



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**USO DE IMPRESIÓN 3D BICOMPONENTE
PARA LA FABRICACION DE UNA
EMPUÑADURA A MEDIDA**

Autor:

Pérez Mendoza, Enrique

Tutor:

Mansilla Gallo, Alberto

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

Valladolid, octubre del 2018.

RESUMEN

Hoy en día se habla de la tecnología de impresión 3D para multitud de aplicaciones. En este proyecto se aplicará en la obtención de una empuñadura de bastón en dos materiales, como son el Nylon y un elastómero. Esta empuñadura será fabricado a medida para facilitar su uso a los usuarios discapacitados.

Este trabajo de fin de grado se dividirá en varias partes. Una introducción teórica donde se expondrá el funcionamiento y los fundamentos de la impresión 3D y materiales a usar, y una segunda parte que expondrá el proceso de diseño del bastón. Partiendo del modelo del bastón se obtendrán los modelos tanto de la cubierta blanda como del núcleo resistente, para posteriormente imponer los parámetros de impresión característicos de cada material. Una vez obtenida la impresión se harán ensayos de ergonomía en el caso de la cubierta blanda, y de resistencia mecánica en el caso del núcleo resistente.

PALABRAS CLAVE

- Impresión 3D
- FDM
- Bicomponente
- Nylon
- Elastómero
- Empuñadura de bastón

INDICE

RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE	3
INDICE	5
INTRODUCCION	7
OBJETIVOS	7
1. ESTADO DEL ARTE.....	9
2. TECNOLOGIA FDM© (FUSED DEPOSITION MODELING) [6][7]	11
2.1. OBSERVACIONES PREVIAS A LA IMPRESION.....	14
2.2. PARÁMETROS DE EXTRUSION	16
2.3. FUSION DEL MATERIAL	18
2.4. EXTRUSIÓN.....	19
2.5. POSTPROCESADO.....	20
2.6. COMPARATIVA CON OTROS PROCESOS [6]	20
2.7. CARACTERÍSTICAS DE LA IMPRESORA [10].....	21
2.8. MATERIALES EMPLEADOS	22
2.8.1. PLA (ácido poliláctico) [12] [13].....	22
2.8.2. TPU 95A (Poliuretano termoplástico) [15]	23
2.8.3. PVA (Alcohol de polivinilo) [16].....	24
2.8.4. Nylon (poliamida) [17]	25
2.8.5. Breakaway	26
3. DESARROLLO DE LA EMPUÑADURA DEL BASTON.....	27
3.1. MODELOS CAD Y CARGAS SUPUESTAS.....	27
3.2. CUBIERTA SOFT	31
JUSTIFICACION DE LA CUBIERTA BLANDA.....	31
CONDICIONES DE IMPRESIÓN DEL TPU 95A	31
CARACTERISTIZACION DEL CONCEPTO SOFT (BLANDO)	32
ENSAYOS.....	40

3.3. NUCLEO RESISTENTE	49
PARAMETROS DE IMPRESIÓN	51
ENSAYOS.....	54
4. CONCLUSIONES.....	58
5. LINEAS FUTURAS.....	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59

INTRODUCCION

Observando el mercado se ha podido comprobar que existe una gran variedad de ayudas (físicas) para personas mayores y discapacitados, con la desventaja de que estas no se adaptan correctamente a lo que estos requieren o necesitan. Lo que los usuarios permanentes de estos soportes podrían desear son soluciones individualizadas adaptadas a sus necesidades y morfologías, pudiendo ser de cualquier extremidad del cuerpo, para hacer su día a día más fácil.

Estas ayudas consisten en empuñaduras para muletas adaptados, empuñaduras para cachabas, abridores de botellas adapta etc. Cada uno dependiendo de la necesidad de cada persona. En este caso el objetivo es la adaptación de una **empuñadura de bastón**, si bien no se va a poder completar el objetivo final de adaptar la empuñadura completamente a la morfología de la mano. El objetivo de este trabajo es la fabricación de este a partir de un modelo general.

Las diferentes fases del diseño partirán el diseño CAD de la empuñadura hasta su posterior conformado mediante impresión 3D con tecnología FDM® (Fused Deposition Modeling) y sus ensayos pertinentes para comprobar su resistencia. Todo esto teniendo en cuenta que los costes tienen que ser los mínimos posibles y que no va a ser posible ni la digitalización previa ni el posterior acabado superficial.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto de fin de grado es la obtención de una **empuñadura de bastón** que cumpla las condiciones tanto de resistencia como de confort que este requiere. Dentro de este objetivo tenemos otros de menor nivel que darán forma al global:

- Estudiar la viabilidad de la fabricación de una empuñadura en impresión 3D bicomponente y si es así caracterizar el proceso de diseño (Parámetros de impresión).
- Obtener un núcleo de un material resistente y estudiar los parámetros que lo hacen aguantar más carga.
- Conseguir una cubierta blanda (soft) que sea cómoda para el usuario.

1. ESTADO DEL ARTE

La impresión 3D, en cualquiera de sus variantes, es una tecnología tan versátil que su rango de aplicación va desde la medicina hasta el sector de la automoción. Algunos de los ejemplos de las utilidades de esta tecnología son:

- Creación de un laboratorio de impresión 3D en el Hospital Gregorio Marañón para ofrecer soluciones médicas adaptadas a cada paciente. [1]
- Los motores de camiones de Renault se aligerarán un 25% en peso con el uso de este tipo de tecnologías. Esto conlleva además una reducción de piezas que revierte directamente en la economía de la empresa. [2]
- Uso en la industria de la construcción para la creación de casas más baratas en menos tiempo con impresoras 3D de gran tamaño. [3]
- Impresoras comerciales para la fabricación de órganos y tejidos humanos. Uno de los cabezales tiene células madre y el otro cabezal con hidrogel o una matriz. [4]
- Actualmente se está desarrollando la aplicación de esta tecnología en el mundo de la alimentación, habiendo restaurantes que han introducido impresoras 3D. [5]

Estas son algunas de las aplicaciones más novedosas de este tipo de tecnología. Aunque se están desarrollando otras más, estas son las que actualmente están más desarrolladas. En general las aplicaciones tienen la ventaja de que el coste de producción de piezas es bastante menor que si se hicieran con tecnología convencional. Además, tanto el tiempo de producción como la cantidad de material empleado es menor, véase el caso del motor de camión Renault.

2. TECNOLOGIA FDM© (FUSED DEPOSITION MODELING)

[6][7]

La **tecnología FDM©** (Fused Deposition Modeling), se basa en la extrusión de un material fundido en forma de fibras unas al lado de otras a una misma altura formando una capa, y una vez que esté completa esta, se hace otra de la misma manera que la anterior, pero a una cota z mayor (figura 1). Al final se obtendrá la morfología de la pieza deseada.

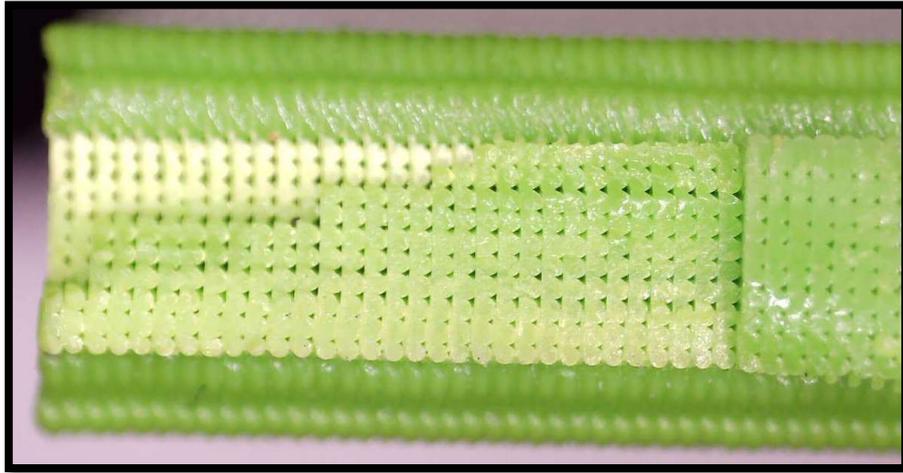


Figura 1. Disposición de churros. (elaboración propia)

Un esquema de los componentes de una impresora con tecnología FDM© de doble extrusor como la que se va a usar se muestra en la figura 2, donde únicamente faltaría de representar los **motores cebadores** de los filamentos, que son los que impulsan el material hasta los cabezales de extrusión.

Estos motores cebadores pueden ser o bien **directos (figura 3)** o bien de tipo **bowden (figura 4)**. Los primeros tienen el motor a la entrada del cabezal de extrusión. En cambio, en los segundos el motor cebador está alejado del cabezal por lo que es necesario el uso de tubos que sirvan de guía hasta el extrusor.

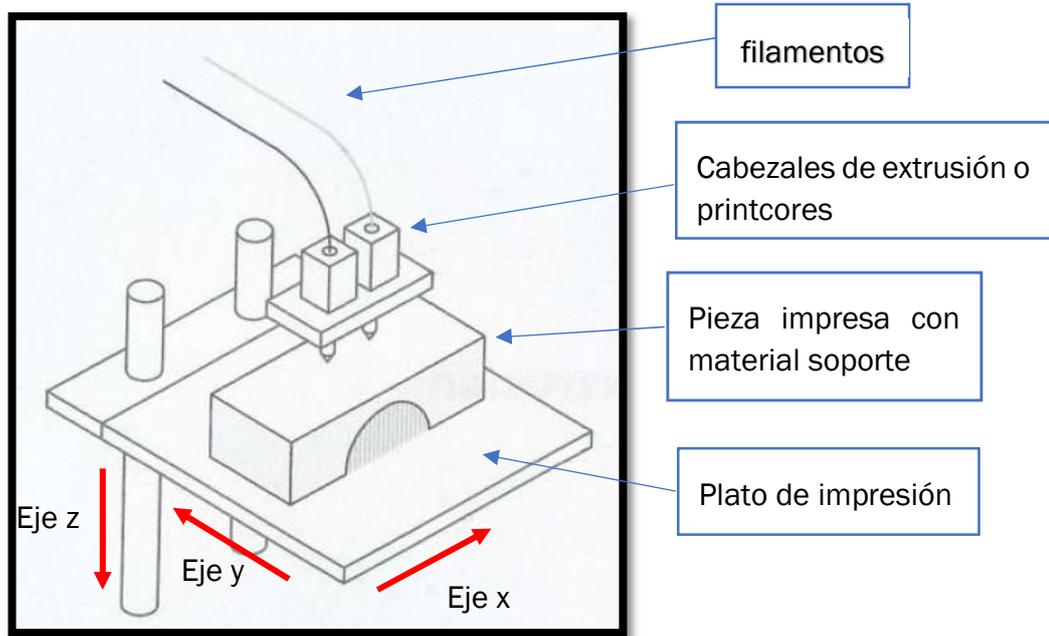


Figura 2. Esquema de una impresora 3D. (Redwood, Ben (2017): *The 3D Printing Handbook*; 3D Hubs; ISBN:978-90-827485-0-5)

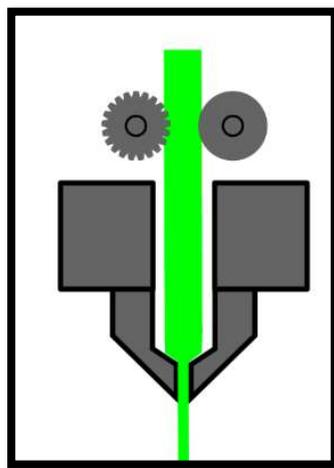


Figura 3. Motor de extrusión directa.

(<https://www.fabbaloo.com/blog/2015/11/11/bowden-or-direct-a-primer-on-extruder-styles>)

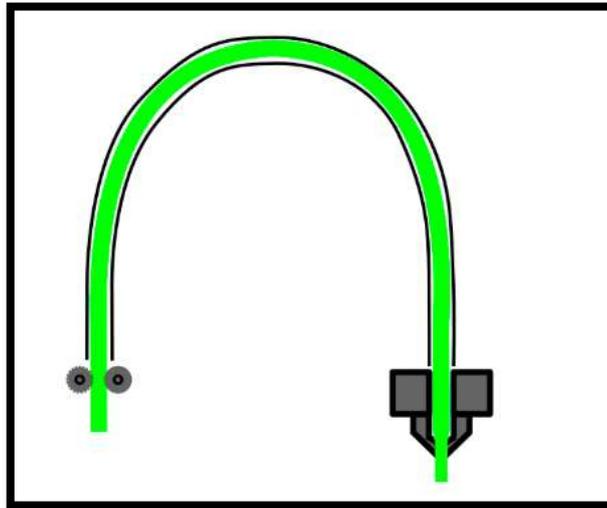


Figura 4. Motor de extrusión tipo Bowden.
(<https://www.fabbaloo.com/blog/2015/11/11/bowden-or-direct-a-primer-on-extruder-styles>)

Una vez conocidos los elementos que componen una impresora FDM© tipo, es preciso describir varios procesos que se llevan a cabo desde que se introducen los filamentos hasta que la pieza es obtenida finalmente para su posterior uso.

2.1. OBSERVACIONES PREVIAS A LA IMPRESION

Teniendo ya una pieza con el formato CAD es necesario obtener un archivo con formato apto para el software de la impresora. En este caso va a ser con extensión STL, o lo que es lo mismo, transforma las superficies de la pieza en una serie de combinaciones de triángulos que conforman una superficie cerrada. En el caso de que la malla final no sea correcta y existan superficies no cerradas, existen **softwares de reparación** como son **Netfabb o Meshlab**, que cierran las superficies abiertas. Tras esto solo queda laminar la pieza mediante **softwares de laminación** donde además se impondrán los parámetros de impresión. Estos programas pueden ser **Simplify o CURA** entre otros tantos que existen. Finalmente se obtiene un **archivo de extensión Gcode** que corresponde a la extensión aceptada por las impresoras 3D. A continuación, se puede ver un ejemplo de diferentes comandos Gcode:

```
G1 F1500 E0
G1 F1200 X141.618 Y88.739 E0.38515
G1 X141.618 Y89.113 E0.39042
G1 X141.618 Y89.262 E0.39252
G1 X141.469 Y89.262 E0.39389
G1 X114.318 Y89.261 E0.77693
G1 X114.318 Y88.739 E0.78429
M204 S625
M205 X6 Y6
G0 F4285.7 X114.018 Y88.439
M204 S500
M205 X5 Y5
```

Se pueden observar diversos comandos como son **G1 y G0** que hacen referencia a procesos donde hay **extrusión de material o bien el desplazamiento es en vacío, respectivamente**. Se aprecia también las coordenadas (X, Y, Z) donde el cabezal se va a tener que desplazar, trazando una línea recta entre las coordenadas anteriores y las siguientes. El resto de los comandos M modificaran los parámetros de temperatura del extrusor.

Otras consideraciones previas antes de la impresión como tal son que ciertos materiales necesitan de la utilización de productos sobre la placa de impresión, como son **pegamentos o lacas (figura 5)** [7], que hagan aumentar la adherencia o que bien eviten romper la misma placa por la gran adhesión de los materiales empleados.



Figura 5. Ejemplos de pegamento y laca. (SMART MATERIALS 3D)

Aunque no es estrictamente necesario, es conveniente **nivelar manualmente** la placa de impresión cada cierto número de impresiones para asegurar que la distancia entre el noozle (boquilla) y la placa de impresión es constante a lo largo de las continuas impresiones. Ciertas impresoras realizan nivelados automáticos antes de cada impresión basándose en el calibrado manual previo, con lo que esta acción manual puede posponerse más en el tiempo.

Para realizar ese calibrado el fabricante puede proporcionar **cartas (figura 6)** que servirán como guía de la distancia que debe de haber. En otros casos la distancia que se aconseja es orientativa, teniéndoselas que ingeniar para conseguir guías de la distancia deseada.



Figura 6. Carta de calibración. (ULTIMAKER)

2.2. PARÁMETROS DE EXTRUSION

Esta parte del proceso va a ser la que determine la forma y el tamaño final de la pieza. Aquí ya entran en juego los parámetros de impresión impuestos en el software (CURA, Simplify...) por el usuario (**figura 7**), además del diámetro de la boquilla, el cual afectará a la precisión dimensional de la pieza final. Los parámetros más generales que definen la impresión son:

- **Morfología del churro:** Tanto **altura** como **ancho** de la primera capa y de las subsiguientes. Las de primera capa se impondrán para asegurar la adhesión a la placa.
- **Temperatura de impresión:** Se puede configurar tanto la de la primera como la de las siguientes. También se puede controlar las relacionadas con los finales de impresión.
- **Temperatura de la placa de impresión:** que será fundamental en la adhesión de la primera capa.
- **Flujo:** Generalmente por debajo del 100%, aunque en elastómeros será ligeramente superior al 100%. Hace referencia a la cantidad de material que ceba el motor en relación con el material que es extruido.
- **Retracciones:** Para asegurar que no rezume material cuando el extrusor no esté imprimiendo. Retrae el material una cierta distancia cada vez que cambia de capa o bien se va a desplazar en vacío.
- **Velocidad de impresión:** Velocidad de desplazamiento del extrusor en el plano X/Y. Se diferencian las velocidades según cual sea la parte que se imprima.
- **Uso de torres auxiliares:** para la limpieza de las toberas debido a sobreextrusiones en el cambio de boquilla.
- **Velocidad del ventilador:** Servirá para el enfriamiento del filamento al ser extruido sobre la placa. Para materiales con un coeficiente de dilatación cubica alto el enfriamiento tendrá que ser más lento por lo que la velocidad del ventilador tendrá que ser menor.

Estos son los parámetros que generalmente más afectan a la hora de caracterizar el churro, aunque existen otros tantos más que serán importantes dependiendo de la morfología de la pieza o dependiendo del material que se vaya a usar. Si atendemos a la disposición de los churros también podremos controlar otros parámetros como son los relacionados con las **paredes**, **relleno** e incluso con el **soporte** si así lo requiere la pieza.

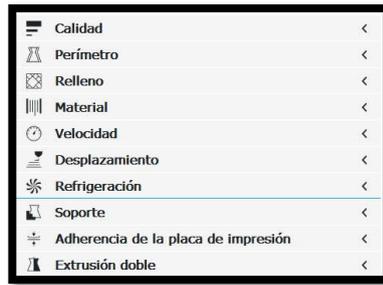


Figura 7. Bloques de parámetros de CURA. (software CURA)

2.3. FUSION DEL MATERIAL

El paso al estado líquido del material será por la **aplicación de calor** en el extrusor mediante una **resistencia**. Este flujo de calor tendrá que ser constante para asegurar una temperatura también constante a la salida, dependiente del material y del diámetro de filamento que se esté usando. Esta temperatura tiene que ser **suficientemente alta** como para asegurar la fusión total del material, pero **tan baja como sea posible** para asegurar que el material no se queme (temperatura de degradación) o bien que se dañe el extrusor. En la **figura 8** vemos como es el gradiente de temperaturas dentro del extrusor según avanza el material, siendo el color más oscuro la parte más caliente del material.

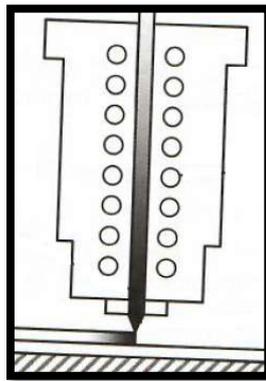


Figura 8. Gradiente de temperaturas en un extrusor. Kai Chua C, Fai Leong K (2017): 3d printing and additive manufacturing; ISBN: 978-981-3146-75-4

Los materiales más frecuentes de uso en la tecnología FDM son los **polímeros termoplásticos amorfos**, o bien semicristalinos, y los **elastómeros**. Para este tipo de materiales tendremos que tener en cuenta la **temperatura de transición vítrea**, que es la considerada del paso de sólido a un estado con cierta viscosidad, ya que será importante en aplicaciones que impliquen altas temperatura de operación. Un **ejemplo** puede ser que, si usamos una pieza de PLA, Acido poliláctico (temperatura de transición vítrea 60°C) en un ambiente a 80°C, veremos que esa pieza va a cambiar su morfología por el reblandecimiento debido a la temperatura.

2.4. EXTRUSIÓN

Analizando como debería ser el chorro de material extruido se observa como teóricamente debería ser con sección en forma de circunferencia (figura 9). Como lo que se busca es una buena adhesión entre unas capas y otras lo que se hará es aplicar presión al chorro (cambia la morfología de la sección a ovalada), además de recalentar parcialmente el chorro de la capa anterior. Es con la combinación de estas dos acciones con la que conseguimos la adhesión.

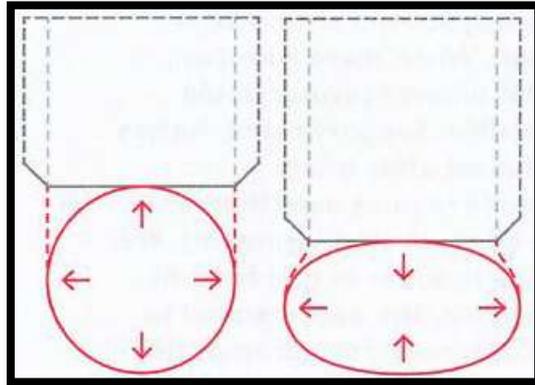


Figura 9. Morfología de la sección transversal del chorro teórica vs real. (Redwood, Ben (2017): *The 3D Printing Handbook*; 3D Hubs; ISBN:978-90-827485-0-5)

En cuanto a la dirección longitudinal de extrusión (figura 10) del chorro, las paredes de la pieza final no son completamente lisas, sino que la propia morfología del chorro genera radios en los extremos, con las consiguientes concentraciones de tensiones, que coinciden con las uniones entre capas contiguas.

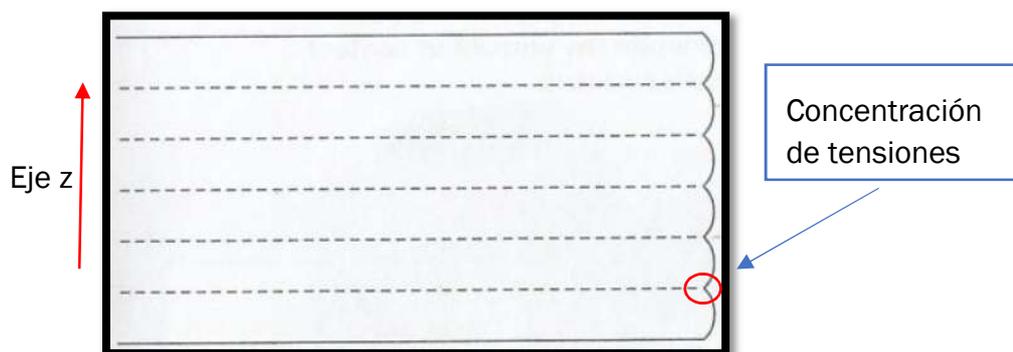


Figura 10. Morfología de la sección longitudinal del chorro. (Redwood, Ben (2017): *The 3D Printing Handbook*; 3D Hubs; ISBN:978-90-827485-0-5)

2.5. POSTPROCESADO

En el caso de ser necesario puede ser o bien relacionado con el **acabado superficial** o bien para la **retirada del material auxiliar** en el caso que se haya usado, ya sea retirándolo o bien disolviéndolo en algún fluido. Los tiempos de disolución dependen del material soporte usado, pero en general es de entre 2 y 3 horas.

2.6. COMPARATIVA CON OTROS PROCESOS [6]

Dentro de los diferentes procesos de conformado que existen, el proceso por adición (impresión 3D) es el más **rentable en producciones muy cortas** (figura 11) o bien que requieran de unas condiciones únicas de diseño para cada individuo o situación (véase piezas hechas a medida). También se aprecia que el coste de producción por pieza se mantiene constante sea cual sea el número de piezas producidas, que, comparado con los otros procesos, este es totalmente ineficiente en grandes tiradas. Donde más destaca la reducción del coste de producción es en procesos que implican moldeado.

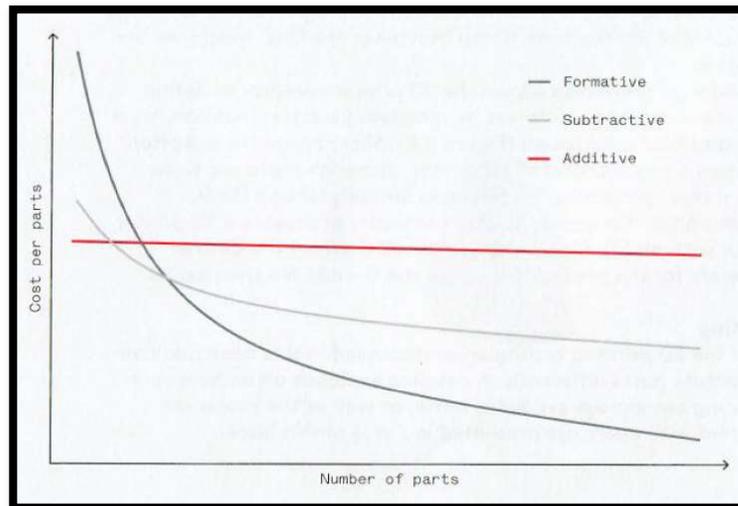


Figura 11. Comparación de diferentes procesos de conformado. (Redwood, Ben (2017): *The 3D Printing Handbook*; 3D Hubs; ISBN:978-90-827485-0-5)

2.7. CARACTERÍSTICAS DE LA IMPRESORA [10]

Las impresoras que se va a usar son la Ultimaker 3 y la Ultimaker 3 extended de la empresa Ultimaker®, ambas de doble extrusor.

Como características principales tenemos que es una impresora de 3 ejes donde el cabezal de impresión es el que se desplaza en los ejes X e Y y es la placa de impresión la que se desplaza en el eje Z. En cuanto al volumen máximo de impresión tenemos que va a variar dependiendo si se usan o no ambos extrusores, además de que la Ultimaker 3 es 10 cm más corta en el eje Z que su homóloga.

En el **anexo 1** se describen todas las características de la impresora de forma tabulada.

Adicionalmente se ha añadido una cámara climática [11] que permite mantener la temperatura interna constante a lo largo de todo el eje Z y que ha demostrado ser útil a la hora de mejorar las propiedades mecánicas. En la figura 12 se muestra la impresora Ultimaker 3 extended con la cámara climática colocada en su parte superior.

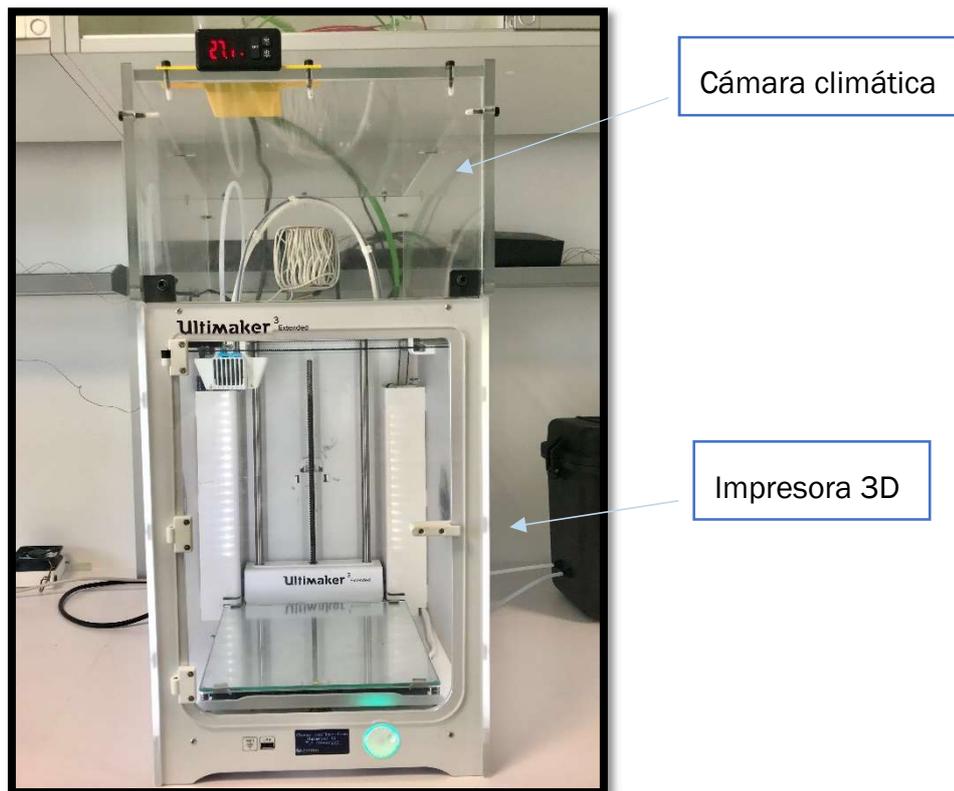


Figura 12. Impresora Ultimaker 3 extended con el control de temperatura.
(elaboración propia)

2.8. MATERIALES EMPLEADOS

Dentro del mercado de materiales para impresión en FDM® tenemos gran variedad de materiales con propiedades diferentes que pueden abarcar gran cantidad de aplicaciones. Dentro de cada material existen diferencias de propiedades según la compañía fabricante.

Las propiedades de los materiales seleccionados se describen en el **anexo 2** donde se exponen además las condiciones de obtención de estas mismas.

2.8.1. PLA (ácido poliláctico) [12] [13]

El **ácido poliláctico** es un biopolímero termoplástico proveniente del ácido láctico. Se considera que es un material orgánico y se obtiene del almidón de los cultivos de maíz o bien de la caña de azúcar.

La utilización del PLA generalmente se restringe a prototipos no funcionales, ya que es un material con buenas propiedades mecánicas, pero con fácil degradación. El uso como **modelos no funcionales** se debe a que el coste por bobina es mucho menor que otros materiales con mejores propiedades mecánicas.

Existen gran cantidad de fabricantes de este material con gran variedad de colores. En este caso usaremos el PLA de la empresa Smartmaterials.



Figura 13. Ejemplo de pieza hecha en PLA (elaboración propia)

2.8.2. TPU 95A (Poliuretano termoplástico) [15]

El TPU es un elastómero que mezcla propiedades tanto del caucho como las de los plásticos.

Las principales propiedades de este polímero son la alta resistencia a abrasión, posibilidad de ser pintado, y la alta absorción de impactos hacen que sea muy útil en industrias que requieran de una buena seguridad estructural.

El filamento que se va a usar es de la empresa Ultimaker, que además de poseer las características anteriormente mencionadas, ofrece una impresión homogénea con gran resistencia a ataques químicos.

Este material es apto para un amplio abanico de utilidades como son bisagras, carcasas protectoras, así como piezas que necesitan encajar a presión. Como desventaja tenemos que no puede estar a exposiciones prolongadas a rayos UV y en entornos de más de 100 °C.

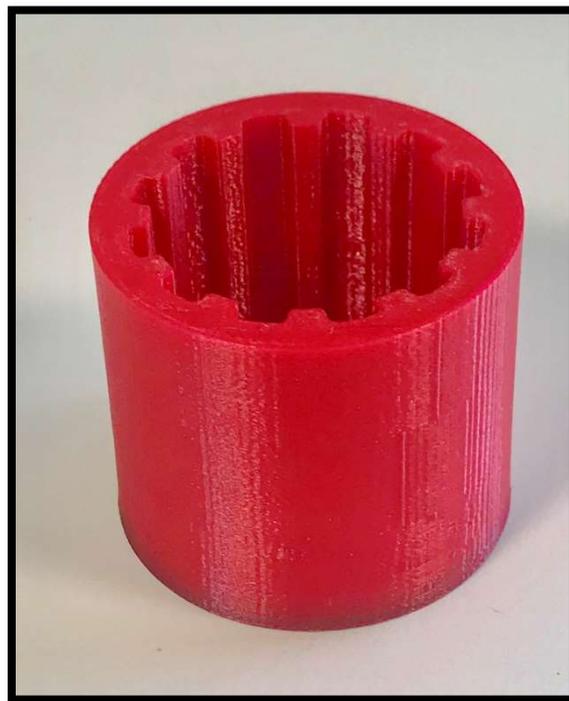


Figura 15. Pieza de maquinaria en TPU. (elaboración propia)

2.8.3. PVA (Alcohol de polivinilo) [16]

El PVA es usado como material soporte por la capacidad de disolverse en agua. Además, tiene la capacidad de ser impreso con geometrías intrincadas y dar soporte a voladizos de gran tamaño.

Su principal desventaja es que es muy higroscópico, de ahí que haya que controlarse la humedad del filamento para mantenerlo por debajo del 55% de humedad relativa, además de conservarse en un entorno con una temperatura siempre menor a 28°C.

Si miramos las referencias de materiales aconsejados del fabricante (Ultimaker) vemos que no todos son válidos, siendo apto para PLA, Nylon, CPE. En otros casos como el ABS y el TPU 95A es válido, pero con la posibilidad que de que surjan problemas o imperfecciones en la superficie. Para los materiales que no es compatible es debido a la falta de adherencia entre ambos materiales.

2.8.4. Nylon (poliamida) [17]

Dentro de la industria de la impresión 3D el Nylon es el material más utilizado en prototipos funcionales. Esto es así por su gran durabilidad, alta relación resistencia y peso, gran flexibilidad, baja fricción y resistencia a la corrosión.

Aunque es un material muy higroscópico (uso de sistemas antihumedad), su gran resistencia a impactos y abrasiones hacen que sea el material óptimo en usos industriales, incluso para la fabricación de herramientas.

Como principales desventajas tenemos que no es apto en objetos en contacto con alimentos o bien uso médico. Además, las propiedades mecánicas son bajas en ambientes superiores a 80°C.



Figura 16. Bulón fabricado en Nylon. (elaboración propia)

2.8.5. Breakaway

Utilizado como material de soporte, el Breakaway se compone de una mezcla de poliuretano y ácido poliláctico. A diferencia de otros materiales de soporte, este no es soluble en ningún fluido, con lo que su retirada será manual.

La compatibilidad con el resto de los materiales es mayor que en el caso del PVA, ofreciendo una adhesión en una mayor cantidad de materiales.

Ante la imposibilidad de ser disuelto, este material se caracteriza por su debilidad y ductilidad, para que la retirada de este sea lo más sencilla y rápida posible. De esto se deduce que la geometría no puede ser muy intrincada o con detalles minúsculos.

Otra gran ventaja del Breakaway con respecto al PVA es que en atmosferas controladas este conserva su consistencia ya que la temperatura de reblandecimiento es sustancialmente mayor comparado con el PVA.



Figura 17. Pieza con soporte Breakaway. (Ultimaker)

3. DESARROLLO DE LA EMPUÑADURA DEL BASTON

Observando el actual mercado de bastones, se ha escogido un modelo de empuñadura convencional y muy usado basado en la adaptación aproximada de los dedos. El fin de esto es comprobar si es posible la obtención de un bastón utilizando la tecnología FDM© y en caso afirmativo parametrizar las variables que afectaran a las propiedades de cada componente del bastón.

Antes de explicar el desarrollo del diseño de la empuñadura es necesario remarcar el hecho de que **no es posible aplicar CAE** (Análisis estructural de la pieza por ordenador). Esto es por el hecho de que esta tecnología no está lo suficientemente madura como para poder realizar un análisis fiable. Esto se debe a la gran anisotropía, que es la variación de propiedades según la dirección que se tome.

3.1. MODELOS CAD Y CARGAS SUPUESTAS

Se ha aproximado la morfología usando el software de diseño 3D CATIA V5 (figura 18). El modelo general se compone de la parte donde la palma de la mano va a apoyar, con una geometría más intrincada, modelada a partir de una multisección, y una segunda que es la que va a ir embebida en el palo telescópico metálico.

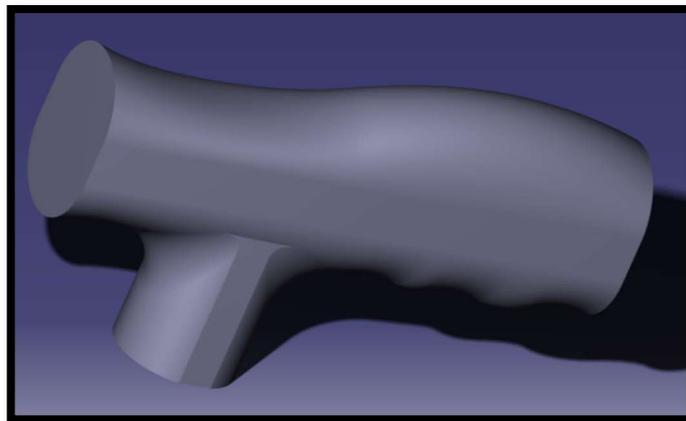


Figura 18. Modelo general de la empuñadura. (CATIA V5 2016)

Dentro de este modelo general tendremos otros 2 modelos que, unidos, harán que la empuñadura sea bicomponente (TPU+Nylon). Estos son complementarios por el hecho de que uno es el **núcleo resistente** (figura 19) y la **cubierta de blanda** (figura 20) y confieren al modelo las características que estamos buscando. Ambas partes se han obtenido de hacer modificaciones del modelo original mediante espesores negativos en el caso del núcleo resistente y de vaciados en el caso de la cubierta blanda.

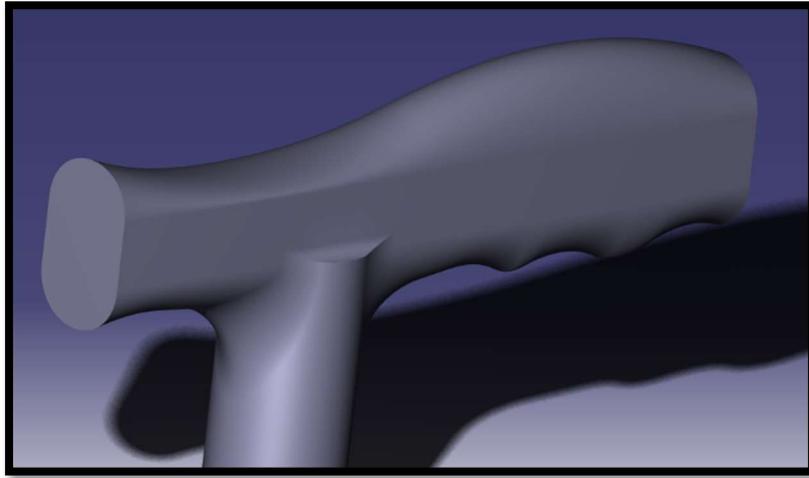


Figura 19. Núcleo resistente. *(Elaboracion propia con CATIA V5 2016)*

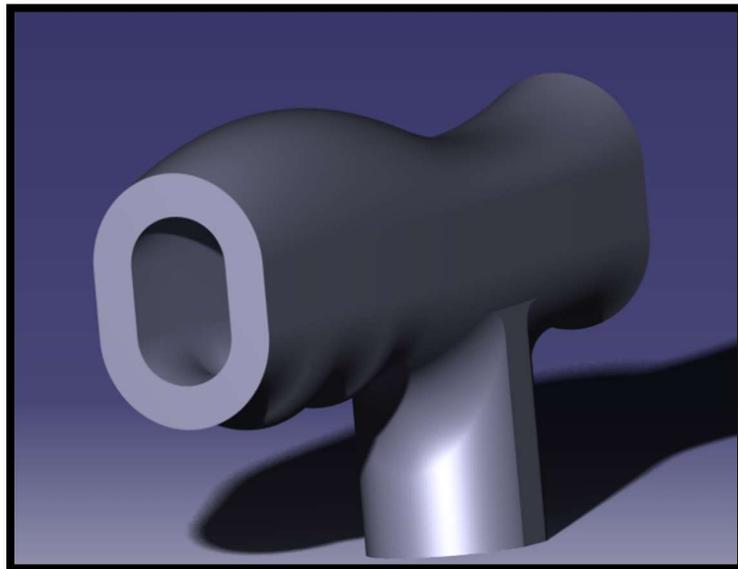


Figura 20. Cubierta blanda. *(elaboración propia conCATIA V5 2016)*

Una vez obtenidos los modelos en CAD la problemática de cada una de las partes es completamente diferente por las características de materiales requeridos en cada parte. Todas estas problemáticas se van a exponer en los capítulos sucesivos con las consiguientes soluciones tecnológicas empleadas.

Dentro de las diferentes posibilidades de fabricación en impresión 3D, se han simplificado a 2 las opciones de fabricación. Cada una de ellas implica unas complicaciones diferentes tanto de fabricación como de posterior combinación para obtener el objeto final:

- Una **primera** que es la impresión de cada parte por separado y buscar posteriormente una solución para su unión mediante adhesivos o uniones mecánicas, además de cómo integrar ambos modelos.
- La **segunda** solución se basa en la impresión conjunta de ambas partes, comprobando previamente que el TPU 95A y el Nylon son compatibles y se adhieren correctamente el uno al otro (aunque no sea estrictamente necesario). Vamos a **optar por esta solución** ya que se reducen tiempos de impresión, además de reducir costes debido a que los materiales auxiliares son significativamente más caros que los materiales principales utilizados.

Sabiendo que el usuario final del bastón va a ser una persona con movilidad reducida debemos suponer, a fin de simplificar el modelo, que la **carga principal** va a ser en sentido negativo en el eje vertical y que corresponde con el **peso propio del usuario (P)**. En la figura 21 hay un esquema simplificado de la carga sobre el concepto global de la empuñadura. Como se puede observar la carga se distribuye a lo largo del voladizo más grande porque el peso se carga casi en su totalidad sobre la palma de la mano.

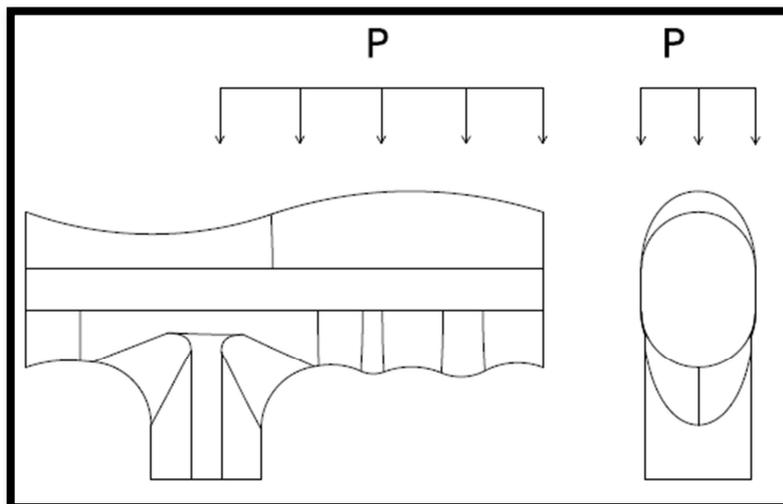


Figura 21. Suposición de la distribución de la carga principal a lo largo de la empuñadura. (elaboración propia con CATIA V5 2016)

Esta es la carga supuesta a tener en cuenta en las dos partes de la empuñadura, pero deberemos tener en consideración otros casos como pueden ser **golpes en el bastón telescópico**, que afectará directamente a la unión de la empuñadura con el bastón. Por ello cuando se analice el núcleo resistente deberemos realizar otro modelo simplificado basado en un empotramiento con extremo libre (figura 22), Donde L es la longitud ajustable de la empuñadura telescópica.

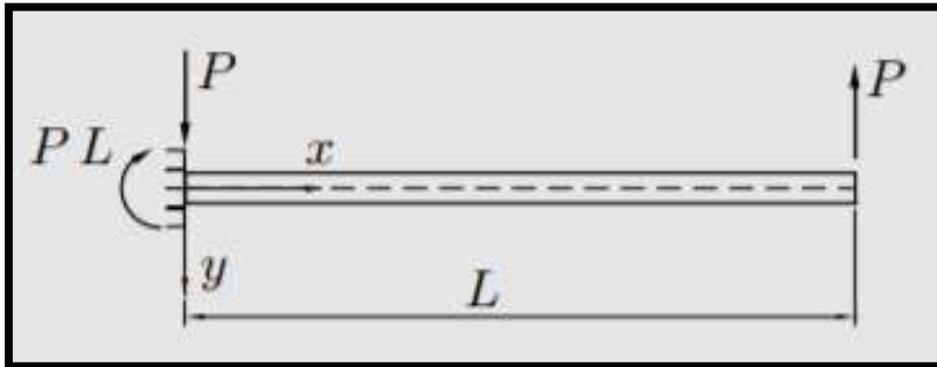


Figura 22. Suposición de acción de un esfuerzo puntual sobre la empuñadura telescópico en su extremo libre. Foces A, Garrido J.A. Apuntes elasticidad y resistencia de materiales II UVA

Extrapolado esto a nuestro modelo el empotramiento correspondería con la unión empuñadura y bastón telescópico, que será la sección más crítica de todas.

3.2. CUBIERTA SOFT

JUSTIFICACION DE LA CUBIERTA BLANDA

Dentro del proceso de diseño del bastón se da el problema del confort por el hecho de que la superficie obtenida de la impresión en **Nylon** es dura e incómoda, pudiendo generar “callosidades” y molestias al usuario. La solución sería una superficie “soft” (blanda) que permita utilizar el bastón cómodamente sin que se produzca molestia tras un cierto tiempo de uso.

Ante la imposibilidad de utilizar espumas en impresión 3D, existen materiales elásticos como son el TPE/TPU (Poliuretano Termoplástico) que permiten alargamientos de hasta un 600%. Haciendo variaciones de parámetros se buscará generaran el efecto deseado. En nuestro caso usaremos el **TPU 95A** de Ultimaker, aunque existen gran variedad de fabricantes de elastómeros.

CONDICIONES DE IMPRESIÓN DEL TPU 95A

Lo primero y más importante es familiarizarse con el material ya que cada uno tiene unas características de impresión distintas, incluso dentro del mismo material cada fabricante obtiene propiedades diferentes. Para el caso del TPU los parámetros característicos y consideraciones a tener en cuenta del material serán:

- **Temperatura de extrusión:** 225°C.
- **Temperatura de extrusión de primera capa:** 225°C.
- **Temperatura de placa:** 60°C. (permite mayores temperaturas si la situación lo requiere)
- **Flujo:** 110% (sobrextrusión por ser un material elástico a temperatura ambiente)
- **Velocidades de extrusión bajas:** no superiores a 30 mm/s, en este caso como máximo se usará 25mm/s.
- **Habilitar retracciones y Torres auxiliares** cuando se vayan a imprimir piezas que requieran de los 2 extrusores para así limpiar la tobera del extrusor antes de volver a imprimir. Esto es por la sobrepresión ejercida sobre el TPU y que hace que rezume material cuando no es lo deseado.

No menos importante es el hecho de que este elastómero es higroscópico, por lo que será necesario el uso de un **sistema hermético** tal como se muestra en la figura 23. Este se compone de una caja hermética donde se han acoplado 2 racores pasamuros en uno de sus laterales que aseguran estanqueidad en la unión. Un tubo de teflón va a servir de guía al filamento desde la caja hasta el motor cebador de la impresora.



Figura 23. Caja hermética (elaboración propia)

CARACTERIZACION DEL CONCEPTO SOFT (BLANDO)

Si observamos las propiedades de los elastómeros y en concreto del TPU 95a, se extrae que el módulo de Young es bajo, por lo que a pequeños esfuerzos tenemos grandes deformaciones. La utilidad de esta propiedad en este caso radica en el efecto de **pandeo de los nervios (figura 25)** cuando la carga actúa y la recuperación de la posición inicial cuando esta cesa.

Para obtener dicho efecto deberemos seleccionar que parámetros modificables en el software de laminación serán los que nos proporcionen dicho efecto

- **Patrón del relleno:** Serán más aptos aquellos patrones que sean abiertos. En este caso seleccionamos un **patrón lineal** en el software CURA de Ultimaker©. En otros softwares como puede ser Simplify© no existe tal patrón, siendo lo más cercano un perfil serpenteado.
- **Porcentaje de relleno:** Modificando este valor podremos variar el número de nervios mediante la distancia entre los mismos. Los valores estudiados varían entre un **10-20-30 % de relleno**. Este parámetro junto a la sección del nervio serán los que indique el número de nervios y la distancia entre ellos.
- **Ancho de las líneas de relleno (en mm):** La modificación de la sección del nervio será otro de los factores determinantes en el grado de confort que requiramos. A más ancho de línea mayor, con igual porcentaje de relleno, la carga de pandeo es mayor por lo que la cubierta será más dura. Los valores sobre los que se ha experimentado son **0.2 y 0.3 mm**.

Conocidos ya los parámetros que van a influir en el grado de confort, se han realizado varias pruebas para poder medir que combinaciones de parámetros se van a ajustar, teniendo siempre en cuenta que cada posible usuario tiene unas capacidades físicas diferentes.

Viabilidad y parámetros dimensionales de cubierta blanda.

El modelo sobre el que modificar los parámetros consiste en un **prisma de dimensiones 30x40x4 mm (figura 24)** donde se fijarán: la **altura de capa** a 0.2 mm, las **alturas de las primeras y últimas capas** (capas sólidas) a 0.6 mm respectivamente (múltiplo de la altura de capa), véase el perfil tipo resultante de laminarlo en CURA en la figura 25.

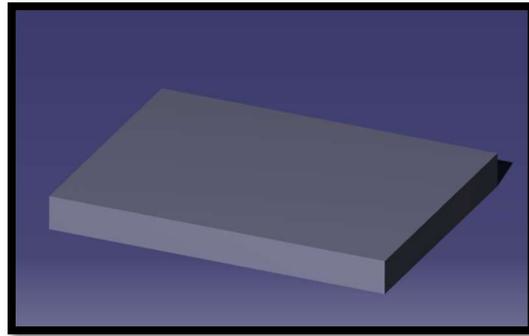


Figura 24. Prisma de prueba de parámetros soft (elaboración propia con CATIA V5 2016)

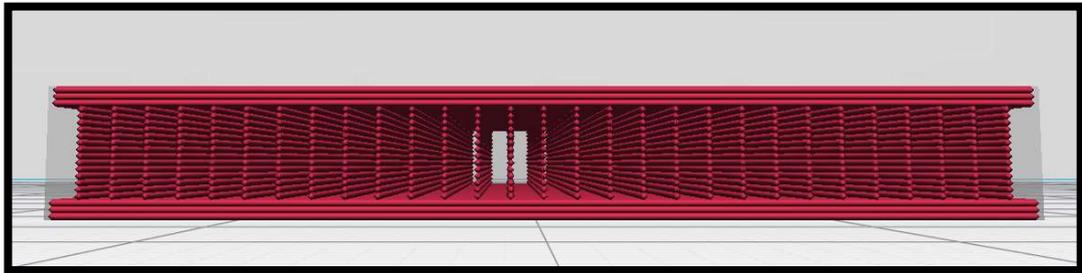


Figura 25. Alzado tipo del relleno soft. (elaboración propia en CURA)

De estas cuatro pruebas realizadas (tabla1) podemos asegurar que es posible conseguir una superficie blanda con la variación de los parámetros usados. Una vez sabido esto y analizando las combinaciones de parámetros, vemos que no existe una combinación óptima, sino que únicamente sirve para descartar aquellos que o bien constructivamente son imposibles o bien descartar aquellos que demasiado duros.

INFILL (%)	TIPO DE RELLENO	ANCHO DE RELLENO (mm)	OBSERVACIONES
10	lineas	0,2	quebradizo
20	lineas	0,3	Demasiado duro
20	lineas	0,2	Buen tacto
30	lineas	0,2	Tacto más duro que el anterior

Tabla 1. Variación de parámetros y su consecuencia en el confort

Lo que estos resultados indican es que a **rellenos muy pequeños** (10%) los nervios de la estructura interior son quebradizos por ser poco consistentes. Otra observación es que la variación del **ancho de línea** afecta muy significativamente cuando el resto de los parámetros son constantes, siendo negativa tal y como era de esperar. Solamente una **variación del porcentaje de relleno** genera esas pequeñas diferencias asumibles de dureza, estando más cerca del 20% que del 30%.

Una vez conocida la dependencia entre los parámetros y el resultado final es necesario extrapolar esto al modelo más complejo. Ante la imposibilidad de conseguir un relleno concéntrico a un punto dado (sería lo conveniente), como era la idea inicial, se diseñó una empuñadura cilíndrica con los nervios diseñados en CAD tal y como se muestra en la figura 26.

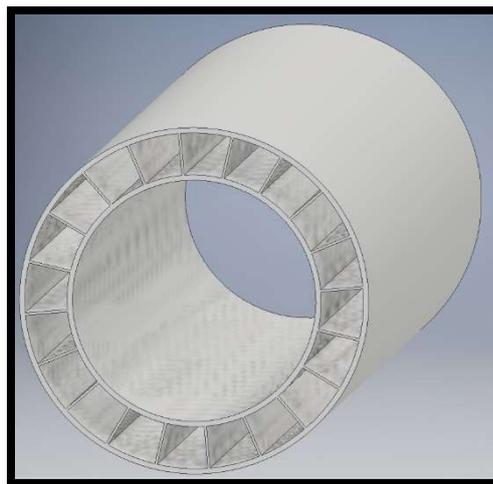


Figura 26 Cubierta de la empuñadura de TPU ancho de line 0.2mm.
(elaboración propia en Autodesk Inventor)

Inicialmente las dimensiones se correspondían con los de las probetas planas (0.2 mm), pero los programas de laminación son incapaces de procesarlo, de ahí que haya que realizar modificaciones respecto al ancho de los nervios, introduciéndose un valor ligeramente superior al ancho deseado (0.21mm). Una vez modificado se ha comprobado que los resultados dimensionales medidos después de imprimir (figura 27) distan mucho de los teóricos (0.4mm medidos comparados con los 0.21mm teóricos). La razón de esto se debe a la simulación que hace el software para poder laminar los nervios diseñados manualmente.

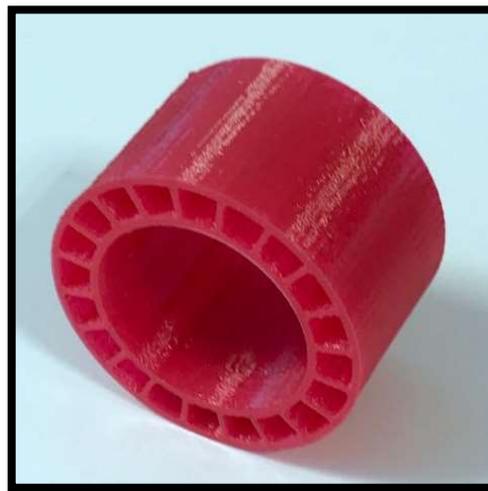


Figura 27 Cubierta cilíndrica de la empuñadura de TPU impresa.
(elaboración propia)

Los experimentos realizados sobre el modelo cilíndrico nos indican que la solución dada a los nervios concéntricos no es correcta. Habrá que buscar una solución global con el modelo definitivo y las diferentes herramientas que nos proporcionan tanto el software CAD como el laminador.

Como resumen imponemos que los **parámetros dimensionales**, tanto de los nervios como de las cubiertas sólidas, que se usarán en el modelo definitivo serán los que se indican en la tabla 2, quedando como parámetros variables el porcentaje de relleno y el espesor de TPU.

Ancho de línea relleno (mm)	Altura de capa (mm)	Grosor superior (mm)	Grosor inferior (mm)	Grosor de pared (mm)
0.2	0.2	0.6	0.6	0.6

Tabla 2. Parámetros dimensionales para la cubierta blanda

Extrapolación al modelo de la empuñadura

Una vez conocida la influencia de los parámetros, el siguiente paso será comprobar que combinación de **porcentaje de relleno**, junto a la **orientación de los nervios** puede proporcionar mejor el efecto deseado. Adicionalmente se variará la el **espesor de la cubierta de TPU** para comprobar si se pueden obtener cubiertas con durezas diferentes válidas.

Si atendemos a las posibles orientaciones de las fibras, en las **figuras 28 y 29** tenemos las dos opciones que mejor se adaptan a las cargas supuestas en el apartado 3.2. Ambas producen el efecto de pandeo, por lo que deberemos experimentar cuales son los parámetros óptimos de cada orientación. En concreto el **porcentaje de relleno** ya que el resto dependen del material (temperaturas y velocidades) o bien ya vienen dados por los apartados 4.3.1 (dimensionales).

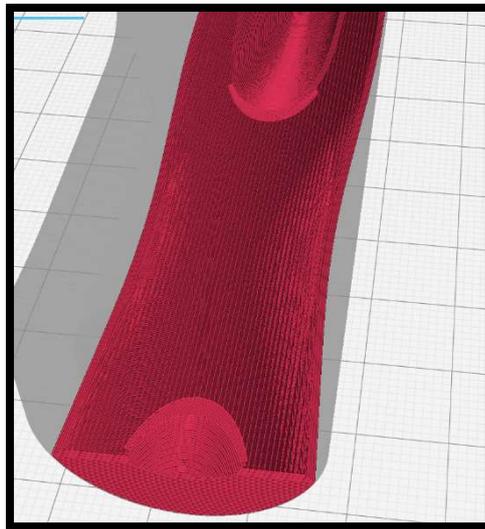


Figura 28. Relleno en la dirección longitudinal. (elaboración propia en CURA Ultimaker)

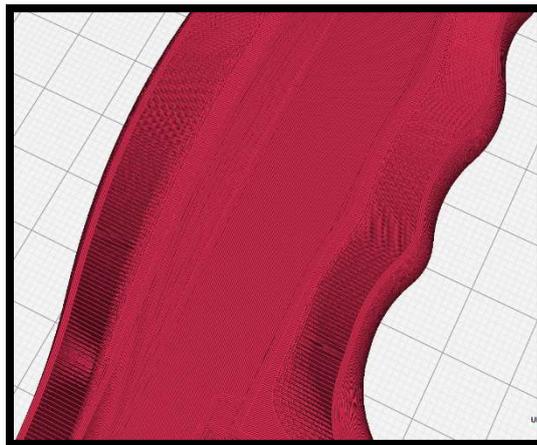


Figura 29. Relleno en la dirección transversal. (elaboración propia en CURA Ultimaker)

Los modelos de prueba que se van a imprimir para comprobar la dureza consisten en secciones de una longitud menor que el modelo final (30 cm). El corte obtenido formará parte de una de las secciones donde se ha supuesto que la presión es mayor. Para ello el software Netfabb nos permitirá realizar cortes de las secciones que deseamos como se muestra en la figura 30. El mismo procedimiento se hará con el núcleo resistente para hacer los modelos fiables (figura 31).

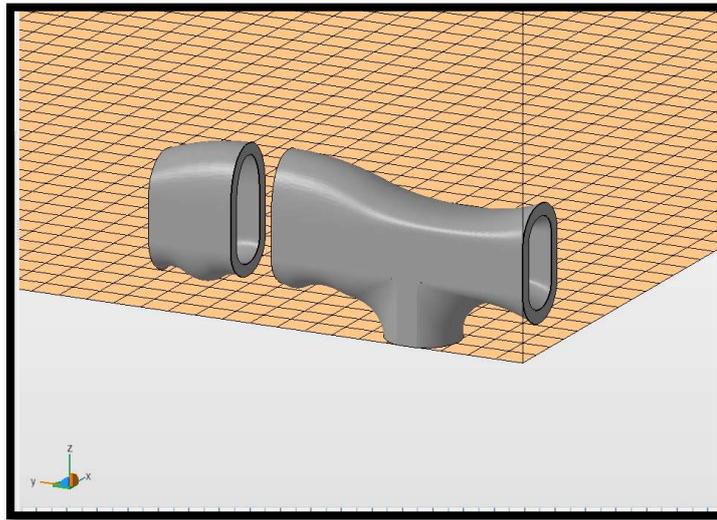


Figura 30. Corte en la empuñadura principal de la cubierta TPU. (elaboración propia con Netfabb)

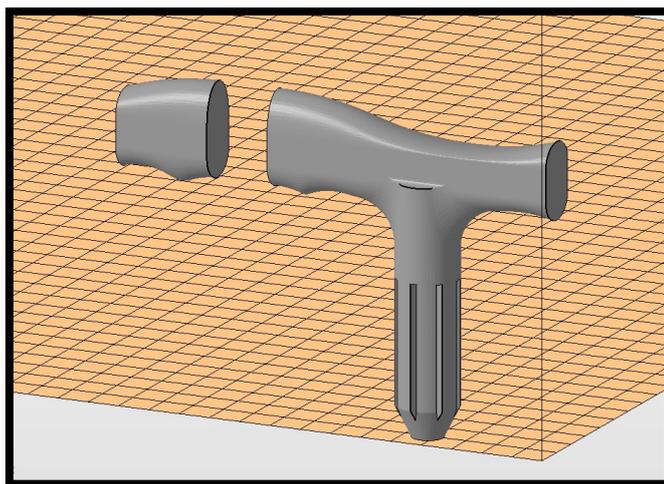


Figura 31. Corte en la empuñadura principal del núcleo resistente. (elaboración propia con Netfabb)

De los modelos de 4 mm de espesor impresos se ha obtenido que la dureza es excesiva, por lo que habrá que **aumentar el espesor del TPU a 6mm**, en detrimento del núcleo resistente. En la figura 32 se ve una comparativa del resultado de imprimir con los dos espesores propuestos (4mm y 6mm respectivamente). Como consecuencia de seleccionar el grosor de 6mm el núcleo resistente se verá reducido en tamaño y por tanto resistencia mecánica, pero al no ser una de estas partes la más crítica no se verá afectada. En la figura 33 se observa uno de los cortes de la empuñadura impresos de 6mm.



Figura 32. Comparativa de espesores del núcleo resistente. 4 mm a la izquierda y 6 mm a la derecha (elaboración propia)



Figura 33. Sección de la empuñadura impresa de 6mm perspectiva isométrica. (elaboración propia)

Se ha podido comprobar que **ambas orientaciones son válidas**, si bien **las mismas combinaciones de parámetros no dan la misma solución de dureza** debido a la diferencia de longitud del nervio. El porcentaje de relleno en el caso del relleno transversal (impresión en horizontal -XY-) se ha comprobado mediante el tacto que tiene que ser menor ya que la dureza es sustancialmente mayor (numéricamente comprobado en el apartado siguiente) cuando se han impreso modelos reducidos. Esto es producido porque la longitud de los nervios es significativamente menor, como se ha comentado anteriormente.

Otra cosa que se observa es que con esta segunda combinación (impresión horizontal) la capacidad de proporcionar esa cubierta soft no se limita únicamente a la dirección de la carga supuesta, sino que es multidireccional. Si el usuario ejerciera suficiente fuerza al apretar la empuñadura en todas direcciones veríamos que el confort es mayor en el caso de impresión horizontal (figura 25), ya que existen nervios útiles donde antes no los había.

De cualquier modo, la orientación de esta cubierta blanda vendrá dada por la orientación con la mayor resistencia mecánica. Si bien suponemos que la cubierta impresa con orientación XY es la que mejor cumple su función, es necesario demostrar que la resistencia mecánica es mayor en esta orientación que en la dirección vertical (orientación en XZ/YZ), como así se analizará en el apartado 3.3.

Todo lo descrito anteriormente necesita una demostración cuantificable con ensayos como los que se van a describir en el apartado siguiente.

ENSAYOS

A la hora de medir el grado de confort que puede proporcionar la empuñadura es necesario el uso de ensayos de ergonomía. Para buscar que ensayos podrían satisfacer será necesario buscar industrias donde la ergonomía juegue un papel importante. En este caso nos fijaremos en los asientos de los coches como representación del confort.

La mayoría de los estudios se centran en la fatiga y pérdida de propiedades de los asientos después de un cierto número de ciclos, pero existen otros que se centran en el grado de dureza de este. El principal problema que surge de hacer estos ensayos es la incapacidad de obtener unos valores que, extrapolados a la población susceptible de utilizar la empuñadura, nos proporcione una o varias combinaciones óptimas. **Esta subjetividad en general no será una de las principales problemáticas a tener en cuenta en este trabajo, pero si conviene tenerlas en cuenta para la parametrización aproximada.**

Si nos fijamos en el artículo del **Swedish Institute for Fibre and Polymer Research [19] sobre confort y ergonomía** será de gran utilidad la metodología usada, que consiste en el uso de un indentador (diferente según el tamaño del objeto a ensayar) para medir el desplazamiento de este dada una fuerza. Si bien los indentadores propuestos exceden de las dimensiones de la empuñadura, se ha propuesto otro de diferente tamaño, pero manteniendo una proporción lógica entre altura y radio (R y H) (figura 34).

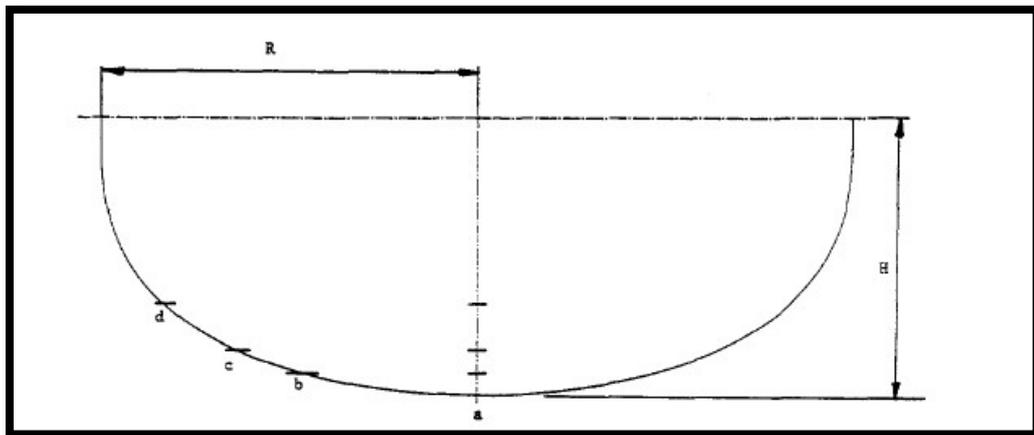


Figura 34. Proporciones del Indentador. (Sven-Erik Hanel, Torbjorn Dartman, Measuring methods for comfort rating of seats and beds)

Utillaje para ensayo

El utillaje que precisaría este tipo de ensayos a compresión es caro y complejo para obtener la precisión deseada, además del hecho de asegurar axialidad en la carga para no dañar la posible **el aparato de medida**. En este caso disponemos de una **torre de ensayos** de la empresa Mark-10 [20]. Esta torre, aunque es de ensayos a tracción, realizando modificaciones podemos transformar el esfuerzo axial a tracción en otro a compresión, que es objetivo de este ensayo.



Figura 35. Torre para ensayos a tracción. (Mark-10)

Los instrumentos de medida utilizados serán un **dinamómetro** de 100 Kg de la empresa Tractel (figura 36) de carga máxima y un **calibre Mitutoyo** (figura 37) para medir el desplazamiento.



Figura 36. Dinamómetro Handifor™ tipo. (Tractel®)



Figura 36. Calibre de 150mm, 500-181-20. (Mitutoyo®)

El resto del utillaje necesario tendrá que ser fabricado mediante **impresión 3d**. Las ventajas de utilizar esta tecnología es que es que reducimos tiempo ya que las piezas a fabricar están diseñadas especialmente para soportar la empuñadura, con lo que en un tiempo reducido tendríamos las piezas deseadas. Las piezas por fabricar serán un **soporte** que asegure que la empuñadura no tenga ningún movimiento relativo, además de un **indentador** para poder realizar los ensayos.

En cuanto al **soporte** tendremos que tener en cuenta las dimensiones de la empuñadura además de la distribución de los agujeros para colocar este soporte en la torre correctamente. Observando la figura 37 se pueden distinguir 2 sólidos. Uno de los arcos de sujeción está seccionado para poder colocar la empuñadura, ya que si fuera una única pieza sería imposible su posicionamiento. Los tornillos usados tanto para asegurar el empotramiento como para la unión de las partes seccionadas son de métrica 4 y cabeza hexagonal.

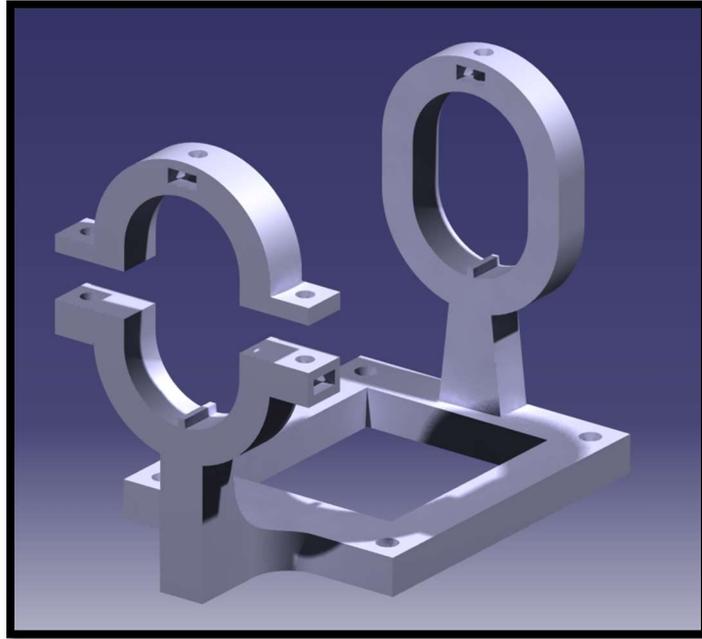


Figura 37. Soporte empuñadura (elaboración propia)

Aunque es conocido que los utillajes a ensayos estáticos tienen que ser robustos, este se ha aligerado sabiendo que las cargas que se van a aplicar son pequeñas. Además, al ser los esfuerzos cuasiaxiales verticalmente no hay problemas de rotura por flexión ni de grandes desplazamientos.

En cuanto al **indentador** y tomando siempre como referencia el artículo anteriormente mencionado [19] tomamos como relación entre radio y altura la de la combinación del indentador más pequeño, que corresponde a $H/R=0.75$. Sabiendo ya esto el diseño definitivo tendrá una morfología para que entre correctamente la empuñadura dentro del indentador (figura 38). También se puede observar un saliente en el indentador, que será la referencia a la hora de medir los desplazamientos verticales.

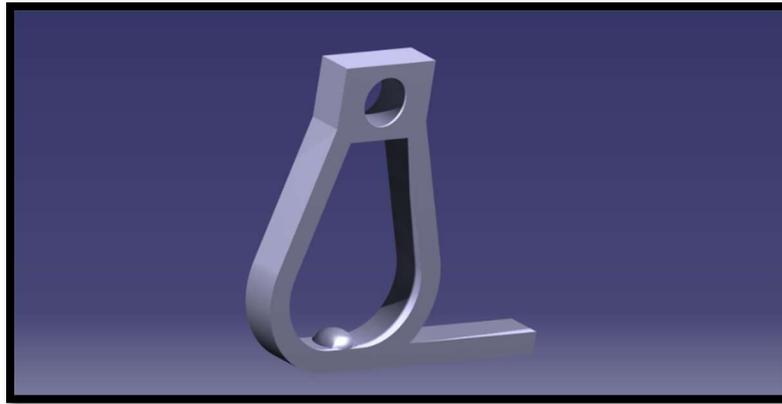


Figura 38. Indentador con saliente para toma de medidas (elaboración propia)

Teniendo ya todo el utillaje necesario, el ensamblaje de este será de no gran dificultad dando como resultado lo mostrado en la figura 39, donde se desgranan todos los elementos anteriormente descritos.

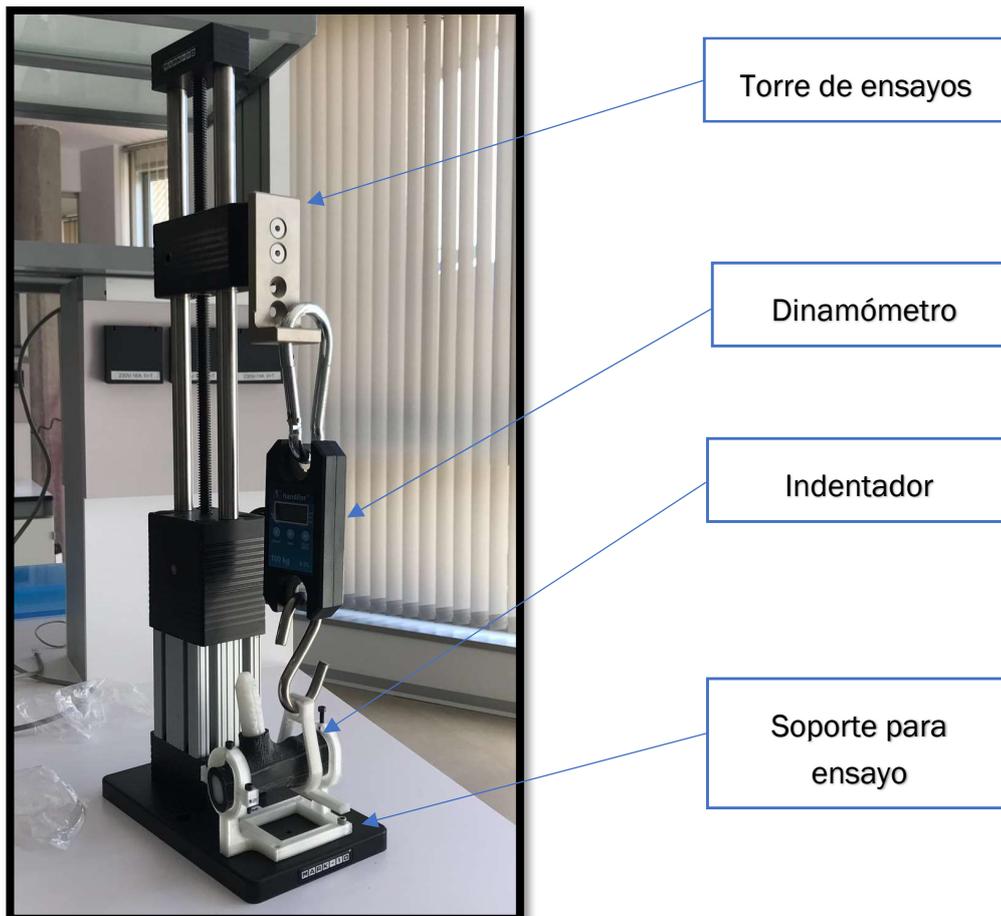


Figura 39. Conjunto para el ensayo de ergonomía (elaboración propia)

De aquí medimos la altura del saliente (figura 40) con respecto a la base, con lo que la resta de la altura medida para cada carga y la misma a una carga 0, obtendremos el desplazamiento del hendidor.

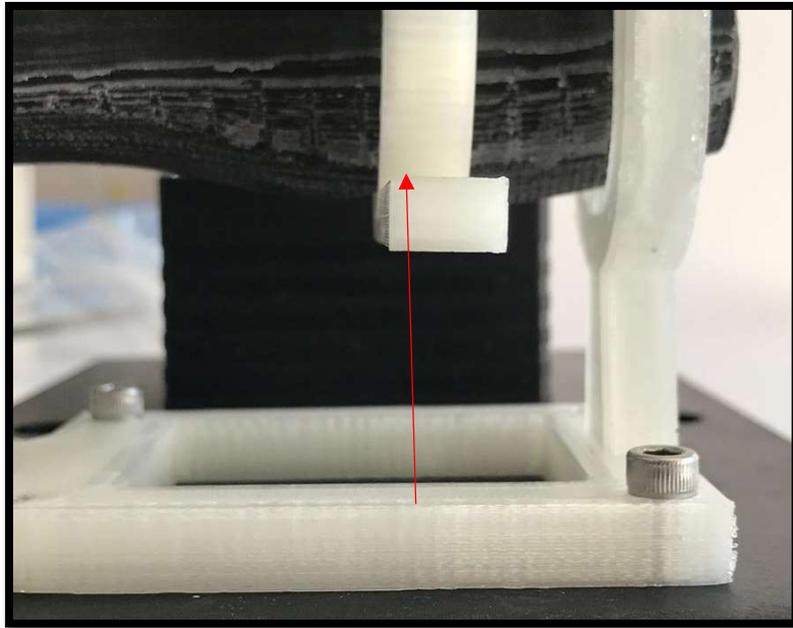


Figura 40. Altura medida con el calibre (elaboración propia)

Resultados

Conocido ya el método de ensayo, solo falta obtener los resultados para cada una de las cubiertas descritas anteriormente y realizar una gráfica comparativa de cada dónde se refleje estas variaciones.

Para el caso de la cubierta con un **12% de relleno**:

Fuerza (N)	Altura (mm)	Desplazamiento (mm)
0	24,16	0
9,81	26,17	2,01
19,62	28,4	4,24
29,43	29,72	5,56
39,24	30,16	6
49,05	30,93	6,77
58,86	31,47	7,31
69,651	31,57	7,41
78,48	32,02	7,86

Tabla 3. Resultados para el 12% de relleno

Los resultados para la cubierta del **15% de relleno**:

Fuerza (N)	Altura (mm)	Desplazamiento (mm)
0	21,08	0
11,772	22,03	0,95
20,601	23,84	2,76
29,43	25,39	4,31
38,259	25,86	4,78
49,05	26,55	5,47
58,86	26,77	5,69
67,689	27,1	6,02
78,48	27,38	6,3

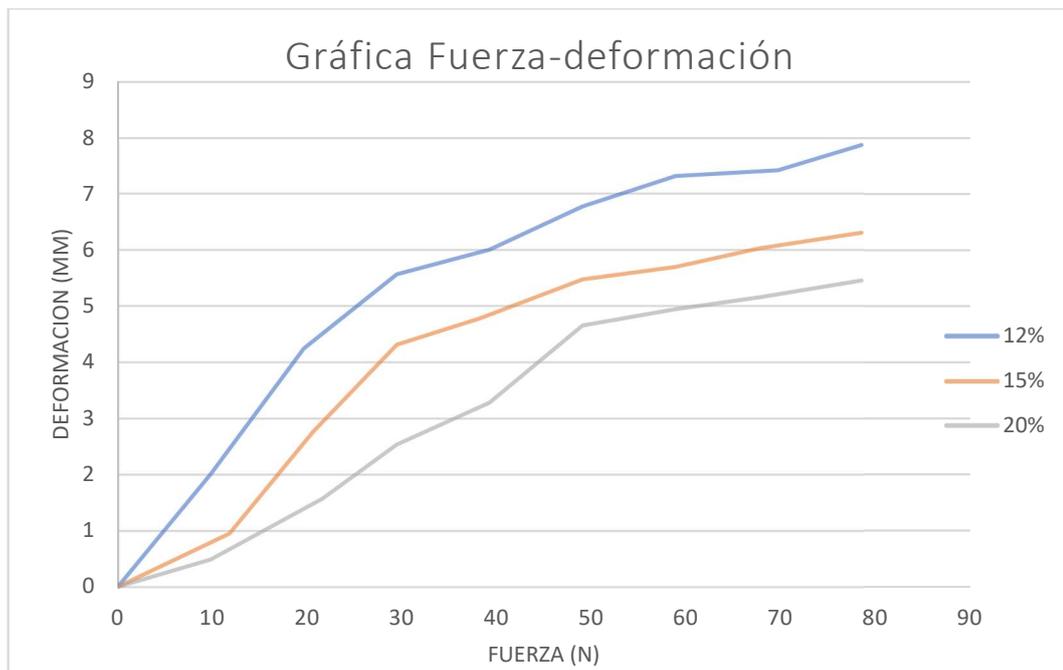
Tabla 4. Resultados para el 15% de relleno

En el caso del 20% de relleno:

Fuerza (N)	Altura (mm)	Desplazamiento (mm)
0	23,16	0
9,81	23,65	0,49
21,582	24,73	1,57
29,43	25,69	2,53
39,24	26,44	3,28
49,05	27,81	4,65
58,86	28,1	4,94
67,689	28,31	5,15
78,48	28,61	5,45

Tabla 5. Resultados para el 20% de relleno

Si observamos estos datos en una gráfica comparativa (gráfica 1), obtenemos 3 funciones en la que se pueden apreciar las diferencias sustanciales en la compresión a las mismas cargas. El límite se ha impuesto en 80N porque para el relleno del 12% se acerca al **límite de compresión**.



Gráfica 1. Gráfica comparativa según porcentaje de relleno

Lo primero a tener en cuenta es que, aunque 80N pueda parecer una cantidad muy pequeña como límite de compresión, la consideración tomada es una **fuerza puntual (N)** por la reducida superficie de aplicación del indentador. Si bien en el caso real la fuerza total va a ser distribuida a lo largo de la palma de la mano, en realidad el esfuerzo es una **presión (N/m²)**. De esto podemos asegurar que 80N como carga puntual es admisible.

Atendiendo a las gráficas obtenidas, vemos que **no existe linealidad** en ellas, cosa que es lógica si bien la compresión de los nervios hace que cada vez se requiera de más fuerza para comprimir la misma distancia. Como comentario general se aprecia como ante **variaciones de relleno pequeñas** (8 puntos porcentuales) la **dureza varía de manera tan sustancial**, cosa que se aprecia tanto objetiva como al tacto con la mano.

Podemos **concluir** que, aunque no es un recurso válido a la hora de la selección de la cubierta blanda, sirve para analizar objetivamente como influye la carga en la deformación y por consiguiente en la sensación de dureza. Es preciso recordar que el **factor humano** hace que cada individuo tenga una sensación de confort diferente, por lo que los resultados obtenidos no tienen como fin obtener unos valores óptimos.

3.3. NUCLEO RESISTENTE

Una vez definida la cubierta TPU, el siguiente paso es caracterizar el esqueleto que proporcione la resistencia mecánica necesaria. Para esta parte es necesario el uso de un material con una alta resistencia a la flexión (por las cargas supuestas). Para ello se usará **Nylon** de la compañía Ultimaker que posee excelentes propiedades tanto mecánicas como de degradación (véase **anexo 2**).

Otro de los aspectos que no se han tenido en cuenta en el apartado anterior y que si es de remarcar en este es la **compatibilidad de ambos materiales con** una adhesión entre ambos que da buen resultado, ya que de lo contrario se podrían generar movimientos relativos entre ambas partes.

Para el análisis del núcleo resistente haremos uso solamente del modelo de Nylon porque, a diferencia de la cubierta blanda, la dependencia de las propiedades que se van a medir (resistencia a flexión) depende únicamente del Nylon y no de la unión de ambos. En la figura 41 se observa el modelo del núcleo resistente aislado en el que se aprecian dos partes: **la empuñadura y unión al perfil tubular**.

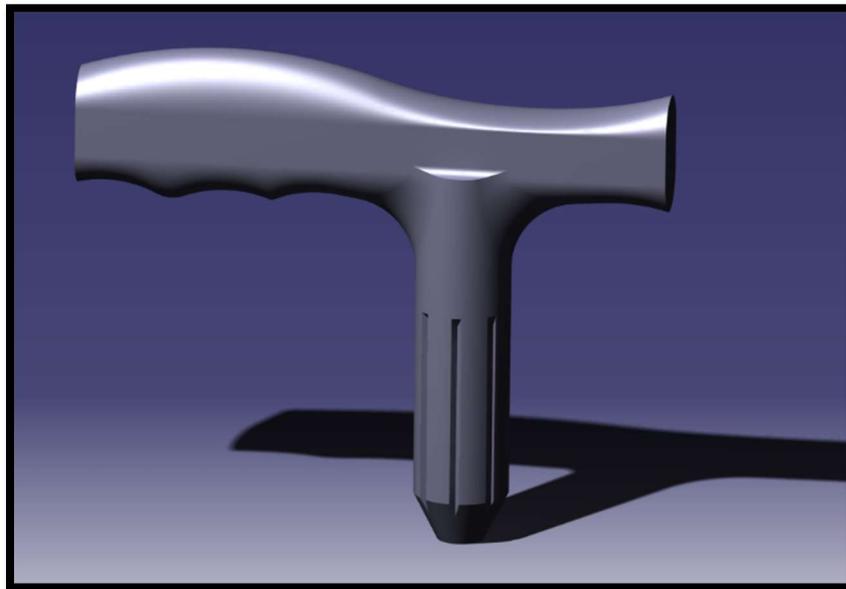


Figura 41. Modelo de núcleo resistente. (elaboración propia con CATIA V5)

Del modelo anterior se extrae que la parte más crítica a la hora de diseñar es la unión al perfil tubular. En la figura 42 se aprecia la parte descrita en la que se distinguen varias geometrías como son:

- **El tronco de cono** de la parte inferior servirá para poder introducir esta parte con mayor facilidad.

- **Los surcos con patrón circular** tienen como fin permitir la dilatación del Nylon o bien su deformación elástica cuando es introducido, además de servir para retener el adhesivo que asegurará una correcta unión y así evitar que se desaproveche una gran cantidad de este.

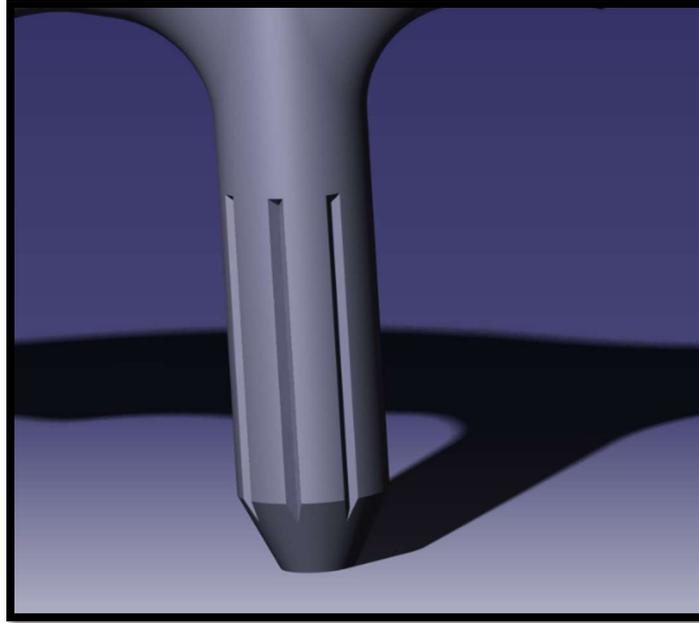


Figura 42. Detalle de unión con perfil tubular (elaboración propia con CATIA V5)

La unión entre ese perfil metálico y el componente de Nylon se hará mediante un ajuste con apriete. Si atendemos a las propiedades del Nylon, el **módulo de elasticidad del Nylon es más de 100 veces menor que el del aluminio**, podemos asegurar que existirá un ajuste suficiente con una deformación del perfil despreciable con respecto a la del Nylon.

Con el fin de evitar el movimiento relativo entre ambas partes, **se hará uso de un adhesivo** específico para este montaje. Para obtener la mejor solución, es necesario el asesoramiento de una de las empresas más conocidas del sector de adhesivos como es **Loctite** propiedad de Helkel©. A partir de las necesidades descritas anteriormente se aconsejó el uso del **Loctite 480** [18] (figura 43). Este es un adhesivo de cianoacrilato con refuerzo de caucho especial para aplicaciones donde se requieran impactos.



Figura 43. Loctite 480 (Loctite)

PARAMETROS DE IMPRESIÓN

Una vez definido todas las consideraciones previas, el siguiente paso es definir cómo se va a obtener la configuración de parámetros que proporcione la mayor resistencia mecánica posible.

El estudio del núcleo resistente no va a ser tan exhaustivo como requeriría esta parte para obtener la combinación óptima. El análisis que se va a realizar va a consistir en definir en qué grado van a influir ciertos parámetros de impresión, consideraciones geométricas y de orientación en la resistencia mecánica. Aun con estas simplificaciones, el estudio de esto es largo por lo que se definirán únicamente 3 parámetros y que corresponden a los principales: **Orientación de la empuñadura, velocidad de impresión y el espesor de la pared.**

Antes de analizar los parámetros de estudio es necesario imponer cuales son aquellos pertenecientes al propio material:

- **Temperatura de extrusión:** 260°C.
- **Temperatura de extrusión de primera capa:** 265°C.
- **Temperatura de placa:** 75°C.
- **Flujo:** 100%.
- **Ventilador:** 0%

Otros parámetros a tener en cuenta y que se mantendrán fijos son los relacionados con la morfología del chorro:

- **Altura de capa:** 0.2mm. Tiene que ser la misma que en el caso del TPU.
- **Ancho de chorro:** 0.3 mm.

Hay que tener en cuenta que el Nylon tiene gran contracción térmica, de ahí que haya que considerar el **efecto del warping** (figura 44). Para evitar esto, la velocidad del ventilador que enfría el material al ser extruido será 0 para así hacer que el enfriamiento se alargue en el tiempo.

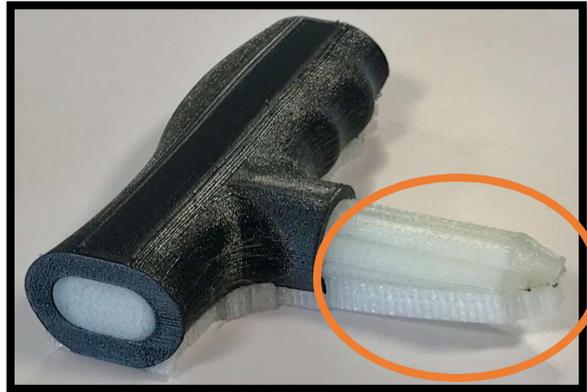


Figura 44. Warping (elaboración propia)

La temperatura de la cámara climática en este caso va a ser de 65°C para así mantener la temperatura constante, pero sin llegar a degradarse los filamentos de impresión.

Una vez marcados anteriormente los valores variables, solo queda definir que valores son los que nos den una idea de la variación de propiedades según la modificación de estos. Es por esto por lo que se van a crear 4 perfiles de parámetros donde los valores característicos vienen recogidos en la **tabla 6**.

	Orientación	velocidad (mm/s)	Espesor de pared (mm)
Perfil 1 (base)	xy	70	6
Perfil 2	xz/yz	70	6
Perfil 3	xy	40	6
Perfil 4	xy	70	3

Tabla 6. Matriz de ensayos del núcleo resistente

Como se puede observar las variaciones de cada parámetro se han hecho en base a un perfil (Perfil 1) para así poder hacer una **matriz de ensayos** sencilla. Los valores de este perfil base han sido seleccionados teniendo en cuenta tanto las indicaciones del fabricante como la propia experiencia en otras impresiones con el mismo material. Dentro de las modificaciones se observa que las variaciones son bruscas para así ver si las propiedades se ven afectadas en igual medida.

La velocidad hace referencia a la velocidad de impresión general, siendo reducida en 10 mm/s para la impresión de las paredes para que así el acabado sea mejor.

Una vez planteados los ensayos es necesario tener en cuenta otros aspectos. El principal de todos es la necesidad de uso de un **material auxiliar**, si tenemos en cuenta que anteriormente se explicó que estos núcleos resistentes se imprimirán independientemente de la cubierta. De entre las posibilidades de materiales auxiliares se ha optado primeramente por el **PVA** (polivinil alcohol) y de forma sustitutiva si no pudiera ser por el Ultimaker **Breakaway**.

La imposibilidad del uso del PVA se debe a que las propiedades físicas varían en gran medida por el uso de la cámara climática. El reblandecimiento del material produce desde obstrucciones hasta imposibilidad de ser cebado por el motor. Es por esto por lo que atendiendo a las propiedades del **Breakaway**, este permite ser utilizado en ambientes con una temperatura elevada (en este caso 65°C).

Las condiciones de impresión del Breakaway serán las siguientes:

- **Temperatura de extrusión:** 230°C.
- **Temperatura de extrusión de primera capa:** 230°C.
- **Temperatura de placa:** 75°C.
- **Flujo:** 100%.
- **Ventilador:** 100%
- **Porcentaje de relleno:** 40%

En cuanto a la **morfología** del chorro extruido es **exactamente igual** a las del chorro de Nylon.

ENSAYOS

El objetivo de este ensayo es medir cuál de las combinaciones impresas tiene una mayor **resistencia mecánica**. Aunque este ensayo no está estandarizado, lo que se busca es comparar resultados para comprobar en qué grado afectan los parámetros modificados a la resistencia.

Para llevarlo a cabo, el ensayo se basará en hacer flexionar la empuñadura introducido en un macizo de acero taladrado convenientemente tal y como se muestra en la figura 45.



Figura 45. Macizos más empuñadura unidos. (elaboración propia)

El ensayo constará de un dinamómetro (Semejante al utilizado en el ensayo de ergonomía, pero con 200kg de carga máxima) para medir la fuerza a la que rompe la empuñadura. Para ello se usarán 2 tornillos de banco anclados a una misma mesa de trabajo, donde en uno se situará la empuñadura convenientemente amordazado y otro servirá para hacer flexionar regulando la distancia entre las garras de la mordaza. En la figura 46 se puede observar una ilustración del banco de ensayos donde se desgranar cada uno de los componentes.

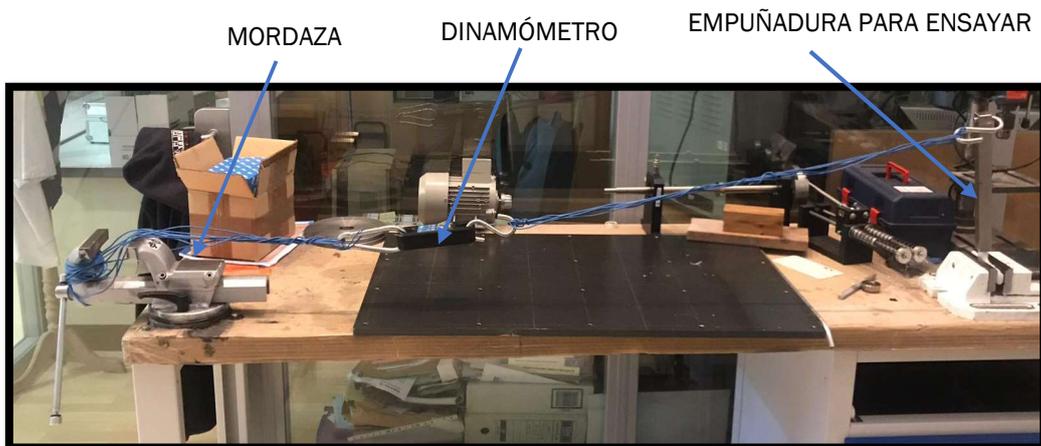


Figura 46. Mesa de ensayos a flexión. (elaboración propia)

Antes de conocer los valores obtenidos es preciso conocer las inercias de cada tipo de empuñadura y así poder obtener que valores teóricos de resistencia tendríamos y compararlos con los obtenidos del ensayo. Se considera que la **zona de rotura es la zona del empotramiento**, con lo que la **sección será una elipse (figura 46)**. Cabe recordar que en la figura 22 se expuso que el momento reactivo en el empotramiento era **$M=P \cdot L$** .

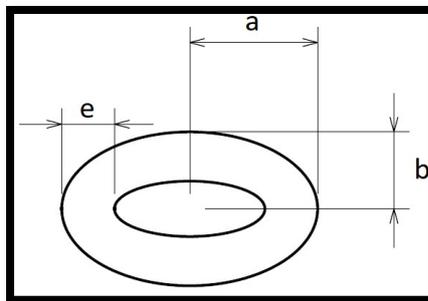


Figura 46. Sección elíptica hueca. (elaboración propia)

$$I_{6mm} = \frac{\pi}{4} (a \cdot b^3 - (a - e) \cdot (b - e)^3) = 12709.43 \text{ mm}^4$$

$$I_{3mm} = 10155.1 \text{ mm}^4$$

De las inercias se ha despreciado la relativa al relleno ya que representa menos del 1% de la inercia total, por lo que la consideramos despreciable. Conocido ya esto podemos calcular la tensión máxima de rotura que será:

$$\sigma_{max} = \frac{P \cdot L \cdot \cos(\alpha)}{I} \cdot y_{max}$$

Donde α es el Angulo debido a la diferencia de altura entre el extremo de la barra y la mordaza móvil, que calculado da un valor de **7.758°**.

Los datos medidos con el dinamómetro se reflejan en la tabla 7. En el perfil 2 (impresión en el eje z) no se han obtenido resultado alguno ya que la introducción en el tocho fue imposible ante la rotura previa imprevista.

Perfil	P1 (N)	P2 (N)	Pmedio (N)
Perfil 1 (base)	372,78	353,16	362,97
Perfil 2	0	0	0
Perfil 3	250,155	279,585	264,87
Perfil 4	93,195	88,29	90,7425

Tabla 7. Resultados del ensayo mecánico.

De aquí obtenemos que la tensión máxima para cada uno de los casos ensayados es:

Perfil de parámetros	Tensión máxima (σ_{max}) MPa
Perfil 1 (base)	84.89
Perfil 3	61.94
Perfil 4	26.56

A tenor de los resultados de **tensión máxima obtenidos**, el perfil 1 y 4 deberían tener resultados semejantes, ya que los parámetros de proceso son iguales, con la salvedad del ancho de pared. De esto deducimos que si atendemos a la fórmula del cálculo de la tensión máxima (con las consideraciones **tanto isotropía como de linealidad** característico de materiales homogéneos) no va a ser válida en ningún caso.

La tecnología FDM® se caracteriza por la gran anisotropía de las piezas que se obtienen ya que en una dirección (la de impresión) el material esta homogéneamente impreso, mientras que en las direcciones perpendiculares existen “soldaduras” entre churros que modifican en gran medida la resistencia mecánica.

La **primera conclusión** a la que se llega después de lo expuesto en el párrafo anterior es que el cálculo de la tensión máxima de rotura en la empuñadura no podrá ser realizado por las expresiones simplificadas. Además,

como se expuso al comienzo del apartado 3, no existe forma de calcular previamente (CAE) la distribución de tensiones en la empuñadura por la poca madurez de esta tecnología.

A la vista de los resultados de las cargas de rotura obtenidos vemos que la **combinación de parámetros primera** que consideramos es la que mayor resistencia mecánica tiene. La razón por la cual las **velocidades mayores son mejores que las bajas** se debe a que la temperatura del chorro colindante es mayor ya que el tiempo de enfriamiento es menor ante una nueva pasada [21], si bien la **cámara climática** hace que la temperatura se mantenga constante y suficientemente alta para que la unión entre churros sea mejor [11].

Como era de esperar el perfil 2 es el que menos carga soporta, llegando al punto de no ser viable por la **rotura al intentar ser introducido**. Analizando las causas de esta rotura previa imprevista vemos que la **fractura es limpia y a una misma capa**, con lo que se deduce que viene dada por la debilidad de las **uniones entre capas** (soldaduras), además de por haber aplicado un esfuerzo cortante al introducirlo, produciendo un movimiento relativo entre las 2 capas. La morfología intrincada hace que sea complicado no aplicar este tipo de esfuerzos, por lo que esta orientación queda descartada. En la figura 47 se puede ver la rotura del núcleo resistente impreso en el eje z.



Figura 47. Sección de rotura de la empuñadura impreso en el eje z.
(elaboración propia)

4. CONCLUSIONES

La primera conclusión a la que se ha llegado es la **viabilidad de la fabricación de la empuñadura en dos materiales en una misma impresión**. Las ventajas de esta forma de fabricación radican en un menor tiempo de ejecución, además de permitir la unión de piezas que por separado sería complicado o que precisarían de uniones tales como adhesivos o bien remaches o tornillos.

Se demuestra la versatilidad de la tecnología FDM® en tanto que permite obtener superficies tan diferentes, como son unas blandas y deformables elásticamente, y otras duras y resistentes. Todo lo anterior hace de esta tecnología la mejor opción tanto para elementos a medida como objetos con solicitaciones tanto de resistencia como de ergonomía.

En cuanto a la resistencia mecánica, de los más de 90 parámetros utilizados, solamente se han modificado un número muy reducido de ellos. Si bien no podemos asegurar que la mejor combinación obtenida sea la mejor de todas las posibles, si podemos inferir que **no todos los parámetros modificarán de igual manera la resistencia mecánica**, y que además de los parámetros, **la orientación** será factores igual de determinantes que los primeros. Se demuestra además las dificultades de obtener los valores de tensión máxima por las variaciones tan grandes de propiedades de unas direcciones a otras.

En cuanto a la **cubierta blanda**, se ha podido obtener satisfactoriamente una que cumple con las exigencias buscadas, como es el confort mediante la deformación de esta. Otra conclusión de esta parte es que ha sido posible conseguir obtener unos resultados objetivos dentro de la subjetividad que caracteriza a la ergonomía. Además, la variación de la dureza se puede realizar paramétricamente modificando únicamente un único parámetro.

5. LINEAS FUTURAS

El desarrollo futuro de estos bastones vendrá dado por la **digitalización** para obtener empuñaduras adaptados a cada uno de los usuarios. Además, el uso de **materiales con mejores propiedades mecánicas (Nylon con fibras)** permitirá reducir tanto la cantidad de material utilizado como mejorar la resistencia mecánica ante cargas no previstas.

Para conocer cuál es la combinación de parámetros que mejor resistencia mecánica ofrece es necesario un **estudio más exhaustivo** de una buena parte de ellos. Para ello habrá que hacer uso de un diseño de experimentos más avanzado.

El **acabado superficial** es una pieza clave en el desarrollo de productos, por lo que un estudio de las diferentes opciones que existen es fundamental.

BIBLIOGRAFÍA

<https://www.actasanitaria.com/hospital-gregorio-maranon-crea-la-primera-comision-impresion-3d-hospitalaria/> [1]

<http://www.eleconomista.es/ecomotor/motor/noticias/8713451/10/17/Impresion-3D-en-metal-el-remedio-de-Renault-para-aligerar-un-25-los-motores-de-sus-camiones-y-mejorar-las-prestaciones.html> [2]

<https://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/impresora-3d-gigante-para-construir-casas-en-24-horas-471393258899> [3]

<https://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/la-primera-bioimpresora-comercial-de-organos> [4]

https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-11-05/restaurante-comida-impresion-3d-food-ink_1285299/ [5]

Redwood, Ben (2017): The 3D Printing Handbook; 3D Hubs; ISBN:978-90-827485-0-5 [6]

Gibson, Ian (2015): Additive Manufacturing Technologies; ISBN: 978-1-4939-2112-6 [7]

<https://smartmaterials3d.com/es/producto-para-la-venta-al-publico/32-dimafix.html> [8]

Kai Chua C. Fai Leong K (2017): 3D printing and additive manufacturing; ISBN: 978-981-3146-75-4 [9]

IMPRESORAS:

<https://ultimaker.com/download/21901/Ultimaker%203%20manual%20%28ES%29.pdf> [10]

Eduardo Valverde Lorenzo. Memoria de TFG. Grado en Ingeniería Mecánica. [11]

PLA:

<https://www.textoscientificos.com/polimeros/acido-polilactico> [12]

https://smartmaterials3d.com/es/index.php?controller=attachment&id_attachment=99 [13]

ABS:

<https://ultimaker.com/download/67619/TDS%20ABS%20v3.011-spa-ES.pdf> [14]

TPU 95A:

<https://ultimaker.com/download/73768/TDS%20TPU%2095A%20v3.010%20ES.pdf> [15]

PVA:

<https://ultimaker.com/download/67873/TDS%20PVA%20v3.010-spa-ES.pdf> [16]

NYLON:

<https://ultimaker.com/download/67541/TDS%20Nylon%20v3.011-spa-ES.pdf> [17]

LOCTITE 480:

<http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/480-ES?pid=480&format=MTR&subformat=REAC&language=ES&plant=WERCS> [18]

Sven-Erik Hanel, Torbjorn Dartman, Measuring methods for comfort rating of seats and beds, [19]

<http://www.mark-10.com/instruments/stands/es30.html> [20]

Timothy J. Coogan (2016), Bond and part strength in fused deposition modeling [21]