plantilla de PLA, se ha pensado que esa elasticidad, va a permitir al útil de enmascarado adaptarse a superficies con formas geométricas complejas, solventando así posibles errores, tanto de impresión, como del elemento a proteger.

Se ha barajado la posibilidad de sustituir el material superior por otro más resistente, como el ABS o el HIPS, con lo que se conseguiría solucionar el problema de desgaste que sufre el PLA. Pero la complejidad que presentan ambos materiales a la hora de imprimirlos y que en cuanto a la relación calidad-precio sigue estando a la cabeza el PLA, ha llevado a decantarse definitivamente por fabricar el útil de protección usando la combinación del Filaflex con el PLA, tal y como se ha predispuesto desde el inicio. A parte de las razones aportadas por las que se ha decantado fabricar el útil de enmascarado combinando PLA y Filaflex, es por mantener un compromiso con el medio ambiente, ayudando a bajar los índices de contaminación al usar material biodegradable, como es el caso del PLA.

No obstante, aunque el útil de protección se va a fabricar combinando estos dos materiales, no se descarta que en un futuro, con la implantación de avances que mejoren el proceso de impresión, se replantee esta opción, pudiendo sustituir el PLA por materiales más resistentes como el HIPS o el ABS.

### 3.9 Pieza a enmascarar

Los buenos resultados obtenidos durante los ensayos han posibilitado la continuación y el interés de seguir desarrollando este proyecto. Una vez se tiene constancia del material con el que se va a fabricar el útil de enmascarado, hay que elegir la pieza que se va a usar como modelo. Para ello, se ha de tener en consideración la limitación establecida por la bandeja de impresión propia de cada impresora 3D, es decir; el útil a fabricar nunca puede exceder el área máxima de impresión que tiene por defecto cada máquina, que es de 250 mm<sup>2</sup> aproximadamente. Aunque esto limita mucho, no cabe ninguna duda que en los próximos años surjan en los mercados impresoras 3D de tipo industrial, capaces de incrementar el volumen de impresión y rapidez, así como su aplicación y mejora tanto en materiales estructurales convencionales como en otros alternativos.

La empresa ha proporcionado al autor de este proyecto una pieza que tienen en stock, pero debido a que ha sufrido evoluciones (el nuevo modelo presenta ligeros cambios con respecto al antiguo), resulta inservible y por lo tanto puede ser empleada para este experimento. En la Figura 55, se puede observar la geometría completa de la que se caracteriza esta pieza.



*Figura 55. Pieza para la que se va a fabricar el útil de enmascarado.*

La pieza es un componente perteneciente al fuselaje de un Airbus A330 y se caracteriza por presentar un nervio central, que la atraviesa de lado a lado, y por una sucesión de taladros sobre los salientes alados a ambos lados del nervio, a parte de otros elementos geométricos. Además, posee el tamaño propicio para el ensayo. Con la pieza ya adjudicada, lo siguiente que se ha de hacer es definir el perímetro que se va a proteger

del tratamiento. En la Figura 56 se detalla la zona que va a ser protegida mediante un sombreado con permanente negro.



*Figura 56. Pieza con la zona detallada a proteger.*

### 3.9.1 Proceso de fabricación

A continuación, se mostrará paso a paso el proceso de fabricación que sigue la pieza, desde que llega el material, hasta que el cliente recibe el producto ya finalizado:

#### **RECEPCIÓN**

Se recibe el material de la empresa encargada de suministrar materiales específicos para el sector aeronáutico y se llevan a cabo todas las operaciones previas al mecanizado; registrar el boleto de recepción y anotar el número de chapón recibido.

Para la fabricación de esta pieza se ha usado planchas de acero 40CDV12, muy típico en el sector aeronáutico por su alta resistencia a la tracción, su dureza y su rigidez, a parte de ser un material que presenta mucha facilidad a la hora de trabajar con él.

#### **MECANIZADO**

Desde el departamento de ingeniería, los programadores son los encargados de crear el diseño que las máquinas por control numérico han de seguir, para mecanizar las piezas deseadas, sobre las planchas de acero.

Una vez que las piezas están mecanizadas, se preparan para ser transportadas a la empresa subcontratista encargada de realizar los procesos que la preceden.

### ***REPASO***

Desde la subcontrata, se encargan de realizar el redondeo de las aristas vivas presentes en la pieza.

### ***VERIFICACIÓN***

Una vez esta finalizada la labor de repaso, se realiza una verificación manual de todas las piezas, comprobar que todo está en orden antes de volver a ser enviadas a MASA.

### ***EXPEDICIÓN***

Para que la expedición de la carga sea segura, se protege el paquete con papel, cartón o polietileno. Posteriormente, se embala y se envía a MASA.

En el proceso de expedición por parte de una subcontrata, es muy importante inspeccionar la mercancía para evitar la presencia de elementos extraños que puedan dañar o interferir en la calidad del producto.

### ***VERIFICACIÓN***

Una vez se han recibido las piezas, desde la empresa se vuelve a realizar una segunda verificación para corroborar que todo está correcto y con su correspondiente documentación.

### ***PROTECCION TEMPORAL***

Se protegen las piezas temporalmente según AIPS02-04-001, hasta nuevas instrucciones.

### ***EXPEDICIÓN***

Para enviar la carga al pabellón de procesos finales es necesario, al igual que antes, proteger toda la mercancía con papel, cartón o polietileno y finalmente embalarla.

Siempre que se realizan expediciones, es necesario inspeccionar la carga para evitar la presencia de elementos extraños que pongan en compromiso la integridad física de la mercancía.

### ***RECEPCIÓN***

Una vez se recibe la mercancía, se llevan a cabo todas las operaciones previas necesarias antes de ser tratadas.

### ***HOT ALUMINIUM BLASTING***

Se lleva a cabo el proceso “hot aluminium blasting” según AIPS02-03-004 (ADET 0180).

### ***IMPRIMACIÓN***

Después del tratamiento, se trasladan las piezas a la sección de pintura donde inicialmente se le aplica la imprimación. La pintura empleada es P60-A.

Durante este proceso se debe realizar un registro tanto de fecha y hora de inicio, como del final.

### ***PINTURA DE ACABADO***

Cuando la imprimación ha secado, se aplica la pintura de acabado F70-A y se cuelgan hasta trasladarlas a verificación.

Al igual que en el proceso anterior, en todo momento tiene que estar registrado la fecha y la hora en la que inicia y se finaliza este proceso.

### ***VERIFICACIÓN FINAL***

Las piezas ya finalizadas, se transportan a verificación donde se realiza un examen exhaustivo según ABD0003 de la pieza que permite determinar si el producto final es apto o no.

### ***EXPEDICIÓN***

Las piezas ya finalizadas, se vuelven a enviar a MASA en su correspondiente embalaje, protegidas de todo agente externo que las pueda dañar.

### ***VERIFICACIÓN***

Se comprueba que toda la documentación aplicable está en orden y que las rutas que han seguido las piezas están todas especificadas.

## **GUARDAR EN ALMACÉN**

Con el producto ya finalizado y revisado, se guarda en el almacén a la espera de ser utilizadas para el montaje del avión.

Durante todo el proceso de fabricación de la pieza, esta debe ir acompañada de una identificación individual, que se asemeja al DNI de las personas, donde queda registrado todos los procesos que se han realizado en la pieza, quién los ha realizado y dónde. Esto permite identificar en todo momento cualquier anomalía que se diese durante el proceso de fabricación o a posteriori.

### **3.10 Diseño y fabricación del útil de enmascarado**

#### **3.10.1 Diseño**

Para que el departamento de ingeniería pueda realizar los requisitos exigidos por parte de los clientes, disponen de programas asistidos por ordenador, como el CATIA V5 [2], necesario para visualizar las piezas que mandaba el cliente y empleado para la programación del proceso de mecanizado, que deben llevar las máquinas de control numérico para fabricar las piezas. A parte de estas aplicaciones, este programa de diseño permite extraer los modelos 3D de las piezas, necesarios para otras actividades.

Para este caso en concreto, ha sido elemental realizar esta operación, ya que ha facilitado la obtención del modelo 3D de la pieza, con el que posteriormente se va a trabajar en el programa Mechanical Desktop. Desde este programa se ha llevado a cabo el diseño del útil de enmascarado, ya que resulta mucho más cómodo trabajar con el Mechanical Desktop que con el CATIA V5. Realizar el diseño no ha resultado muy complicado, puesto que ya se tenía previamente el modelo 3D y a partir de ese boceto se han ido generando los útiles. Se han diseñado exactamente cuatro plantillas, dos para la zona superior y otras dos para la zona inferior, de las cuales, dos de ellas van a fabricarse de PLA y otras dos de Filaflex. Las plantillas de Filaflex son las que primero van colocadas sobre la pieza y a modo de protección y consistencia se encajan las de PLA, acoplándose unas con otras y sellando por completo la zona libre de tratamiento. En el *Anexo* se muestra los planos de las piezas fabricadas.

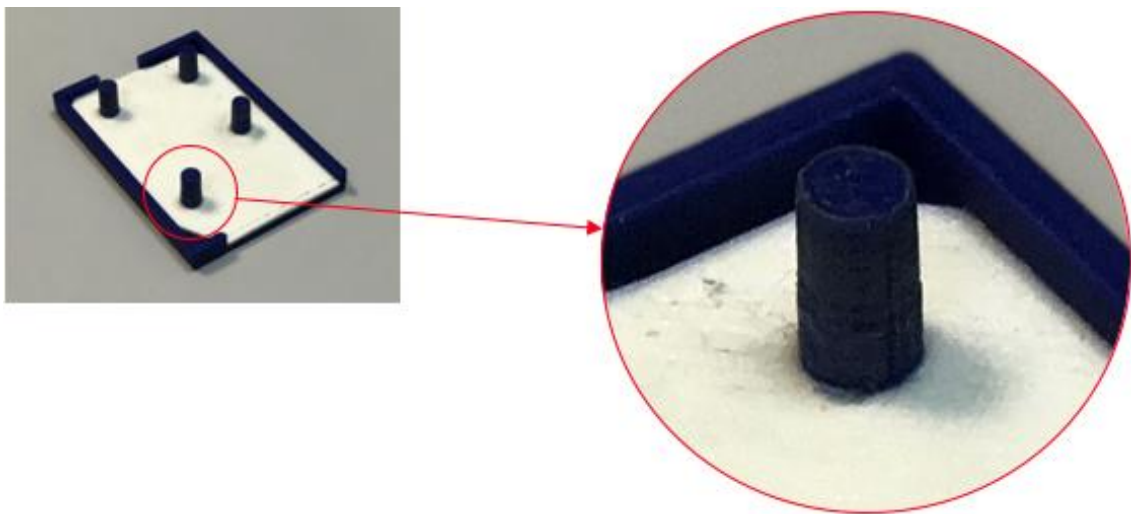


### *3.10.1.1 Elementos de anclaje*

A parte del diseño de los útiles de enmascarado, se ha creído oportuno plantear diferentes alternativas que faciliten el procedimiento de sellado entre el útil superior y el inferior, asegurándose la estanqueidad de la pieza por completo.

El diseño de un útil de protección con un elemento de sujeción innato, aun facilitaría más las labores del operario, sin necesidad de recurrir a otras herramientas, pero, sobre todo, reduciendo los tiempos de producción. Se han planteado dos alternativas para esta pieza en concreto:

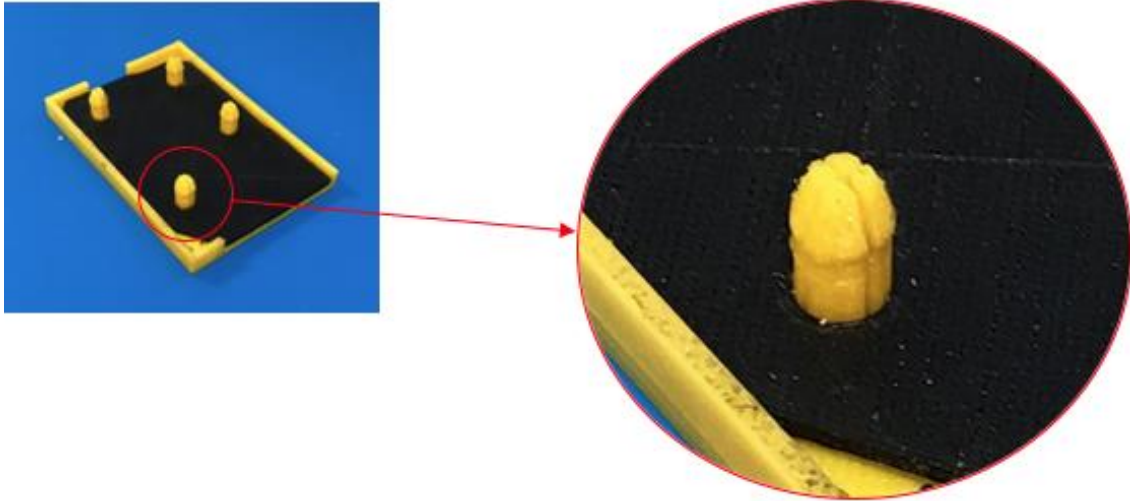
- 1) Aprovechando que la pieza posee unos taladros en sus salientes alados y que justamente cuatro de ellos están dentro de la zona a proteger, se ha creído oportuno hacer uso de esos elementos para plantear esta primera alternativa. Se ha pensado diseñar unos cilindros, en el útil inferior de PLA, de un diámetro igual al diámetro interior del taladro que hay en la pieza, de modo que, los demás elementos que tienen los orificios, se vayan introduciendo hasta que todo quede bien sellado (ver Figura 57).



*Figura 57. Detalle del anclaje en forma de cilindro junto al útil inferior.*

A priori, se espera que esta solución de resultado, pero se teme que los elementos que se introducen en estos cilindros no queden bien ajustados, produciendo un juego entre ellos y facilitando la entrada de perdigón.

- 2) Para la segunda alternativa también se ha mantenido el mismo criterio de aprovechar los orificios que tiene la pieza para diseñar el elemento de seguridad. La idea principal se sigue manteniendo, pero esta vez los cilindros se van a sustituir por un enganche rápido en forma de “click”, como se puede observar en la Figura 58.



*Figura 58. Detalle del enganche rápido en forma de “click” junto al útil inferior.*

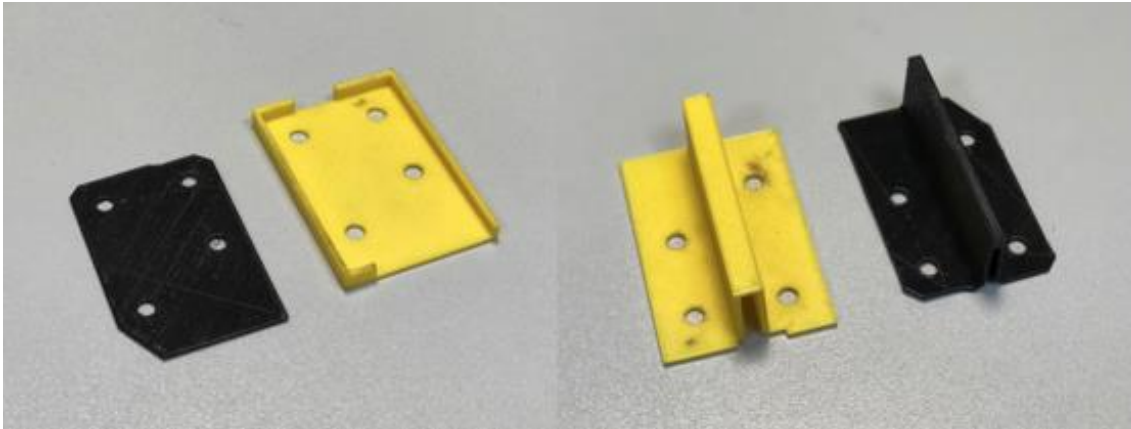
La duda que plantea esta solución es que, al ser el diámetro del taladro tan pequeño, las patillas que conforman el elemento de sujeción se partan y dejen de cumplir su función.

Como recurso a estas alternativas, en el caso de que den algún error, se eliminará el elemento de anclaje y se efectuará un orificio con la ayuda de un taladro, por el que se hará pasar un tornillo que albergara todo el conjunto, haciendo el efecto de elemento de unión.

### 3.10.2 Fabricación

Se han llevado a cabo dos impresiones completas del útil de enmascarado, cada una de ellas con una impresora diferente.

- ❖ Con la Witbox2 se han realizado 4 piezas, dos de PLA (amarillo) y dos de Filaflex (negro), todas y cada una de ellas por separado y se ha hecho uso de la segunda opción, utilizar el enganche rápido en forma de “click” (ver figura 59).



*Figura 59. Útil inferior y superior de la pieza respectivamente.*

La impresión no ha presentado ninguna dificultad, ya que inicialmente se pensaba que, al imprimir el elemento superior del útil, tanto el PLA como el Filaflex, podía dar algún problema en la zona que tiene voladizo, pero afortunadamente no ha resultado necesario fabricar ningún soporte porque no se ha producido una concavación del material, agilizando así el proceso de fabricación.

Otra alternativa que se había barajado en el caso de que esta opción hubiese dado problemas es imprimir el útil superior en vertical, pero esta opción se desestimó al instante por temor a que los elementos de anclaje saliesen defectuosos.

En cuanto al elemento de anclaje, nada que objetar, aunque se estima que se rompa con facilidad al hacer uso de él.

- ❖ El otro útil se ha fabricado con la BCN3D Sigma. La gran ventaja de esta impresora es que permite mezclar dos materiales gracias a su doble cabezal, de manera que se ha aprovechado esta gran ventaja. En primer lugar, el extrusor número uno va depositando la capa de PLA y en el momento que sea necesario entra en juego el segundo extrusor con Filaflex, que en contacto con el filamento caliente de PLA se funden formando una sola pieza que reúne las propiedades de ambos materiales.

Se han fabricado tres piezas, dos elementos inferiores, con cada una de las opciones de anclaje planteadas, y un elemento superior, debido a que el diseño del elemento superior es viable para los dos elementos de anclaje propuestos. En la Figura 60 se muestra los tres útiles creados con esta impresora.



Figura 60. Útiles inferiores de "click" y cilindro (izquierda) y útil superior de fijación (derecha).

Al igual que con la Witbox2, la BCN3D, no ha presentado ningún contratiempo a la hora de imprimir la zona del voladizo, ni de los elementos de anclaje. Por lo tanto, nada más que refutar en cuanto a la fabricación de este segundo útil de enmascarado.

La situación de poseer dos útiles de protección fabricados de dos métodos diferentes, ha abierto el debate de las ventajas y desventajas que puede presentar cada uno de cara a su puesta en práctica. Desarrollando una valoración inicial, antes del ensayo, cabe decir que resulta muy cómodo tener los dos materiales en una misma pieza, por no mencionar que el tiempo de fabricación resulta menor que por separado. No obstante, se ha de esperar a los ensayos para realizar una valoración objetiva en cuanto al nivel de protección, que es la materia que más concierne a valorar.

### 3.11 Ensayo finales y discusión de los resultados

Una vez impresos los dos útiles, se ha dispuesto a hacer uso de ellos, lo que va a permitir verificar su calidad, pero sobre todo su funcionalidad.

Nada más dar comienzo a las pruebas, ya han surgido las primeras pegas en cuanto al diseño de los anclajes se refiere, en concreto, con el de cierre rápido en forma de "click". Al encajar cada útil en su correspondiente posición y finalmente colocar el útil que posee los elementos de anclaje, estos han cedido muy fácilmente hasta el punto de romperse. Este incidente era de prever puesto que, al ser tan pequeño el elemento de anclaje, el aporte de material es muy escaso, reduciendo su resistencia a la manipulación.

Como solución a este inconveniente, se ha recurrido a la opción alternativa. Se han retirado todas patillas que conforman el elemento de anclaje y se ha efectuado un orificio en sustitución a éstas con la ayuda de un taladro, por el que se ha introducido un tornillo

con cabeza avellanada (DIN 7991) que atraviesa a todo el conjunto dejando fijada la pieza. Para evitar que el tornillo se pierda y efectuar el apriete del útil de protección para que quede todo bien sellado, se ha empleado una tuerca ciega hexagonal alta (DIN 1587) (ver Figura 61).



*Figura 61. Pieza y útil con sus elementos de fijación.*

El porqué de una tuerca ciega, se debe al simple hecho de que se evite tener que proteger dicha tuerca con cinta adhesiva, ya que no permite que entre el perdigón por la parte superior. Este elemento de seguridad no es tan práctico como si fuese un elemento propio del útil, pero lo que, si es cierto, es que transmite muchísima más seguridad que ningún otro. En cuanto al otro elemento de anclaje, ha encajado a la correctamente, ajustándose perfectamente a la pieza. En las siguientes ilustraciones se puede observar como ha quedado la pieza al ser protegida por los útiles diseñados.

### 3.11.1 Ensayos

Con las piezas ya listas, se ha procedido a realizar los ensayos cuyos resultados serán vitales para el futuro de este proyecto.

Al igual que se hizo con las plantillas, con los útiles se han realizado varias pruebas, alternando entre la máquina 1 y la máquina 2 de granallado. Se han realizado dos pasadas por cada máquina, haciendo un total de cuatro, de aproximadamente 35 min cada una.

El rendimiento obtenido ha sido impecable, en cuanto a la calidad de la protección y a la resistencia de los útiles, bajo la fuerza erosiva de la granalla. Con la retirada del conjunto de los railes, una vez finalizados los ensayos, se ha procedido a realizar un escaneo visual de su aspecto físico. A pesar de que la superficie del PLA, como ocurría

con las plantillas, presenta una textura áspera, no se aprecia deterioro alguno. A parte, hasta que no se ha retirado el útil de la pieza, no se ha podido determinar su efectividad. Al tratarse de una pieza mecanizada sobre aluminio, no se aprecia con muchísima claridad la zona tratada (ver Figura 62). Sin embargo, ha sido suficiente como para observar el excelente nivel de protección que ha proporcionado el útil a lo largo de todo el contorno, creando una frontera perfecta entre la zona tratada y la no tratada, sin difuminación ni sombreados.



*Figura 62. Piezas junto a sus útiles ya tratadas.*

Con este último ensayo y obteniendo unos resultados de lo más alentadores, se ha dado por concluido todas las pruebas a realizar y por consiguiente el presente proyecto.

### 3.11.2 Análisis general

Realizando una evaluación global de este último ensayo se puede tachar de satisfactorio.

El diseño de los útiles se ha efectuado de manera exitosa, encajando a la perfección en las piezas. No obstante, es necesario realizar una breve valoración de los elementos de anclaje. Es cierto que el anclaje rápido en forma de “click” ha resultado ser poco útil, pero se cree que, en zonas con mayor aporte de material, donde los taladros tengan un diámetro mayor, o se utilice otra alternativa de diseño a este sistema, puede ser bastante útil. Aun así, mientras se sigue investigando mejorar el sistema de anclaje, se puede hacer uso de las otras dos alternativas propuestas que han resultado ser bastante fiables.



En cuanto a la resistencia del material sobre la granalla, ha resultado ser bastante más efectiva de lo que se esperaba. El material ha resistido de un modo intachable, pero se ha de recalcar la importancia que tiene efectuar una correcta impresión del material, ya que, si esto no se cumple, los resultados pueden verse totalmente afectados, como se ha reflejado en unos de los útiles. Los parámetros de impresión no han sido los más acordes y en el útil superior, impreso con la BCN3D Sigma, ha aparecido una cavidad, producto del continuo choque del perdigón contra esa superficie. Aún así, la protección asistida del útil sobre la pieza, ha sido la adecuada, manteniendo una clara línea divisoria entre la zona protegida y la que no, sin presencia de efectos extraños ni nada similar.

Referente al dilema presentado en el punto anterior, sobre si es mejor tener el PLA y el Filaflex en una misma pieza o por separado, sigue manteniéndose en el aire, porque la calidad de protección de ambos útiles ha sido igual de buena, así que, en este sentido, no se puede determinar nada.

En condiciones generales, se puede decir que todos los aspectos abordados han creado una perspectiva prometedora en esta materia, con el afán de seguir progresando y mejorando dicha investigación.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN



## **Conclusiones**

**“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES  
DE ENMASCARADO PARA PROCESOS  
DE GRANALLADO”**



## **IV. Conclusiones**

El estudio que se ha llevado a cabo con este Trabajo Fin de Grado, pretende plantear una alternativa al método que actualmente usa la empresa para proteger las piezas del proceso de granallado. Para ello, se ha diseñado y fabricado, por medio de la impresión 3D, útiles de protección con materiales termoplásticos, que previamente han sido testados para saber cuál de ellos resiste mejor la fuerza abrasiva de la granalla, y que actuarán de escudo, dejando libre solo aquellas zonas de la pieza que han de ser tratadas. Gracias a esta solución adoptada, se va a conseguir reducir el tiempo, que actualmente emplean los operarios para proteger las piezas, lo que se va a traducir en un incremento de la productividad dentro de la empresa. Tras el trabajo realizado durante estos meses, se puede llegar a una serie de conclusiones que a continuación se exponen.

- En el momento que se planteó la impresión 3D como la mejor alternativa, persistía la duda de que esta opción, se viese repercutida por su limitación en cuanto al tamaño de fabricación de los útiles de enmascarado, pero los resultados obtenidos han sido tan propicios, que se especula aplicar este método de fabricación en otros procesos de la empresa. Además, a medida que se ha ido recabando más información sobre esta temática, se sabe que es una materia en continuo desarrollo, con vistas a expandirse cada vez más en el sector industrial.

- En el instante que se tuvo que decidir el material para fabricar el útil de enmascarado, se decantó por utilizar el PLA combinado con el Filaflex, aparte de la protección que otorgaba, por motivos económicos y de calidad, en cuanto a la impresión del material se refiere. Aun así, esta alternativa podría modificarse en un futuro, cuando la tecnología basada en la impresión 3D este más avanzada y se consiga fabricar materiales con mejores propiedades físicas, como el HIPS o el ABS, con los que también se obtuvieron unos buenos resultados, con la calidad y el precio del PLA.

- Cabe mencionar y recalcar la importancia que tiene realizar una buena impresión del material, utilizando siempre los parámetros predeterminados por el fabricante para cada material. Con los numerosos ensayos que se han realizado, se ha comprobado como el mínimo error en la configuración de la impresión del material, puede influir en los resultados, repercutiendo en las decisiones tomadas.

- Se han mantenido unas especulaciones referentes, a si es mejor fabricar la combinación de PLA y Filaflex en una misma pieza o por separado. Ambas opciones presentan sus ventajas y desventajas, pero lo que si que se ha podido corroborar, es que los resultados obtenidos en base a la protección efectuada, han sido igual de buenos.

- En cuanto a los elementos de anclaje diseñados, como en el caso del enganche rápido en forma de “click”, no se ha podido concretar su funcionabilidad. El diseño de este anclaje sobre este útil se ha visto muy limitado por la configuración de la pieza, pero se estima que este sistema puede ser apropiado en piezas de mayor tamaño. A pesar de que este método de anclaje no ha funcionado, las otras dos alternativas empleadas han desempeñado su labor bastante bien.

La elaboración de este proyecto ha resultado ser toda una experiencia, que me ha permitido conocer el mundo de la aeronáutica, además de aplicar y ampliar mis conocimientos referentes a la Ingeniería Mecánica. En cuanto al estudio realizado, ha sido muy aclamado por parte de la empresa y han considerado la posibilidad de poder implantarlo en un futuro como método alternativo al actual. Se ha visto mucho potencial en la aplicación de la impresión 3D dentro de la empresa, aunque aún hay mucho por trabajar.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN



## **Bibliografía**

“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES  
DE ENMASCARADO PARA PROCESOS  
DE GRANALLADO”

## V. Bibliografía

### 5.1 Referencias

- [1] Términos clave en el control de la intensidad del Shot Peening. Disponible en la URL: [http://www.ipar-blast.com/upload/Terminos\\_clave\\_en\\_el\\_control\\_de\\_la\\_intensidad.pdf](http://www.ipar-blast.com/upload/Terminos_clave_en_el_control_de_la_intensidad.pdf)
- [2] **SAE J442, Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening**, establece las características que deben cumplir las probetas Almen, el porta probetas y el medidor Almen.
- [3] **SAE AMS2431/1E, Peening Media (ASR), Cast Steel Shot, Regular Hardness (45 to 52 HRC)**, en la que se establece el tamaño del perdigón, su dureza y los tamices usados.
- [4] Zangroniz, E. “Mejora sistema de “Shot Peening””.  
Universidad de La Rioja. Septiembre 2016.
- [5] Programa Cura. Qué es y cómo funciona. Disponible en la URL: <https://www.tr3sdland.com/2012/12/software-cura-para-impresion-3d-sprinter-vs-marlin/>
- [6] G-Code. Concepto y explicación. Disponible en la URL: <https://polaridad.es/gcode-cura-imprimir-3d/>
- [7] Tipos de impresión 3D. Disponible en la URL: <https://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>
- [8] Diferentes formas de imprimir en 3D. Disponible en la URL: <http://www.areatecnologia.com/informatica/impresoras-3d.html>
- [9] La Estereolitografía. Disponible en la URL: <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%ADa>
- [10] Sinterizado selectivo por láser. Disponible en la URL: [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Sinterizado\\_selectivo\\_por\\_l%C3%A1ser](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser)
- [11] Método de impresión con hielo. Disponible en la URL: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpk/ice/>

[12] La cama caliente. Disponible en la URL:

<https://www.zonamaker.com/impresion-3d/crea-impresora/11-cama-caliente-crea-imp>

[13] Funcionamiento de una impresora 3D FFF. Disponible en la URL:

[https://www.silicon.es/impresion-3d-las-impresoras-3d-accesibles-los-consumidores-49680?inf\\_by=5a0dcf6f681db8b2338b4880](https://www.silicon.es/impresion-3d-las-impresoras-3d-accesibles-los-consumidores-49680?inf_by=5a0dcf6f681db8b2338b4880)

[14] Impresora 3D BQ Witbox2. Disponible en la URL:

<https://www.hwlibre.com/review-impresora-3d-bq-witbox-2/>

[15] Impresora BCN3D Sigma. Disponible en la URL:

<https://www.bcn3dtechnologies.com/es/3d-printer/bcn3d-sigma/>

[16] Tipos básicos de materiales en impresión 3D. Disponible en la URL:

<http://www.repro3d.es/blog/2016/04/08/tipos-basicos-de-materiales-en-impresion-3d/>

[17] Relaño, A. “Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida”.

Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2013.

[18] Vicente Madrid, Antonio. Tecnología de la impresión 3D. La fabricación del futuro. Ed: AVM Ediciones, 2017.

[19] Ácido Poliláctico. Historia y Características. Disponible en la URL:

<https://www.impresoras3d.com/filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-mucho-mas/>

[20] Arteaga, L. “Fabricación y Caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados”.

Universidad de La Laguna. Julio 2015.

[21] **Norma UNE-EN-ISO 178:2010.** “Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión”.

[22] **Norma UNE-EN-ISO 527:2012.** “Plásticos. Determinación de las propiedades a tracción”.

[23] Características físicas y mecánicas del PLA. Disponible en la URL:

<http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>

- [24] Acrilonitrilo Butadieno Estireno. Características. Disponible en la URL:  
<https://www.impresoras3d.com/el-material-de-impresion-abs-y-sus-caracteristicas/>
- [25] Propiedades físicas y mecánicas del ABS. Disponible en la URL:  
<http://hxx.es/2015/03/23/materiales-de-impresion-3d-ii-abs-acrilonitrilo-butadieno-estireno/>
- [26] Características y tipos de filamento flexible. Disponible en la URL:  
<https://quecartucho.es/blog/que-es-y-que-se-puede-hacer-con-el-filamento-flexible-de-impresoras-3d/>
- [27] Propiedades físicas y mecánicas de los filamentos termoplásticos. Disponible en la URL:  
<http://createbot.mx/sitio/wp-content/uploads/2016/11/CATALOGO-FILAMENTOS-CREATEBOT.pdf>
- [28] Especificaciones del Nylon. Disponible en la URL:  
<https://filament2print.com/es/nylons/736-nylon-180.html>
- [29] Termoplástico de alto impacto, HIPS. Disponible en la URL:  
<https://www.impresoras3d.com/filamento-hips-para-impresion-3d-usos-y-caracteristicas/>
- [30] Colorabb-XT. Disponible en la URL:  
<https://colorfabb.com/materials/co-polyesters/colorfabb-xt>
- [31] Nociones básicas de Autodesk Mechanical Desktop. Disponible en la URL:  
<https://www.pcworld.es/articulos/boletin-de-noticias/autodesk-mechanical-desktop-12-487543/>
- [32] La dureza. Tipos y características. Disponible en la URL:  
<http://190.105.160.51/~material/materiales/presentaciones/ApunteDureza.pdf>
- [33] Dureza Shore. Disponible en la URL:  
<http://www.patologiasconstruccion.net/2014/10/medicion-de-la-dureza-en-materiales-4/>
- [34] **UNE-ISO 7619-1:2011, termoplástico**. Determinación de la dureza de indentación. Parte 1: Método del durómetro (dureza Shore).

### 5.1.1 Disposiciones legales

#### ➤ **Normativa referente a proyectos**

**UNE 157001:2002**; Criterios generales para la elaboración de proyectos.

#### ➤ **Normativa básica**

**Real Decreto 1495/1986, de 26 de mayo**, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad en las Máquinas.

**ISO 12100:2003** Seguridad en las máquinas; Conceptos básicos, principios generales para el diseño.

**ISO 13857:2008** Seguridad en las máquinas; Distancias de seguridad.

**Real Decreto 1435/1992, de 27 de noviembre**, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo 89/392/CEE, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre máquinas. Y su modificación por el Real Decreto 56/1995, de 20 de enero, por el que se modifica el Real Decreto 1435/1992, de 27 de noviembre relativo a las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo 89/392/CEE, sobre máquinas.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN



**Anexo**

“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES  
DE ENMASCARADO PARA PROCESOS  
DE GRANALLADO”

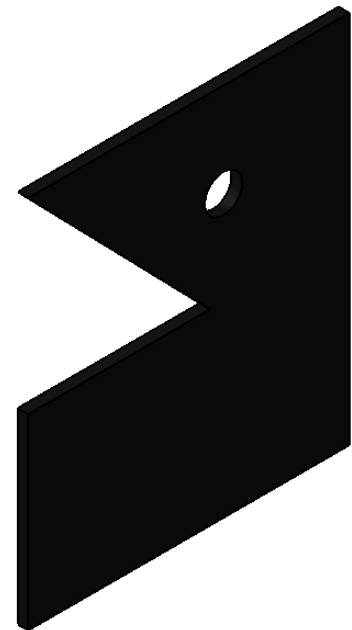
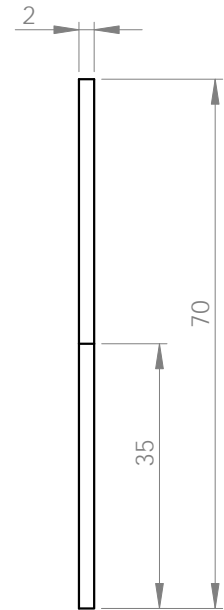
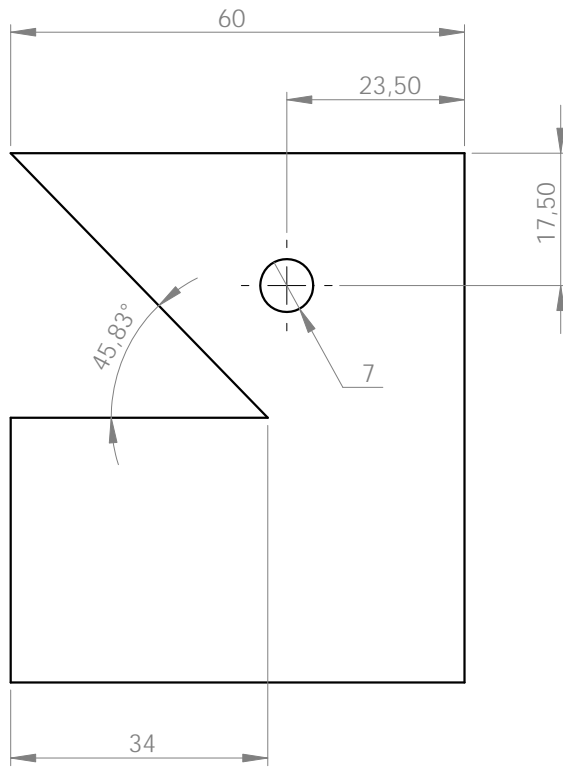




## ***Anexo***

### **1. Planos**

A continuación, se presentan los planos de los útiles de enmascarado que se han empleado en este Trabajo Fin de Grado.



**upna**  
 Universidad  
 Pública de Navarra

E. T. S. I. I. T.  
 INGENIERO  
 TECNICO INDUSTRIAL M.

**DEPARTAMENTO:**  
 DEPARTAMENTO DE ING.  
 MECANICA, ENERGETICA  
 Y DE MATERIALES

**PROYECTO:**

*DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES DE ENMASCARADO  
 PARA PROCESOS DE GRANALLADO*

**REALIZADO:**

KEVIN MEDINA HERMIDA

**FIRMA:**

**PLANO:**

PLANTILLA

**FECHA:**

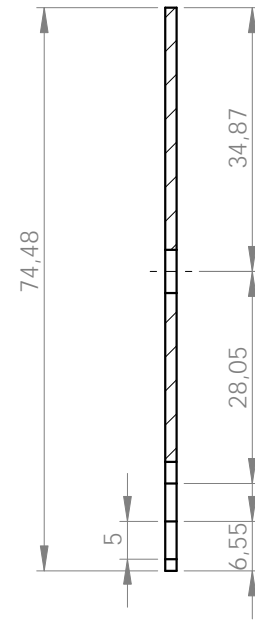
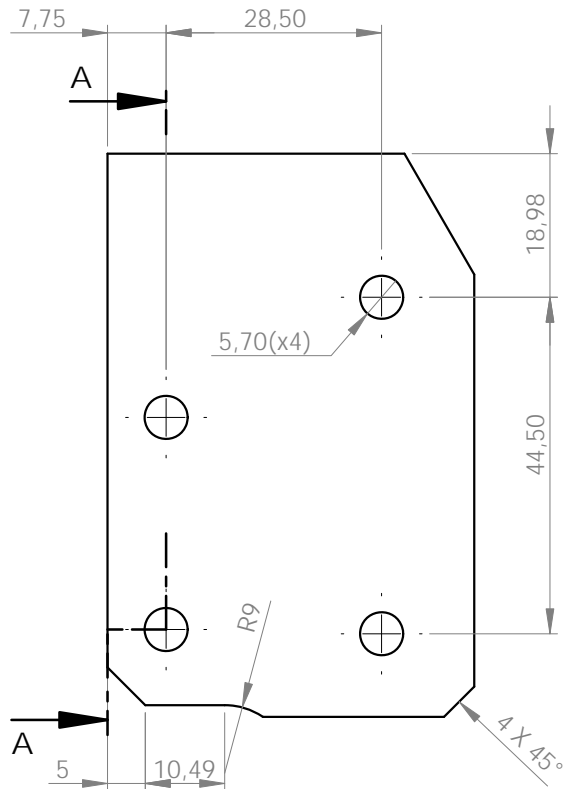
17/05/18

**ESCALA:**

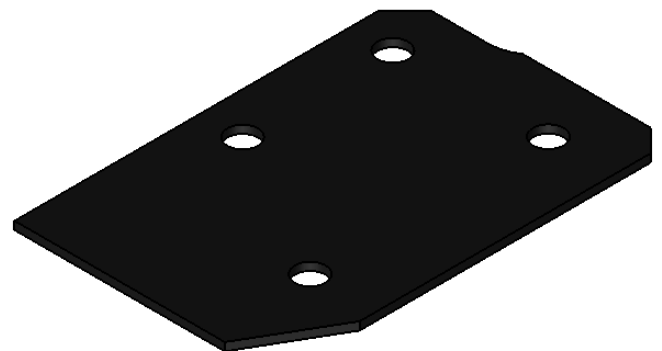
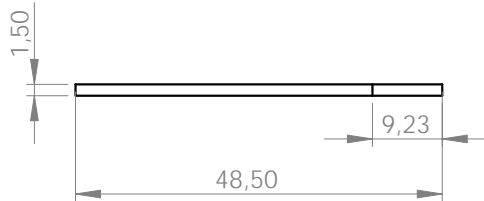
1:1

**Nº PLANO:**

1



SECCIÓN A-A



**upna**  
Universidad  
Pública de Navarra

E. T. S. I. I. T.  
INGENIERO  
TECNICO INDUSTRIAL M.

**DEPARTAMENTO:**  
DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES

**PROYECTO:**

*DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES DE ENMASCARADO  
PARA PROCESOS DE GRANALLADO*

**REALIZADO:**

KEVIN MEDINA HERMIDA

**FIRMA:**

**PLANO:**

FILAFLEX INFERIOR

**FECHA:**

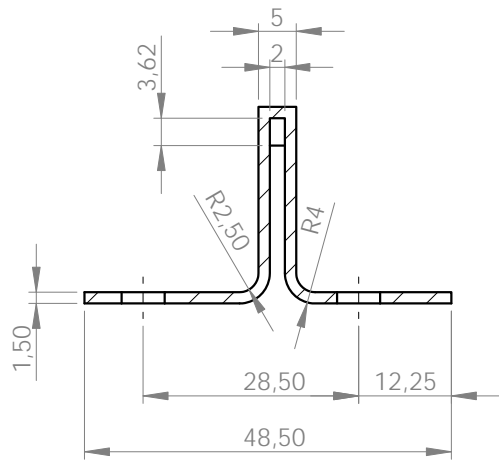
17/05/18

**ESCALA:**

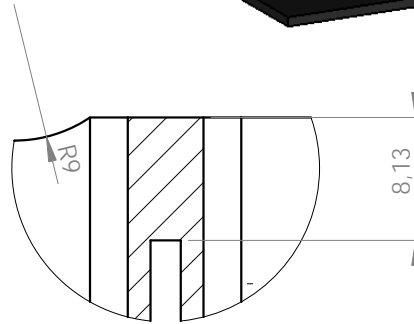
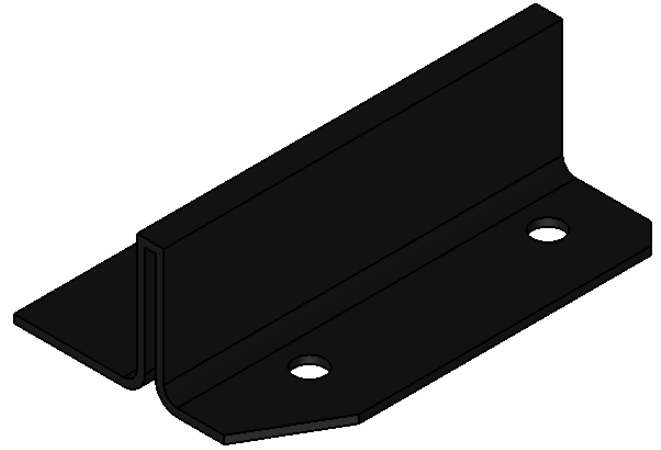
1:1

**Nº PLANO:**

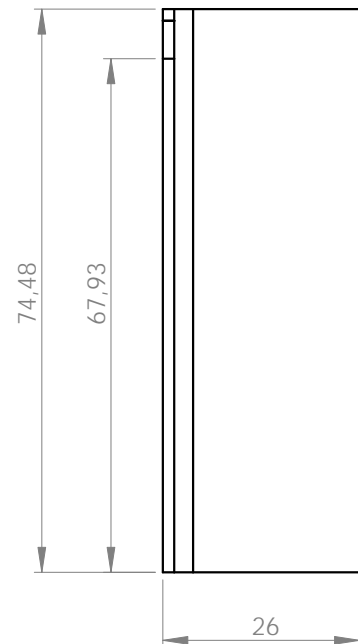
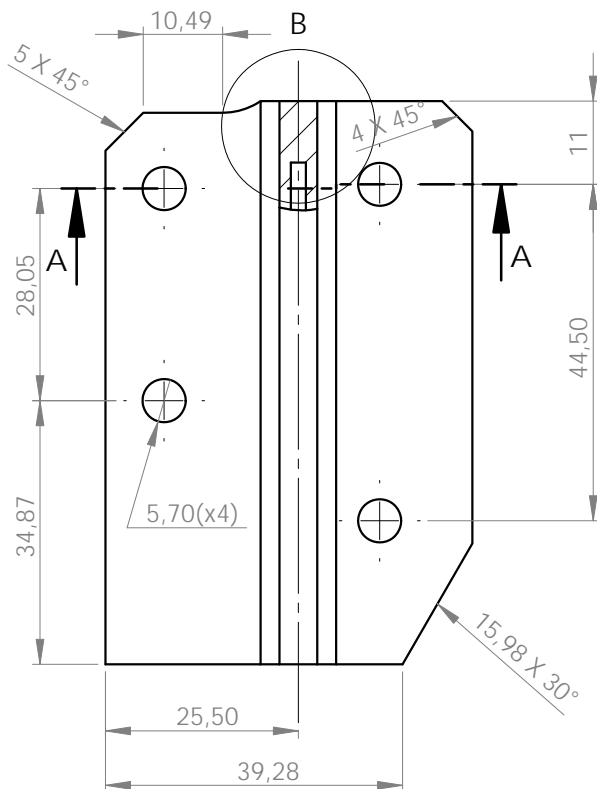
2



SECCIÓN A-A



DETALLE B  
ESCALA 2 : 1



**upna**  
Universidad  
Pública de Navarra

E. T. S. I. I. T.  
INGENIERO  
TECNICO INDUSTRIAL M.

**DEPARTAMENTO:**  
DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES

**PROYECTO:**

*DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES DE ENMASCARADO  
PARA PROCESOS DE GRANALLADO*

**REALIZADO:**

KEVIN MEDINA HERMIDA

**FIRMA:**

**PLANO:**

FILAFLEX SUPERIOR

**FECHA:**

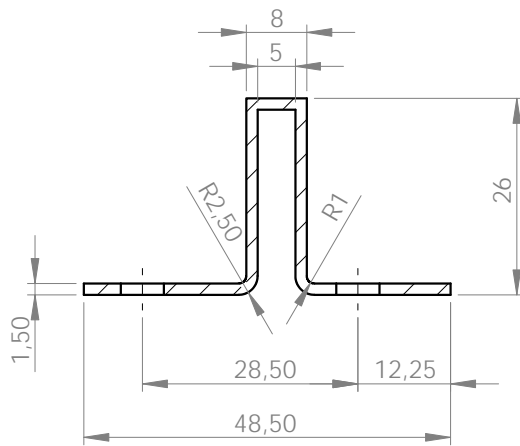
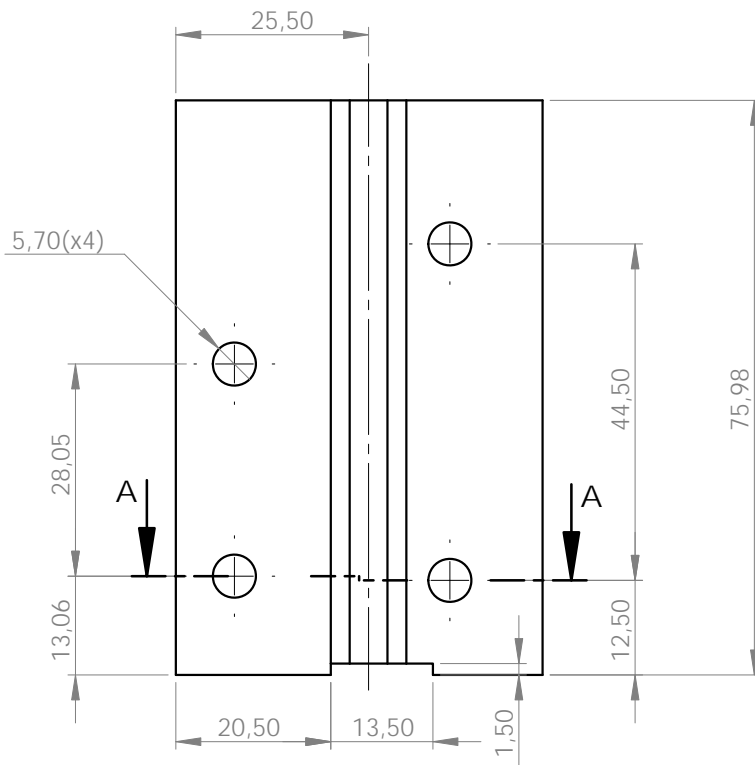
17/05/18

**ESCALA:**

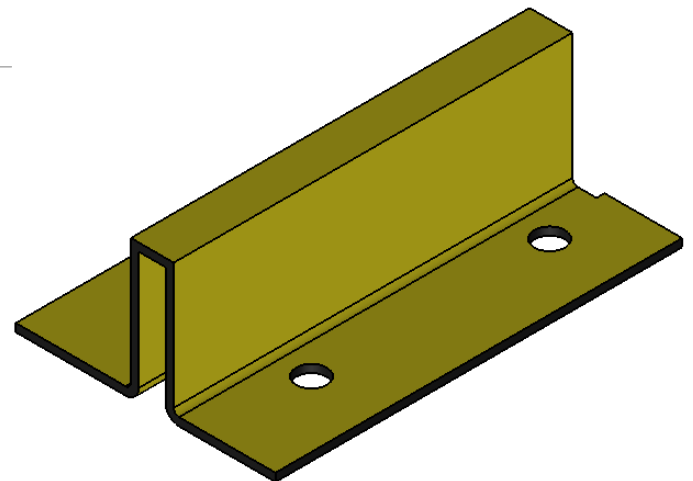
1:1

**Nº PLANO:**

3



SECCIÓN A-A



**upna**  
Universidad  
Pública de Navarra

E. T. S. I. I. T.  
INGENIERO  
TECNICO INDUSTRIAL M.

**DEPARTAMENTO:**  
DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES

**PROYECTO:**

*DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES DE ENMASCARADO  
PARA PROCESOS DE GRANALLADO*

**REALIZADO:**

KEVIN MEDINA HERMIDA

**FIRMA:**

**PLANO:**

PLA SUPERIOR

**FECHA:**

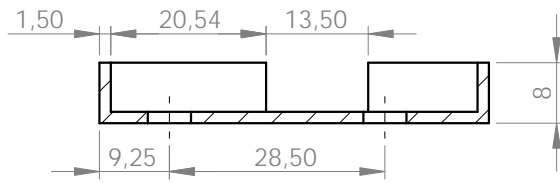
17/05/18

**ESCALA:**

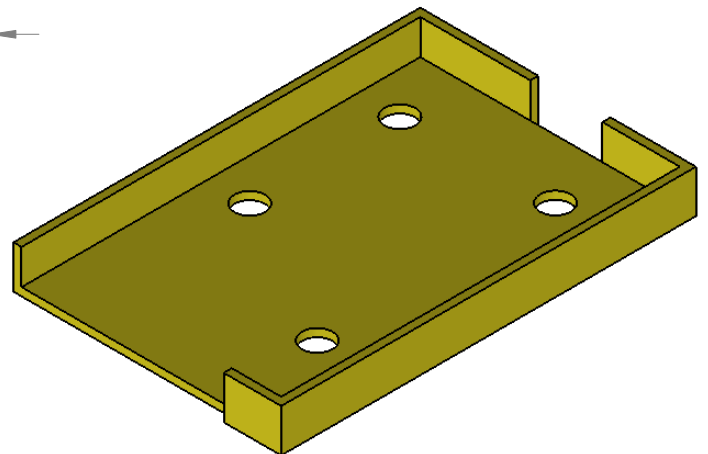
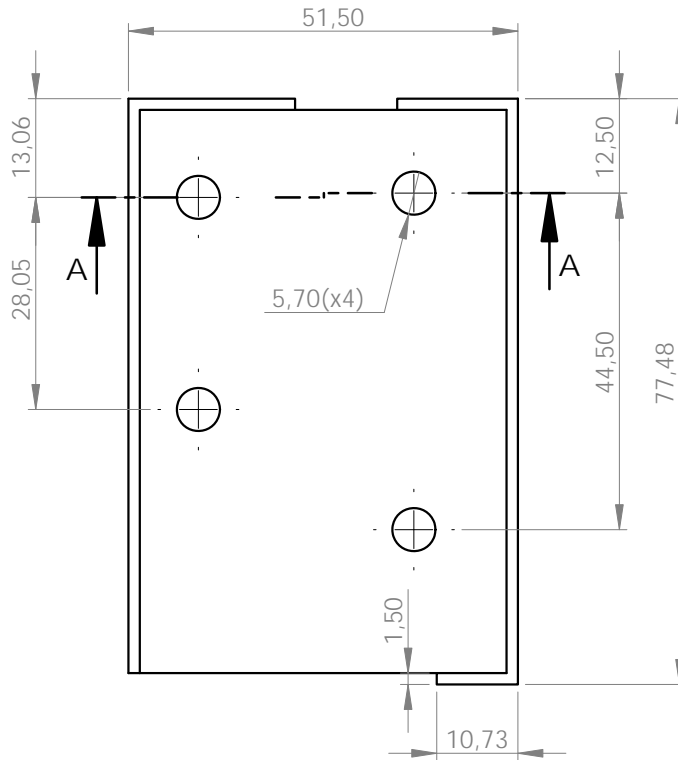
1:1

**Nº PLANO:**

4



SECCIÓN A-A



**upna**  
Universidad  
Pública de Navarra

E. T. S. I. I. T.  
INGENIERO  
TECNICO INDUSTRIAL M.

**DEPARTAMENTO:**  
DEPARTAMENTO DE ING.  
MECANICA, ENERGETICA  
Y DE MATERIALES

**PROYECTO:**

*DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES DE ENMASCARADO  
PARA PROCESOS DE GRANALLADO*

**REALIZADO:**

KEVIN MEDINA HERMIDA

**FIRMA:**

**PLANO:**

PLA INFERIOR

**FECHA:**

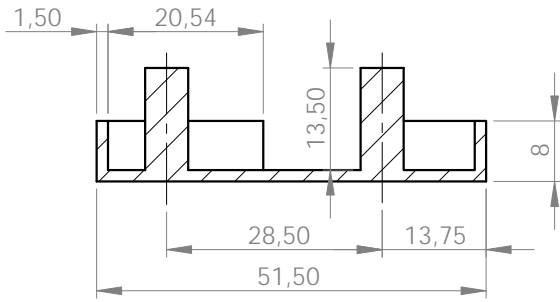
17/05/18

**ESCALA:**

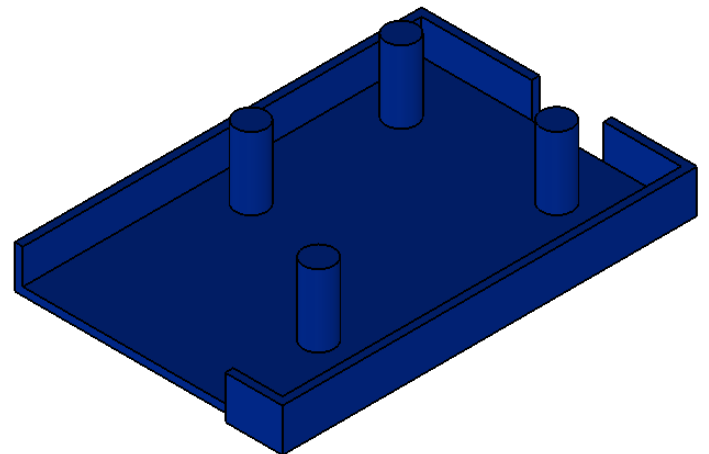
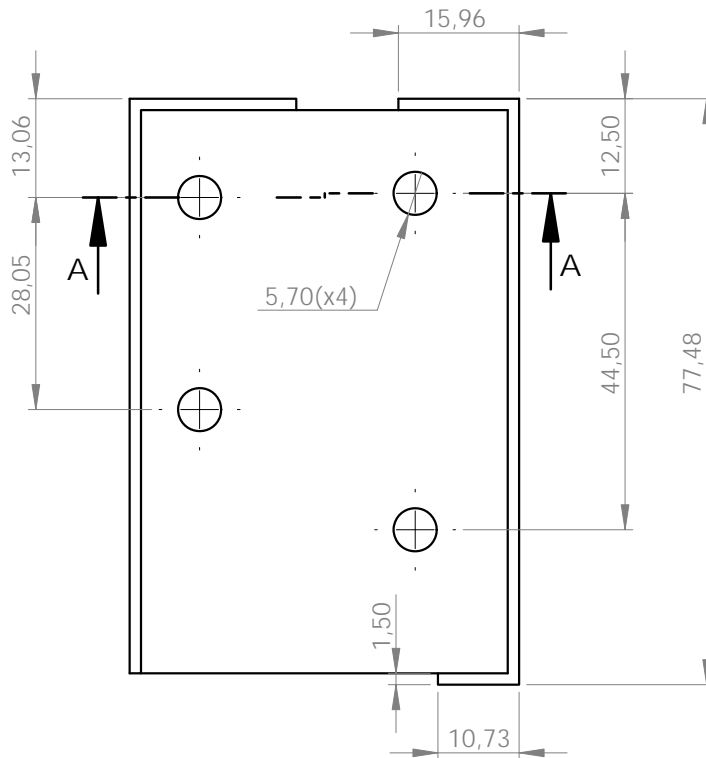
1:1

**Nº PLANO:**

5



SECCIÓN A-A



**upna**  
 Universidad  
 Pública de Navarra

E. T. S. I. I. T.  
 INGENIERO  
 TECNICO INDUSTRIAL M.

**DEPARTAMENTO:**  
 DEPARTAMENTO DE ING.  
 MECANICA, ENERGETICA  
 Y DE MATERIALES

**PROYECTO:**

*DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÚTILES DE ENMASCARADO  
 PARA PROCESOS DE GRANALLADO*

**REALIZADO:**

KEVIN MEDINA HERMIDA

**FIRMA:**

**PLANO:**

PLA INFERIORCON ANCLAJE

**FECHA:**

17/05/18

**ESCALA:**

1:1

**Nº PLANO:**

6