

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

DESARROLLO DE UNA GARRA FLEXIBLE EN IMPRESIÓN 3D

Alumna: Agirregoikoa, Lopez, Oihane

Director: Diez, Sanchez, Mikel

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbo. 16, julio, 2019

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
LABURPENA.....	7
ABSTRACT.....	8
1. MEMORIA.....	9
1.1. Introducción.....	9
1.2. Contexto.....	10
1.3. Análisis del estado del arte.....	11
1.3.1 Análisis del estado del arte de la fabricación aditiva	11
1.3.2 Análisis del estado del arte de garras flexibles	13
1.4. Objetivos y alcance del trabajo	17
1.5. Beneficios que aporta el trabajo.....	19
1.5.1. Beneficios Técnicos	19
1.5.2. Beneficios Económicos	19
1.5.3. Beneficios ambientales	19
1.6. Análisis de alternativas	20
1.6.1. Alternativas de diseño	20
1.6.2. Alternativa de materiales	23
1.6.3. Alternativas de procesos de fabricación aditiva	24
1.7. Análisis de riesgos.....	26
1.8. Selección/Descripción de la solución propuesta.....	28
1.9. Diseño	29
1.10. Cálculos.....	30
1.11. Descripción de los resultados	35
1.12. Descripción de fases y tareas.....	39
1.12.1. Análisis del estado del arte	39
1.12.2. Diseño	39
1.12.3. Fabricación	39
1.12.4. Validación experimental	40
1.12.5. Redacción del proyecto	40
1.13. Diagrama de Gantt	41

2.	ASPECTOS ECONÓMICOS	42
2.1.	Descripción del descargo de gastos	42
3.	CONCLUSIONES	44
4.	BIBLIOGRAFIA.....	45
5.	ANEXO I: Dimensionamiento del dedo. Cotas en mm.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Garra con dedos rígidos de aluminio.</i>	10
<i>Figura 2: SLA. [2]</i>	11
<i>Figura 3: SLS plástico. [4]</i>	12
<i>Figura 4: SLS metal. [5]</i>	12
<i>Figura 5: Polyjet. [7]</i>	13
<i>Figura 6: FDM. [8]</i>	13
<i>Figura 7: Adaptive shape gripper. [10]</i>	14
<i>Figura 8: Soft gripper abierto y cerrado. [11]</i>	14
<i>Figura 9: Bionic Handling Assistant (elephant). [12]</i>	15
<i>Figura 10: Bionic Handling Assistant (octopus). [13]</i>	15
<i>Figura 11: Garra robótica. [14]</i>	16
<i>Figura 12: Dedo articulado. [15]</i>	16
<i>Figura 13: Actuador neumático FESTO. [16]</i>	17
<i>Figura 14: Plano posicionamiento de los agujeros. [16]</i>	17
<i>Figura 15: Piezas de diferentes geometrías.</i>	18
<i>Figura 16: Dedo articulado con y sin fuerza aplicada.</i>	20
<i>Figura 17: Mecanismos biestables. [18]</i>	21
<i>Figura 18: Diseño del Mecanismo biestable. [18]</i>	21
<i>Figura 19: Fabricación en PLA del mecanismo biestable.</i>	21
<i>Figura 20: Pinza como mecanismo tradicional. [20]</i>	22
<i>Figura 21: Pinza como “compliant mechanisms”. [20]</i>	22
<i>Figura 22: Dedo fabricado en PP con y sin carga aplicada.</i>	23
<i>Figura 23: Deformaciones en nylon y PP.</i>	24
<i>Figura 24: Impresora Markforged modelo Mark Two.</i>	25
<i>Figura 25: Efecto “warping”.</i>	26
<i>Figura 26: Quemaduras.</i>	27
<i>Figura 27: Rotura de los nervios.</i>	27
<i>Figura 28: Diseño detallado del dedo.</i>	29
<i>Figura 29: Resultado simulación EF carga 2,5N.</i>	31
<i>Figura 30: Resultado simulación EF carga 3,5N.</i>	31
<i>Figura 31: Resultado simulación EF carga 4,5N.</i>	32
<i>Figura 32: Resultado simulación EF carga 5,5N.</i>	32
<i>Figura 33: Resultado simulación EF carga 6,5N.</i>	33
<i>Figura 34: Resultado simulación EF carga 7,5N.</i>	33
<i>Figura 35: Resultado simulación EF carga máxima admisible (tensión).</i>	34
<i>Figura 36: Resultado simulación EF carga máxima admisible (deformación).</i>	34
<i>Figura 37: Garra flexible.</i>	35
<i>Figura 38: Prueba de agarre geometría tipo disco.</i>	35
<i>Figura 39: Prueba de agarre geometría tipo rectangular.</i>	36
<i>Figura 40: Prueba de agarre geometría tipo perfil.</i>	36
<i>Figura 41: Prueba de agarre geometría tipo L.</i>	37
<i>Figura 42: Prueba de agarre geometría tipo cilindro macizo.</i>	37
<i>Figura 43: Prueba de agarre rollo cinta adhesiva.</i>	38

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Resultado del AMFE.</i>	26
<i>Tabla 2: Resultados de las simulaciones y las pruebas experimentales.</i>	30
<i>Tabla 3: Diagrama de Gantt.</i>	41
<i>Tabla 4: Descargo de gastos de un dedo.</i>	42
<i>Tabla 5: Descargo total del proyecto.</i>	43

ACRÓNIMOS:

CAD	Computer Aided Design
AM	Additive manufacturing
SLA	Estereolitografía
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
CNC	Control Numérico Computarizado
PLA	Polylactic Acid
ABS	Acrilonitrilo Butadeido Estireno
PP	Polipropileno
ATEX	ATmósferas EXplosivas
AMFE	Análisis de Modo de Fallo y Efectos
AEF	Análisis de Elementos Finitos
EF	Elementos Finitos

RESUMEN

En este proyecto se van a diseñar y a fabricar unos dedos flexibles con la finalidad de desarrollar una garra (los dedos junto con el actuador neumático FESTO) para poder coger objetos de diferentes geometrías sin cambiar los dedos, cosa que con las garras comerciales es más difícil de conseguir.

Para esto se hará un estudio del estado del arte para analizar qué tipo de garras se encuentran en la industria y se estudiarán diferentes alternativas en cuanto a diseños conceptuales, materiales posibles y procesos de fabricación.

Después de este estudio exhaustivo se optará por un diseño sencillo que consistirá en un par de paredes inclinadas unidas con nervios transversales y una zona de anclaje para alojar los tornillos de fijación al actuador neumático.

Tanto para el testeo de los diferentes diseños conceptuales probados como para la realización del diseño final de los dedos, se ha utilizado la impresión 3D con material nylon que nos aporta la flexibilidad buscada.

Una vez fijado el diseño definitivo se realizarán estudios de elementos finitos con diferentes cargas aplicadas para poder compararlo después con las pruebas experimentales. También se calculará la carga máxima admisible para establecer un coeficiente de seguridad adecuado. Posteriormente se imprimirán tres dedos iguales, se montarán en el actuador neumático y se someterán a varias pruebas de sujeción de diferentes objetos.

LABURPENA

Proiektu honetan hatz malguak diseinatu eta fabrikatuko dira, atzapar bat (behatzak FESTO eragingailu pneumatikoarekin batera) garatzeko helburuarekin, geometria desberdineko objektuak hartu ahal izateko behatzak kendu gabe. Azken hau merkataritzako atzaparrekin lortzea zaila da.

Honetarako, artearen egoera aztertuko da industrian ze atzapar mota dauden aztertzeko, eta diseinu kontzeptual, material posible eta fabrikazio prozesu aldetik alternatiba desberdinak ikasiko dira.

Azterketa zehatz honen ostean, diseinu simple bat aukeratuko da zeina zeharkako zainez elkartutako bi horma okerrez osatuta egongo da eta ainguraketa gune bat eragingailu pneumatikoaren torlojuak kokatzeko.

Frogatutako diseinu kontzeptual ezberdinen frogetarako eta hatzaren behin betiko diseinua burutzeko, 3D inprimaketa erabili da nylon materialarekin nahi den malgutasuna lortzen delako.

Behin betiko diseinua zehaztu ondoren aplikaturiko karga ezberdinetako elementu finituko azterketak egingo dira beranduago froga esperimentalekin alderatu ahal izateko. Horretaz aparte, segurtasun koefiziente egoki bat lortzeko atzamarrak jasan dezakeen karga maximoa kalkulatu da. Ondoren hiru atzamar berdin inprimatu dira, eragingailu pneumatikoan muntatu dira eta objektu ezberdinetako euste frogetara ezarri dira. Benetako proba horien emaitzak elementu finituen analisisan lortutakoekin alderatu dira.

ABSTRACT

In this project, flexible fingers are going to be designed and manufactured with the purpose of developing a claw (the fingers together with the FESTO pneumatic actuator) to be able to take objects of different geometries without changing fingers, something that with commercial claws is more difficult to get.

For this, a study of the state of the art will be made to analyze what kind of claws are found in the industry. Different alternatives will be studied in terms of conceptual designs, possible materials and manufacturing processes.

After this exhaustive study, a simple designed will be chosen that will consist of a pair inclined walls joined with transverse ribs and an anchoring area to accommodate the fastening screws to the pneumatic actuator.

Both for the testing of the different conceptual designs tested and for the realization of the final design of the fingers, 3D printing with nylon material has been used to give flexibility needed.

Once the definitive design is decided, finite element studies with different applied loads will be carried out in order to be able to compare with experimental tests. The maximum permissible load will also be calculated to establish an adequate safety coefficient. Afterwards, three equal fingers will be printed, they will be assembled on the pneumatic actuator and they will be tested to several clamping tests of different objects.

1. MEMORIA

1.1. Introducción

Durante el trabajo se van a estudiar diferentes opciones para poder desarrollar una garra (conjunto de tres dedos de diseño propio y un actuador neumático comercial) que simule una mano con la que poder coger y sujetar objetos de diferentes aspectos.

Cuando se habla de unas garras flexibles no se habla solo de la flexibilidad del material, sino a la posibilidad de adaptación a diferentes objetos. Se necesita que, con la misma garra, sin ninguna necesidad de cambios, puedan cogerse piezas de distintas geometrías. Esto va a tener diferentes aplicaciones: agarrar objetos y desplazarlos con movimientos precisos, la recogida de frutas, la ayuda en cadenas de montaje en industria...

Una alternativa interesante para fabricar los dedos de este proyecto es la fabricación aditiva ya que es un proceso de fabricación altamente efectivo en cuanto a versatilidad, gasto energético y coste para desarrollo de producto y fabricación de tiradas cortas y de piezas completamente personalizadas. Cierto es que tiene sus limitaciones en cuanto a velocidad de fabricación, tamaño de pieza, materiales disponibles... pero en el presente proyecto, al tratarse de un desarrollo de producto, es precisamente donde las ventajas vencen a las limitaciones.

En la fabricación aditiva todo parte de un archivo CAD (Computer Aided Design) en 3D previamente diseñado el cual puede contener casi cualquier complejidad geométrica. Esta capacidad de fabricar geometrías complejas es la que permite entre otras cosas diseñar mecanismos biónicos que imiten a ciertos animales.

1.2. Contexto

La impresión 3D es un concepto muy genérico en el que podrán venir englobadas todas las tecnologías de fabricación aditiva (también conocida por sus siglas en inglés: Additive Manufacturing - AM), pero se suelen referir a aquellas orientadas a la oficina técnica (mientras que la fabricación aditiva se refiere más a la industria), donde prima lo rápido y lo económico, el mantenimiento es muy bajo y la calidad aceptable. Tiene además la ventaja de permitir dotar de color a nuestros prototipos. Se trata de algo muy sencillo, limpio, económico y la base de la tecnología es casi tan sencilla como una impresora de papel, pero en tres dimensiones.

En estas tecnologías, el objeto en cuestión es creado directamente a partir de un fichero CAD 3D. Tomando este fichero y mediante secciones en capas horizontales, depositando un material o sinterizando polvos se irá formando el objeto capa por capa. El espesor de estas capas varía según el proceso que vayamos a utilizar y es un parámetro bastante importante, ya que la velocidad de impresión, el acabado superficial y las tolerancias dependen de ello.

Las impresoras 3D ofrecen la capacidad para imprimir piezas hechas de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas.

Estas tecnologías son perfectamente adecuadas para el mundo de la arquitectura y para las ingenierías que pretenden realizar un prototipo, para un mejor estudio del diseño desarrollado.

En cuanto a las garras que habitualmente se utilizan en la industria lo más común es que tengan dedos rígidos y poca capacidad de adaptarse a geometrías diferentes. Este es el caso por ejemplo de la garra disponible en el taller al principio del proyecto (figura 1) que son de aluminio y para poder dotarles de algo más de flexibilidad se les colocó un material elastómero que permitía una mínima adaptación a diferentes geometrías.



Figura 1: Garra con dedos rígidos de aluminio.

Estos dedos híbridos metal-elastómero son los que se pretenden sustituir por el nuevo diseño desarrollado en este proyecto.

1.3. Análisis del estado del arte

Aunque hace unos años que la fabricación aditiva ya forma parte en muchos sectores, aún queda mucho por profundizar. Para buscar opciones posibles para desarrollar la garra flexible, se ha realizado una ardua búsqueda donde se encontraron diferentes diseños y mecanismos, pero todo sin desviarnos del principal objetivo: la flexibilidad de la garra para adaptarse a diferentes geometrías.

1.3.1 Análisis del estado del arte de la fabricación aditiva

Se describen a continuación las principales tecnologías de AM:

Estereolitografía (SLA): Fabricación de objetos sólidos a través de un haz de luz ultravioleta. Los sistemas SLA emplean datos digitales CAD para convertir resinas líquidas fotosensibles en secciones transversales sólidas, capa a capa, para construir piezas precisas. Se basa en el paso de una resina líquida a estado sólido, donde el cambio de fase se produce por la acción de un láser con la misma longitud de onda que la luz ultravioleta, que cura y endurece la resina (figura 2). [1]

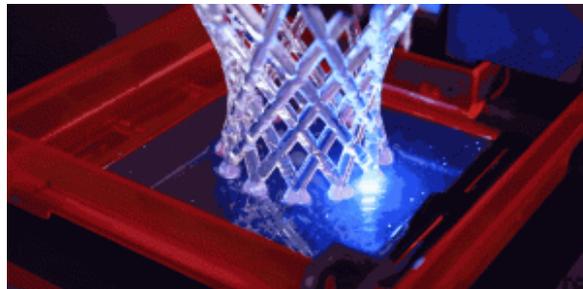


Figura 2: SLA. [2]

Sinterizado láser plástico (SLS plástico): Esta tecnología dispone de una bandeja de construcción en donde un mecanismo aplica una capa homogénea de polvo de poliamida sobre la anterior por medio de un labio llamado recoater, que se desplaza alisando la capa de polvo depositada. Es entonces cuando el láser (de CO2) recibe la información de la sección de la pieza correspondiente a dicha capa y sinteriza el material que pasa a ser sólido en esa capa a través de su acción, haciendo que las partículas de polvo se unan a la capa anterior. El recoater aplica una nueva capa de material que el láser solidifica y así sucesivamente hasta que se termina de construir la pieza completa (figura 3). [3]



Figura 3: SLS plástico. [4]

Sinterizado láser metal (SLS metal): El funcionamiento es similar al anterior: existe una cubeta con polvo metálico el cual se sinteriza a través de la acción de un láser, se añade otra capa de polvo, se vuelve a sinterizar y así sucesivamente hasta llegar a finalizar la pieza (figura 4).



Figura 4: SLS metal. [5]

Polyjet (Objet): Esta máquina puede trabajar con dos materiales diferentes de modo que ciertas partes de la pieza pueden ser de un material u otro, o de mezcla de ambos en distintas proporciones. Esta tecnología utiliza resinas líquidas y permite imprimir el material mediante cuatro inyectores. En ambos lados del cabezal móvil van instaladas dos lámparas de luz ultravioleta, de modo que al moverse el cabezal a través de los ejes X e Y depositando el material, se produce el curado de éste, instantes después de su deposición. Posteriormente la bandeja desciende y se repite el proceso hasta obtener la pieza (figura 5). [6]

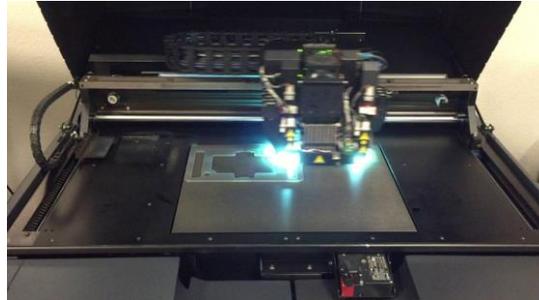


Figura 5: Polyjet. [7]

Fused deposition modeling (FDM): Este proceso se basa en el principio de los tres ejes de una máquina de control numérico computarizado (CNC), donde una boquilla alimentada por un filamento plástico se mueve en los ejes X e Y y deposita material allí donde se necesite. El filamento de material llega frío a la boquilla que está caliente de forma que el plástico se funde al pasar por ella. A medida que la boquilla se desplaza a través de la bandeja de construcción, deposita el hilo de material de acuerdo con la geometría a fabricar, y el plástico se adhiere a la capa anterior, lo que hace que por contraste de temperaturas este se endurezca inmediatamente. La bandeja se desplaza a lo largo del eje Z según se van completando secciones. Esta tecnología es una buena candidata para el desarrollo de las piezas del proyecto por su capacidad de imprimir materiales flexibles y por su ventaja de bajo coste (figura 6).

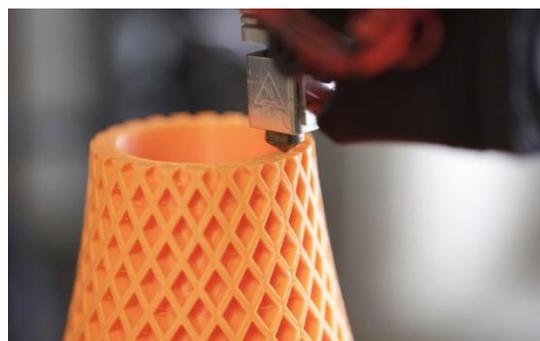


Figura 6: FDM. [8]

1.3.2 Análisis del estado del arte de garras flexibles

Buscando diferentes tipos de garras adaptativas se encontró un “adaptive shape gripper” (figura 7), que consiste en una membrana de silicona rellena de granos sólidos (pueden ser granos de café). Su funcionamiento se basa en la neumática y es el siguiente: la membrana se coloca

encima del objeto que se quiere coger, adquiriendo su forma. A continuación, se produce el vacío dentro de la mucosa por lo que los granos se compactan y queda como un sólido, pero con el hueco del objeto para poder agarrarlo. Una vez que se quiere soltar la piza, se vuelve a introducir aire en el interior para eliminar ese compactado y deshacer la forma del objeto. [9]

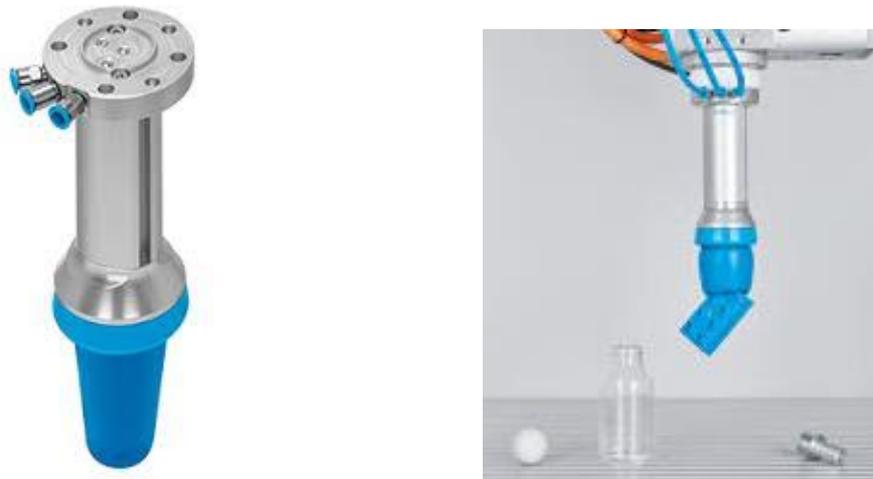


Figura 7: Adaptive shape gripper. [10]

Otras opciones son los mecanismos biónicos, que imitan a la naturaleza y sobre todo a los animales.

Algunos diseños diferentes al anterior pero que también funcionan neumáticamente son los denominados “soft gripper” (figura 8). Funcionan con aire comprimido para poder activarse e imitan el movimiento de los tentáculos de un pulpo.

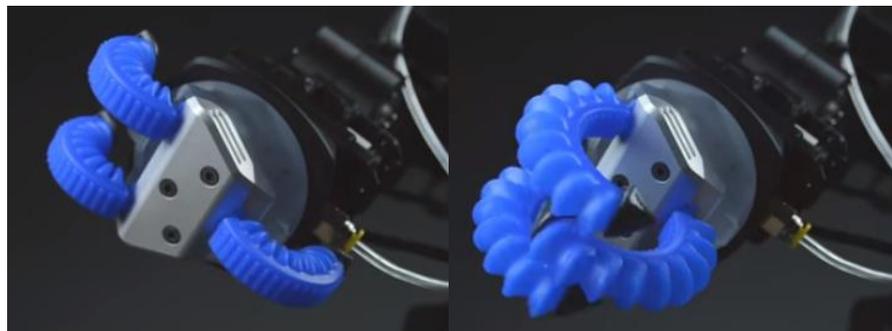


Figura 8: Soft gripper abierto y cerrado. [11]

Podemos tener la imitación de un elefante (figura 9), la de un pulpo (figura 10).



Figura 9: Bionic Handling Assistant (elephant). [12]



Figura 10: Bionic Handling Assistant (octopus). [13]

Este tipo de diseños son más bien experimentales, no estando aun comercializados y por lo tanto se prestan muy bien a ser fabricados en fabricación 3D mediante materiales flexibles.

Otro tipo de garras están basadas en la simulación de una mano humana para la adaptación de los objetos (figura 11). Pero éstas están más desarrolladas comercialmente y están más preparadas para fabricarlas por métodos convencionales.



Figura 11: Garra robótica. [14]

Otros diseños que no requieren tanto detalle son unos triángulos en tres dimensiones formados por dos paredes y nervios en su interior. Para esta idea se recogen varios diseños dependiendo del material y la funcionalidad. En algunas opciones encontraremos la ayuda de articulaciones (figura 12).



Figura 12: Dedo articulado. [15]

No todas las tecnologías pueden imprimir articulaciones. Por SLS plástico por ejemplo se pueden generar mecanismos, mientras que por FDM es más complicado y el tipo de mecanismo que puede generarse es más limitado. En esta solución, se pueden combinar materiales flexibles en las dos paredes delgadas con materiales rígidos para los nervios. El SLS no puede combinar materiales por lo que habría que fabricarlo de un solo material flexible, mientras que en FDM si es posible la combinación de materiales en la misma pieza.

1.4. Objetivos y alcance del trabajo

Se trata de diseñar y fabricar unos dedos flexibles compatibles con el cabezal FESTO HGDD-40-A-G2 (figura 13).



Figura 13: Actuador neumático FESTO. [16]

Las principales características del actuador son las siguientes [16]:

- Diámetro exterior: 74mm
- Carrera por dedo: 6mm
- Cilindro de doble efecto
- Masa máxima por dedo: 130g
- Fuerza de sujeción por dedo: entre 5 y 35N para 6 bar de presión (en función de la altura del punto de aplicación)
- Dos agujeros para los tornillos de amarre de métrica M4 separados entre ellos 10mm (figura 14).

Agujeros de anclaje para un dedo

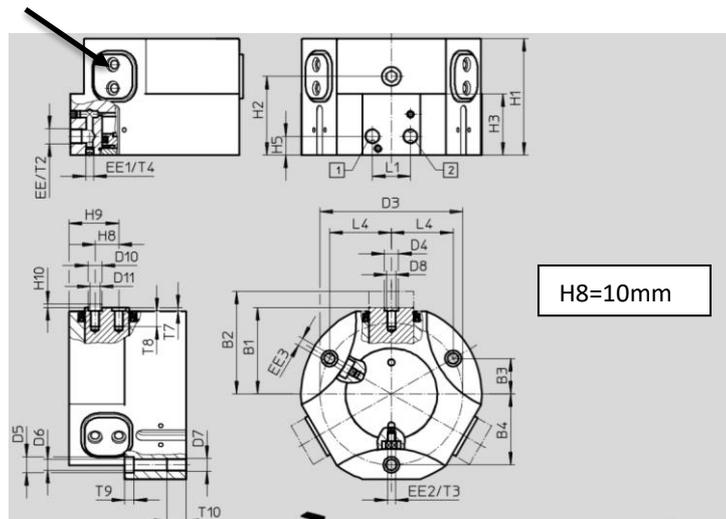


Figura 14: Plano posicionamiento de los agujeros. [16]

Y los objetivos concretos del proyecto son:

- Estudiar la geometría de diferentes garras flexibles.
- Desarrollar unos dedos compatibles con el actuador disponible que sean capaces de agarrar objetos de diferentes geometrías (figura 15) sin cambiar de dedos. Entre los objetos propuestos se encuentran: un cilindro, un disco, un rollo de cinta aislante, un prisma, una pieza en forma de L y una pieza rectangular. Sus detalles se especificarán más adelante.



Figura 15: Piezas de diferentes geometrías.

- Poder fabricar los dedos mediante fabricación aditiva.

A la hora de realizar el diseño no solo hay que tener en cuenta la geometría para conseguir nuestro objetivo, también habrá que elegir el material correcto para conseguir la flexibilidad y resistencia deseadas. Se analizarán diferentes diseños conceptuales con diferentes materiales y se escogerá la opción que se adapte mejor al cumplimiento de los objetivos para seguir adelante con el desarrollo.

1.5. Beneficios que aporta el trabajo

1.5.1. Beneficios Técnicos

- Se va a poder reducir el número de garras: gracias a que se puede crear un diseño propio, el mismo actuador neumático puede ser utilizado para una gran variedad de dedos.
- En caso de rotura de un dedo y disponiendo de una impresora 3D, no se depende de un plazo de entrega, siempre se va a conseguir una disponibilidad inmediata ya que se puede volver a imprimir en pocas horas el dedo ya diseñado; no hay que pedirlo a ningún lado ni habrá tiempos de espera de llegada del pedido.
- En caso de cambio de diseño para adaptarse a nuevos objetos, ofrece la posibilidad de realizarlo de manera personalizada con unos costes bajos.

A pesar de las ventajas mencionadas, hay ciertas limitaciones, como son el acabado superficial y la velocidad de fabricación. Por un lado, el acabado superficial no afecta negativamente al caso en cuestión, incluso es favorable, ya que conviene que la superficie que va a ir en contacto con el objeto tenga cierta rugosidad. Por otro lado, a pesar de que la velocidad de fabricación no es rápida, el tiempo que se tarda en disponer la pieza por fabricación aditiva es, en la mayoría de los casos, más corto que pidiéndola a un proveedor.

1.5.2. Beneficios Económicos

- Aunque se aumente la complejidad del diseño, no implica aumentar los costes de producción, ya que los tiempos y materiales usados en la fabricación aditiva no varían significativamente a pesar de la complejidad de la pieza a realizar.
- Resulta más barato fabricar una pieza en el taller que pedirla a los fabricantes con todos los costes que eso conlleva, no solo de fabricación sino también de transporte. En este caso el coste de cada dedo es de 22,968€, como se detalla más adelante.

1.5.3. Beneficios ambientales

- Al fabricarlo mediante fabricación aditiva conseguiremos cero residuos de producción, salvo en aquellos diseños que requieran soportes.
- Tras el fin de vida de la pieza, en caso de utilizar materiales termoplásticos o metálicos, éstos son reciclables.
- El hecho de fabricarlo en el punto de consumo elimina el impacto ambiental de transporte desde proveedor.

1.6. Análisis de alternativas

La primera decisión ha sido trabajar con fabricación aditiva. Los motivos han sido: la facilidad de cambiar de diseño, el coste (es más barato que fabricar un molde), no son necesarias estrictas tolerancias y no hay necesidad de utillaje.

Las siguientes decisiones se basan en seleccionar un diseño conceptual, un material y finalmente un proceso de fabricación aditiva.

1.6.1. Alternativas de diseño

Para un material rígido, se diseñó un mecanismo con el que gracias a la ayuda de una goma podría conseguirse cierta flexión al aplicar una fuerza (basado en los dedos articulados mencionados en el estado del arte) (figura 16).

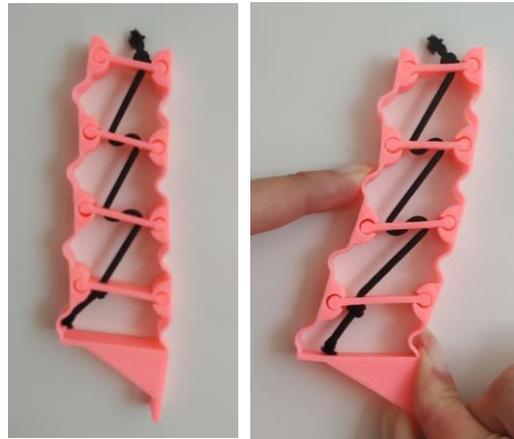


Figura 16: Dedo articulado con y sin fuerza aplicada.

Se imprimió en ácido poliláctico (PLA) pero la flexibilidad aportada no era suficiente, no iba a conseguirse una buena adaptación a diferentes objetos y era demasiado rígido. Para este tipo de materiales se estudiaron los mecanismos biestables. Son mecanismos que tienen dos posiciones de equilibrio estable dentro de un rango de movimiento (figura 17). Sus ventajas incluyen la capacidad de permanecer en dos posiciones sin entrada de energía. Debido a esta capacidad, los mecanismos biestables tienen aplicaciones en muchos dispositivos como interruptores y cierres. Para su funcionamiento se utilizan paredes delgadas en aquellas zonas donde se cambiará la posición de equilibrio. [\[17\]](#)

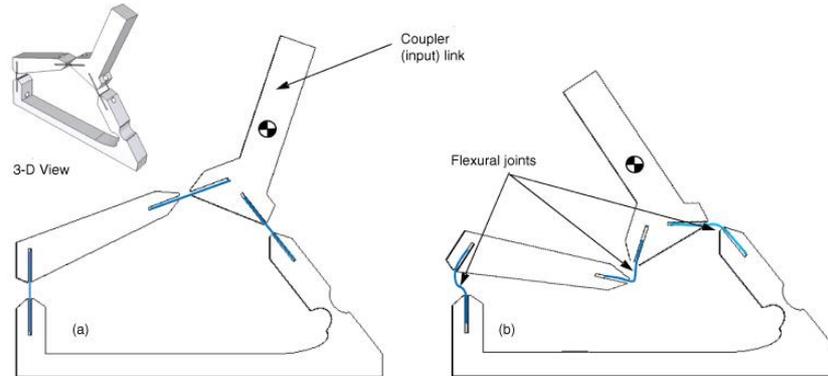


Figura 17: Mecanismos biestables. [18]

Al querer comprobar este tipo de diseño se diseñó e imprimió una especie de acordeón (figura 18) en PLA pero el material seguía siendo demasiado rígido o el diseño no era el adecuado porque se rompió antes de conseguir deformarlo siquiera (figura 19).

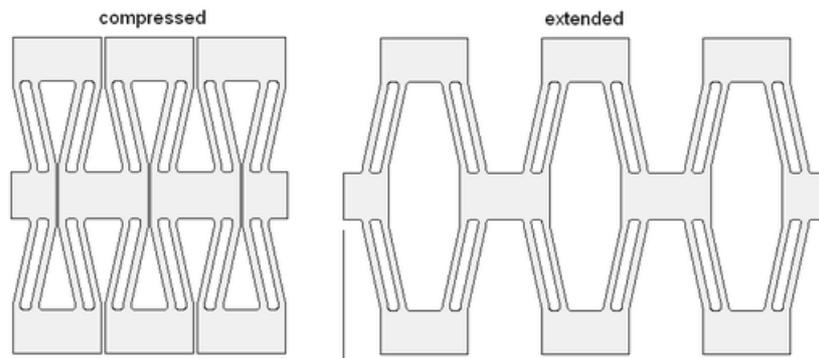


Figura 18: Diseño del Mecanismo biestable. [18]



Figura 19: Fabricación en PLA del mecanismo biestable.

Para los materiales flexibles se encuentran los “compliant mechanisms”, que son una particularidad de los mecanismos biestables. Son mecanismos flexibles que transfieren una fuerza de entrada y un desplazamiento en un extremo, a una fuerza de salida y un desplazamiento en otro extremo a través de la deformación elástica del cuerpo que contiene zonas esbeltas que se doblan. Los “compliant mechanisms” tienen un número de ventajas sobre los mecanismos tradicionales, como por ejemplo la cantidad de partes; los “compliant mechanisms” tienen una reducida cantidad de partes porque son partes flexibles en vez de tener bisagras o rodamientos o resortes separados (figuras 20 y 21). También son más baratos por el proceso en el que son fabricados, son capaces de reproducir movimientos precisos, son menos pesados por la simplicidad de su diseño y son más predecibles. [19]

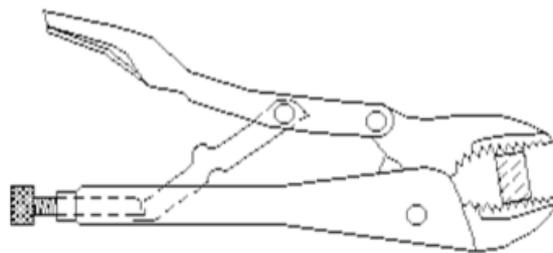


Figura 20: Pinza como mecanismo tradicional. [20]

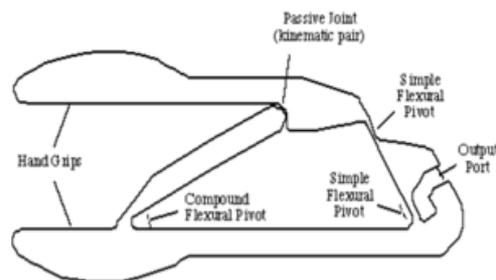


Figura 21: Pinza como “compliant mechanisms”. [20]

1.6.2. Alternativa de materiales

Para estas alternativas se van a diferenciar dos grandes grupos: materiales metálicos y plásticos.

Materiales metálicos: A la hora de buscar cierta flexibilidad geométrica y querer fabricar una pieza monolítica, este tipo de materiales podrían quedar descartados por ser rígidos.

Materiales plásticos: Dentro de estos materiales se pueden destacar dos grandes grupos:

- Plásticos termoestables: son polímeros infusibles e insolubles. Tienen ventajas como la resistencia a los impactos y a las temperaturas extremas, pero son difíciles de procesar, son frágiles y la reacción de curado es irreversible por lo que no pueden reciclarse, ya que si se incrementa la temperatura el polímero no funde, sino que alcanza su temperatura de degradación y puede quemarse. [\[21\]](#)
- Plásticos termoplásticos: no tienen las desventajas de los termoestables, son los adecuados para imprimirlos en 3D y por eso serán los elegidos. Entre ellos encontramos materiales como el PLA y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), que quedan descartados por su rigidez y materiales como el polipropileno (PP) y la poliamida 6 (nylon). [\[22\]](#) Estudiando sus diferentes propiedades se encontró que el nylon tiene un mayor límite de rotura que el PP y es más fácil de imprimir. [\[23\]](#)

Para tomar una decisión entre el PP y el nylon se hicieron unas pruebas preliminares con un diseño conceptual comparando mediante elementos finitos y mediante fabricación física de los dedos el comportamiento entre el nylon y el PP (figuras 22 y 23).



Figura 22: Dedo fabricado en PP con y sin carga aplicada.

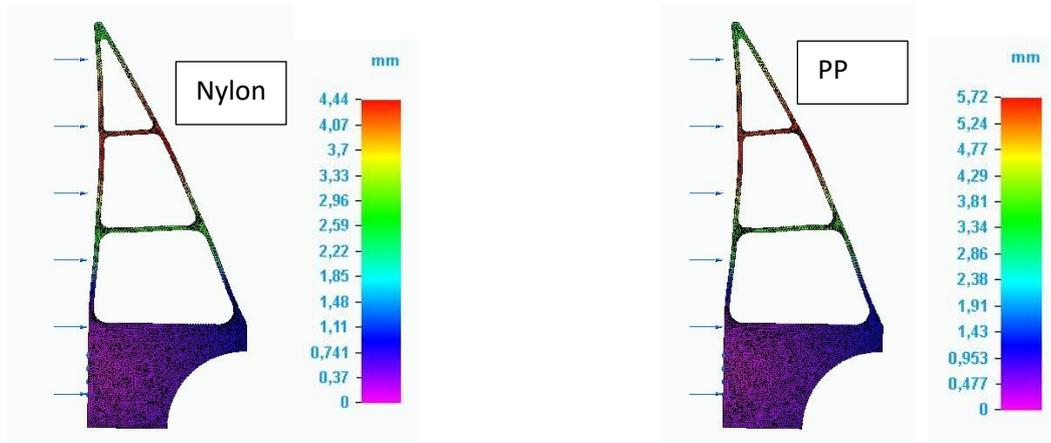


Figura 23: Deformaciones en nylon y PP.

Los resultados de las comparaciones fueron que ante las mismas cargas se consiguieron resultados parecidos, pero el nylon presentaba algo menos de flexibilidad ya que el desplazamiento era menor. Aunque el nylon sea ligeramente más rígido, su límite elástico es de 31MPa mientras que el del PP es de 24MPa (es decir 30% mayor), por lo que podría conseguir soportar fuerzas superiores sin entrar en su estado plástico. [\[24\]](#) [\[25\]](#)

Como conclusión seleccionamos el nylon para el desarrollo de los dedos.

1.6.3. Alternativas de procesos de fabricación aditiva

Se irán descartando los diferentes procesos mencionados en el contexto, según su conveniencia.

- La estereolitografía no será una opción ya que trabaja con resinas que no tienen suficiente resistencia mecánica y la pieza obtenida quedará en estado rígido.
- Aunque el sinterizado láser plástico puede fabricar una pieza que cumpla con los requisitos, se descartará por ser un proceso caro al utilizar un polvo que tiene un elevado coste. Además, esta tecnología requiere la utilización de unos equipos de protección individual al existir riesgo de inhalación de los polvos, de la misma forma todos los equipos utilizados deben ser ATEX (ATmósferas EXplosivas).
- No tiene sentido utilizar el sinterizado láser metálico al haber decidido que se iba a trabajar con plásticos.
- El polyjet queda eliminado de la lista también por utilizar resinas al igual que la estereolitografía.
- Por lo tanto, la opción más adecuada será el FDM.

Para este tipo de tecnología, se dispone en el taller de una impresora 3D marca Markforged modelo Mark Two (figura 24), cuyas características se describen a continuación: [\[26\]](#)

- Tecnología FDM
- Tamaño máximo de impresión: 320 mm x 132 mm x 154 mm
- Temperatura máxima de extrusión: 275°C
- No dispone de base calefactable

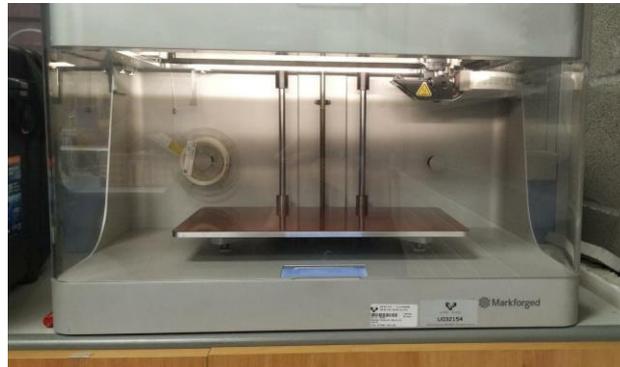


Figura 24: Impresora Markforged modelo Mark Two.

1.7. Análisis de riesgos

Para el estudio del análisis de riesgos se utilizará el método AMFE (Análisis de Modo de Fallo y Efectos). Es una herramienta estandarizada que ayuda a estimar y predecir posibles fallos durante el diseño y el proceso de fabricación de la pieza con la finalidad de introducir acciones que garanticen cierta seguridad para poder evitar dichos fallos. [27]

Habitualmente se hace el AMFE de diseño o el AMFE de proceso, pero en este caso al ser pocos los riesgos, se han puesto los dos tipos en la misma tabla (tabla 1).

MODO DE FALLO	EFECTO	CAUSA	ACCIÓN PROPUESTA	TIPO DE FALLO
Los tornillos no encajan en los agujeros	No se pueden amarrar los dedos a la pinza	Diseño erróneo	Rediseñar para corregir el diámetro o rasgar uno de los agujeros	Diseño
Los dedos no flectan lo esperado. Demasiada rigidez	No agarra bien los objetos	Mala decisión del material o diseño erróneo	Cambiar el material o el diseño: Disminuir el espesor de las paredes y los nervios así como la cantidad de nervios	Diseño
Inicio de grietas	Rotura de dedo y caída del objeto	Paredes muy delgadas o aristas vivas	Introducir redondeos en las aristas vivas	Diseño
Rotura de los nervios delgados	Rotura de dedo y caída del objeto	Orientación incorrecta de la pieza en la impresora	Reorientar la pieza en la impresora para imprimir en un plano paralelo a las líneas de fuerza principales	Fabricación
Warping (deformación durante la impresión)	Despegue de la base de la impresora por contracción térmica excesiva: detener la impresión y desechar la pieza	Parámetros de impresión erróneos	Aumentar temperatura de la base calefactable	Fabricación

Tabla 1: Resultado del AMFE.

En el proceso de fabricación de la pieza se han podido observar alguno de esos efectos, como el “warping” por la deformación térmica (figura 25), quemaduras en pieza producto del “warping” (figura 26) o el inicio de grietas en los nervios (figura 27) por una inadecuada orientación de la pieza a la hora de imprimirla.



Figura 25: Efecto “warping”.



Figura 26: Quemaduras.

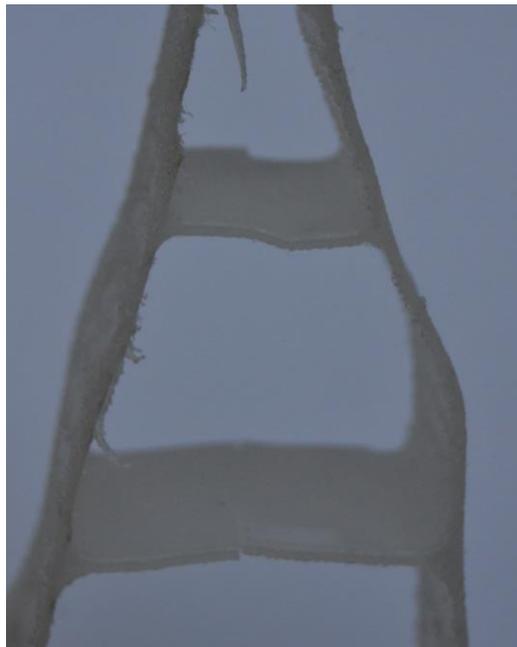


Figura 27: Rotura de los nervios.

1.8. Selección/Descripción de la solución propuesta

Teniendo en cuenta las opciones de diseños conceptuales mencionados en las alternativas, se imprimieron algunas opciones para ver cómo podrían ser utilizados para el desarrollo de un dedo. Se descartaron la mayoría ya fuera porque sufrieron alguna rotura o porque resultaban más complejos, como se ha descrito en el análisis de alternativas de diseño.

Tras estos descartes y teniendo en cuenta diferentes diseños explicados en el análisis del estado del arte, se optó por una variante al llamado dedo articulado (figura 12) desarrollando un dedo triangular, sustituyendo los nervios articulados por nervios empotrados, que podría adaptarse perfectamente a las necesidades requeridas. Se imprimió en nylon para conseguir la flexibilidad deseada fabricándolo de una sola pieza.

1.9. Diseño

Una vez decidido el tipo de dedo que se quiere fabricar, hubo que generar el diseño detallado.

El dedo tiene dos zonas diferenciadas:

- La zona de amarre, que debe unirse al actuador neumático, se diseñó completamente rígida a pesar del material, para lo que se le dotó de dos cartelas de rigidización.
- El resto del dedo, cuya función es coger los objetos, se diseñó más flexible. Esta zona se compone de una pared inclinada y otra completamente vertical para poder alcanzarlos mejor (figura 28).

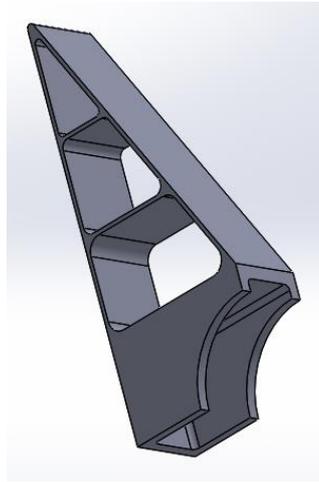


Figura 28: Diseño detallado del dedo.

Haciendo un análisis de riesgos con la herramienta AMFE se terminó de detallar la geometría de cada zona. Resultando en unas paredes delgadas pero lo suficientemente gruesas como para que no den problemas de impresión, en una zona rígida con vaciado de material para conseguir un menor tiempo de impresión y menor consumo de material, esquinas redondeadas para evitar aparición de grietas prematuras.

Para poder establecer el espesor de las paredes, se realizaron unas pruebas de impresión con un espesor inicial de 0,5mm, pero no fue posible imprimirlos por los efectos que se han descrito anteriormente (figuras 25 y 26), por lo que hubo que sobredimensionar el dedo hasta conseguir un espesor que la impresora disponible fuese capaz de imprimir. El primer intento válido se logró con un espesor de 1,5mm. (ver anexo I).

1.10. Cálculos

Con el dimensionamiento definitivo del dedo, se imprimió un dedo en nylon y se realizaron diferentes simulaciones de EF que fueron comparadas posteriormente con las pruebas experimentales realizadas en el taller. Este testeo iba a resultar de gran ayuda a la hora de definir correctamente las propiedades del material. En la siguiente tabla se recogen las respectivas deformaciones resultantes de las diferentes cargas aplicadas (tabla 2), junto con las imágenes de las deformaciones recogidas en el AEF de ANSYS:

FUERZA APLICADA [N]	DEFORMACIÓN DE LA SIMULACIÓN AEF [mm]	RESULTADOS PRUEBAS EXPERIMENTALES [mm]	FIGURA
2,5	4,0235	3,5	figura 29
3,5	5,6329	5,3	figura 30
4,5	7,2423	7,4	figura 31
5,5	8,8517	9,3	figura 32
6,5	10,461	11,2	figura 33
7,5	12,071	13,4	figura 34

Tabla 2: Resultados de las simulaciones y las pruebas experimentales.

Como puede comprobarse los cálculos teóricos se asemejan a los obtenidos experimentalmente, en unas situaciones más que en otras. Estas diferencias pueden deberse a la definición incorrecta del material en las simulaciones, a errores de calibración de los instrumentos en el taller o al denominado error del coseno (cuando el operario no coloca la pieza adecuadamente alineada con el instrumento de medida).

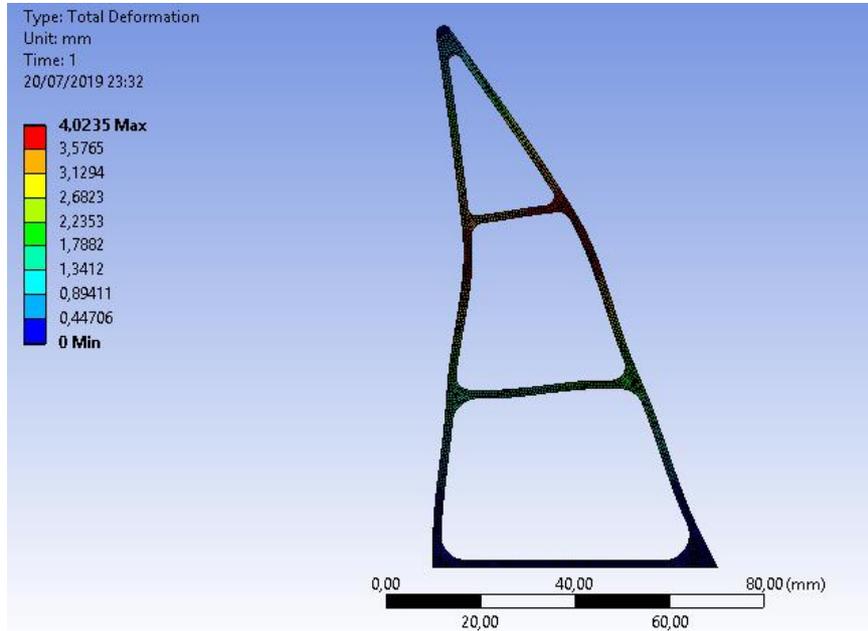


Figura 29: Resultado simulación EF carga 2,5N.

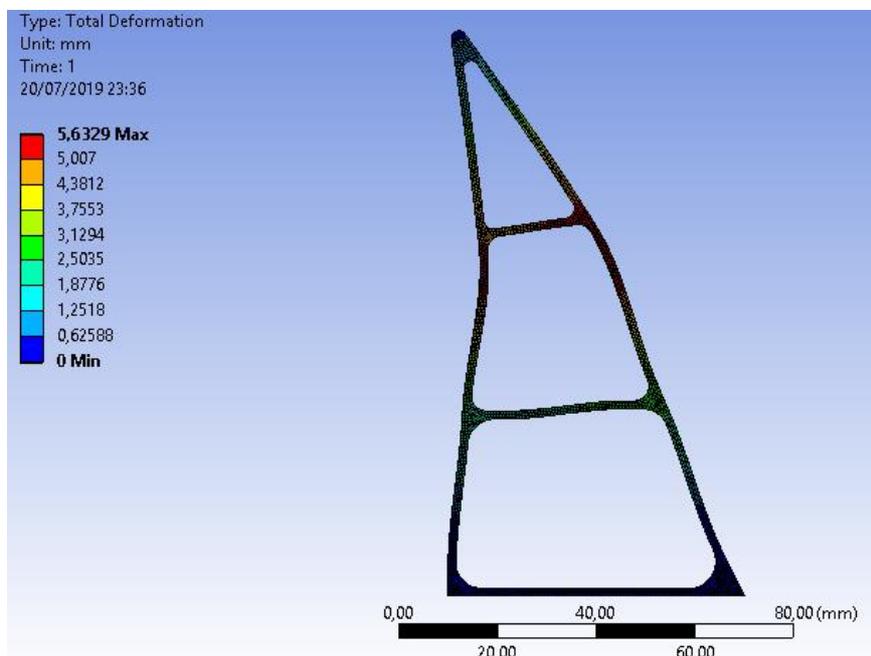


Figura 30: Resultado simulación EF carga 3,5N.

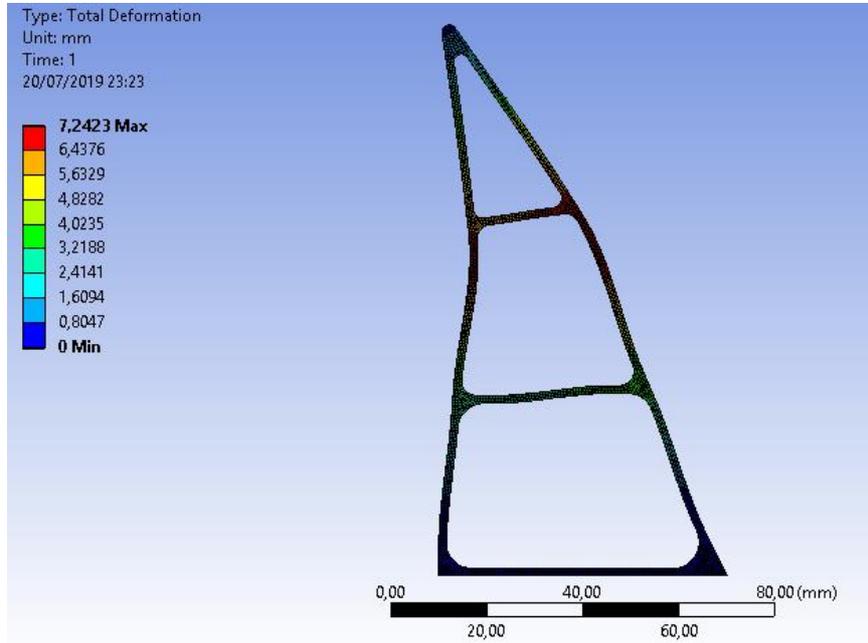


Figura 31: Resultado simulación EF carga 4,5N.

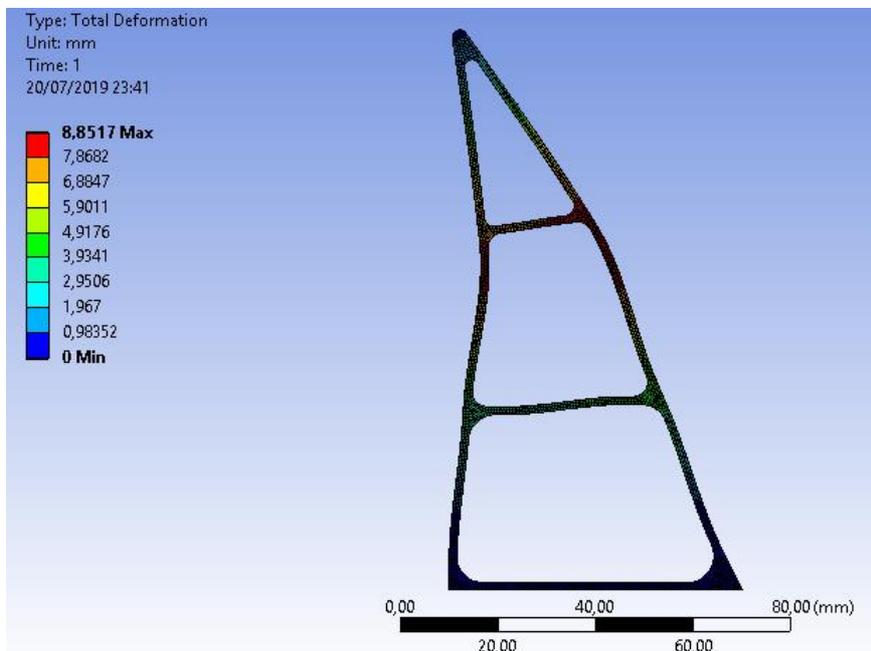


Figura 32: Resultado simulación EF carga 5,5N.

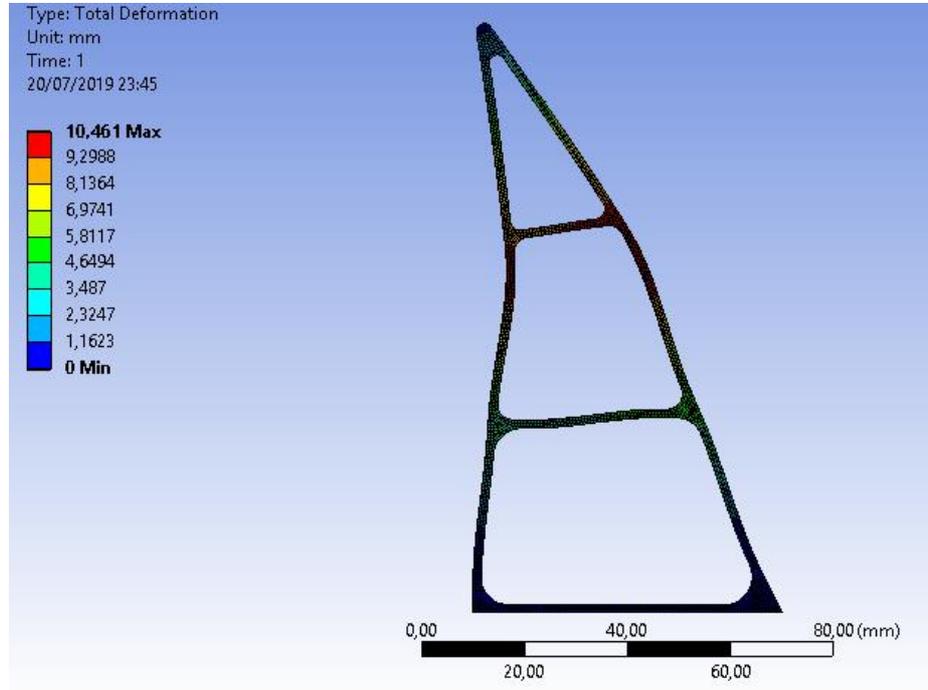


Figura 33: Resultado simulación EF carga 6,5N.

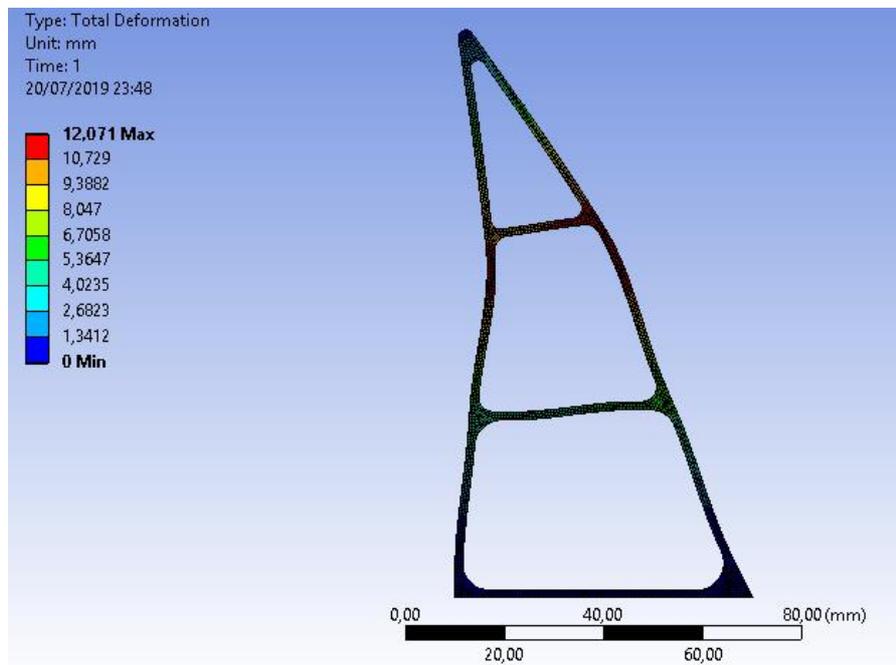


Figura 34: Resultado simulación EF carga 7,5N.

Una vez acabado con esta parte del estudio para poder definir correctamente el material, el dedo se sometió a otro análisis para poder definir cuál era la máxima carga que podía soportar para obtener un coeficiente de seguridad de 1,5 aproximadamente (figura 35).

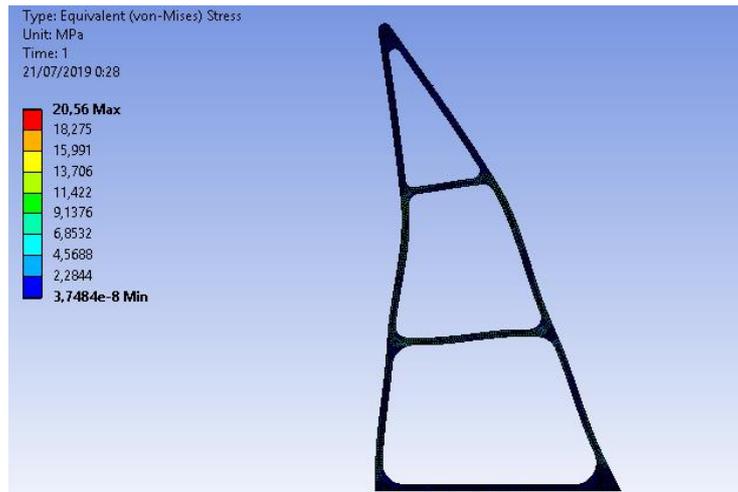


Figura 35: Resultado simulación EF carga máxima admisible (tensión).

Como puede observarse, se obtuvo una tensión máxima de 20,56MPa aplicando 28,5N de carga. Teniendo en cuenta que el límite elástico del nylon es de 31MPa, esto dio como resultado un coeficiente de seguridad de 1,508 (siento el coeficiente de seguridad la relación entre ambas tensiones). La respectiva deformada fue la siguiente (figura 36):

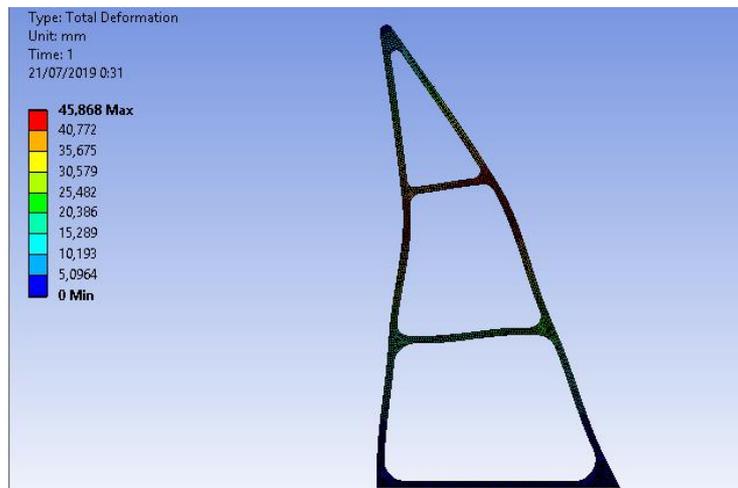


Figura 36: Resultado simulación EF carga máxima admisible (deformación).

1.11. Descripción de los resultados

Con el material bien definido y cuando se consiguió el dedo en nylon sin ningún fallo de impresión, se fabricaron otros dos dedos iguales para poder amarrarlo al actuador neumático (figura 37) y comenzaron las pruebas experimentales del principal objetivo.



Figura 37: Garra flexible.

Primero se comprobó que la apertura máxima de los dedos era de 6mm tal y como indicaba el catálogo de FESTO. [16]

El diámetro mínimo que la garra era capaz de sujetar era de 75mm y el máximo de 87mm. Para los objetos que excedían de estas dimensiones, era necesario forzar la apertura para que la garra pudiese cogerlos, pero luego la sujeción era firme y al soltar el objeto los dedos volvían a su posición y forma original sin sufrir daños.

Se sometió la garra a la sujeción de varios objetos cuyos resultados se verán a continuación:

- Disco de acero de 100mm de diámetro (figura 38).



Figura 38: Prueba de agarre geometría tipo disco.

- Placa rectangular de acero de dimensiones 95x80 [mm] (figura 39).

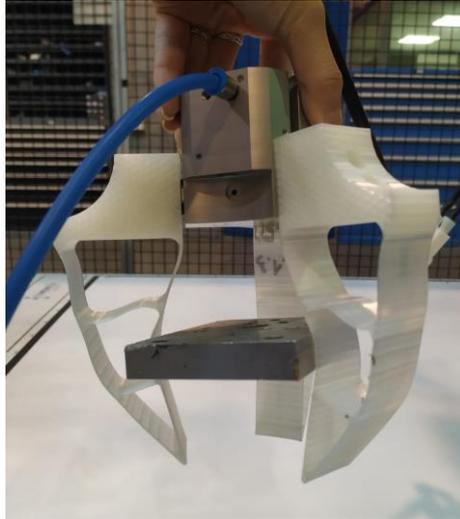


Figura 39: Prueba de agarre geometría tipo rectangular.

- Perfil extruido de aluminio de dimensiones 80x80x200 [mm] (figura 40). Esta es la pieza más larga que consiguió sostener.



Figura 40: Prueba de agarre geometría tipo perfil.

- Pieza en forma de L como geometría más irregular (figura 41).

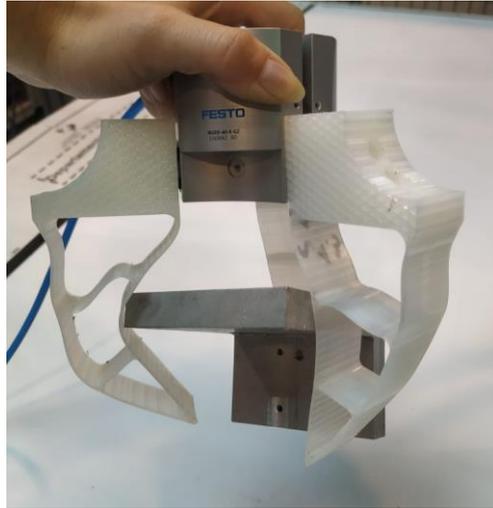


Figura 41: Prueba de agarre geometría tipo L.

- Cilindro macizo de acero de 80mm de diámetro y 120mm de altura de 1,5kg de masa (figura 42). Es la pieza más pesada que pudo agarrar sin caer.

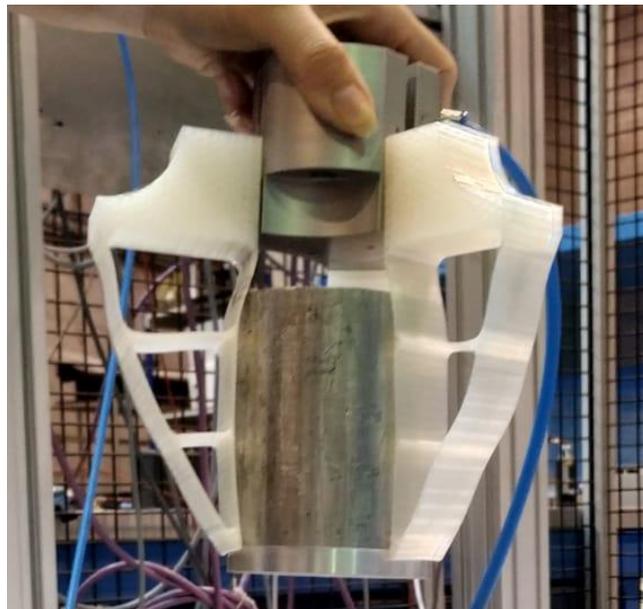


Figura 42: Prueba de agarre geometría tipo cilindro macizo

- Rollo de cinta adhesiva de 123mm de diámetro (figura 43). Con esta pieza se obtuvo la mayor deformación pudiendo volver después a su estado inicial.

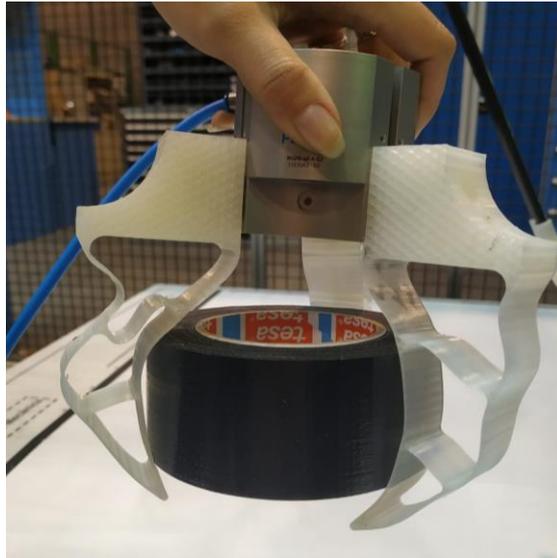


Figura 43: Prueba de agarre rollo cinta adhesiva.

1.12. Descripción de fases y tareas

1.12.1. Análisis del estado del arte

Búsqueda de soluciones similares: Una vez decidido que el dedo iba a desarrollarse mediante fabricación aditiva (y más concretamente en impresión 3D), lo primero de todo fue realizar una búsqueda exhaustiva de conceptos similares que ya pueden encontrarse en la industria, así como estudiar los diferentes materiales para decidir cuál sería el más conveniente para el trabajo que se desea realizar. Teniendo ya una idea sobre la cual se iba a trabajar se realizaron los primeros diseños.

1.12.2. Diseño

Diseño conceptual: Basándose en las ideas de los mecanismos biestables y los “compliant mechanisms” (todos ellos explicados anteriormente en las alternativas) se dibujaron mediante SolidWorks los primeros diseños conceptuales.

Prueba de concepto experimental: Todos los diseños se imprimieron en PLA para poder descartar el uso de materiales rígidos y decantarse por un material flexible en un diseño simple de un dedo.

Diseño detallado del dedo en SolidWorks: Una vez decidida la forma global del diseño hubo que centrarse en los detalles: cantidad y grosor de los nervios y las paredes para conseguir cierta flexibilidad, posición de las paredes (una inclinada y otra vertical para un mejor alcance en los objetos), redondeos en todas las aristas vivas para evitar las grietas y zonas de posible fractura...

Análisis de EF y optimización del diseño: Realizar un análisis de elementos finitos mediante el programa ANSYS para simular la tensión y el desplazamiento máximo de la pieza y prevenir cualquier fallo (con la ayuda del AMFE). Con cada resultado, se analizan posibles mejoras que puedan optimizar el funcionamiento de la pieza.

1.12.3. Fabricación

Set Up inicial de parámetros de impresión: Se decidieron, basándose en la experiencia y las recomendaciones del fabricante del material y la impresora, los primeros parámetros de impresión.

Ciclo iterativo de impresión y corrección de parámetros: Teniendo esos parámetros como primer intento pudo comprobarse que la pieza se levantaba y se quemaba, por lo que hubo que cambiar ciertos parámetros.

Tras el Set Up inicial y después de las correcciones se establecieron los parámetros definitivos:

- Temperatura de extrusión: 276°C
- Altura de capa: 0,1mm
- Opción de “brim” activada (extensión de la sección de la primera capa que ayuda a mejorar la adherencia a la base)
- “Infill”: tipo de patrón triangular y 37% de relleno
- Paredes de una sola capa
- Suelos y techos de cuatro capas
- Soportes desactivados

Los parámetros que hubo que modificar fueron: aumentar capas de las paredes y aumentar el “infill”.

1.12.4. Validación experimental

Montaje en la garra: Una vez conseguido los tres dedos, atornillarlos al actuador neumático.

Prueba experimental: Confirmar cuál es el diámetro mínimo que la garra es capaz de sujetar, someterlo a objetos con diferentes geometrías y analizar la correcta sujeción de los objetos.

1.12.5. Redacción del proyecto

Recopilación del trabajo realizado y redacción de la memoria: A medida que se iba indagando y realizando los pertinentes diseños, cálculos y experimentos, se ha ido redactando toda la información para poder completar el informe.

2. ASPECTOS ECONÓMICOS

2.1. Descripción del descargo de gastos

Normalmente para calcular el coste de fabricación de una pieza se pueden considerar varios conceptos, entre los que cabría destacar:

- Coste del material
- Coste de mano de obra
- Coste de utilización de máquina (amortización)
- Coste de energía consumida
- Otros costes indirectos

En este caso los más significativos se consideran que son el material, la amortización de la máquina y la mano de obra (cargar el filamento y retirar la pieza), ya que el consumo energético no es significativo comparado con los costes anteriores.

En la siguiente tabla se recogen los costes que supone el fabricar un solo dedo del espesor definitivo (tabla 4):

Para la utilización de la impresora se ha hecho esta aproximación: Para una inversión en máquina de 15.000€ y considerando un criterio de amortización a cinco años y suponiendo que la máquina trabaja 2.000 horas al año, la tasa horaria de la máquina sale a 1,5€/hora.

Para el coste energético se tuvo en cuenta que la impresora consume 100W mientras está en funcionamiento.

CONCEPTO	UNIDADES	CANTIDAD	COSTE	IMPORTE
Material	gramos	34,43	170€/kg	5,88 €
Mano de obra	min	10	30€/h	5 €
Funcionamiento impresora	horas	8	1,5€/h	12 €
Coste energético	kilovatio hora	0,8	0,11€/kWh	0,088 €
TOTAL (IVA incluido)				22,968 €

Tabla 4: Descargo de gastos de un dedo.

Ya que para la garra son necesarios tres dedos, el coste total de los dedos para la garra es de 68,904€

Para el coste total del proyecto se han añadido otros datos y se ha realizado la siguiente tabla (tabla 5):

CONCEPTO	UNIDADES	CANTIDAD	COSTE UNITARIO	IMPORTE
Material (Nylon)	dedos	14	5,88 €	82,32 €
Material (PP)	dedos	2	0,68 €	1,36 €
Utilización impresora	horas	112	1,5 €	168 €
Coste energético	kilovatio hora	1,4	0,11€/kWh	0,154 €
Dedicación Ingeniero Junior	horas	180	30	5.400 €
Dedicación director del proyecto	horas	18	60	1.080 €
TOTAL (IVA incluido)				6.732 €

Tabla 5: Descargo total del proyecto.

3. CONCLUSIONES

Como objetivo principal se estableció el desarrollar (diseñar e imprimir) unos dedos flexibles compatibles con el actuador neumático disponible y que pudieran coger objetos de diferentes geometrías.

Para el diseño conceptual se realizó un estudio del estado del arte para escoger un diseño en concreto y después, gracias a los análisis de elemento finitos se pudo dimensionar y escoger un espesor específico de las paredes y los nervios que era un factor clave para la flexibilidad requerida en este proyecto.

Con un “set up” inicial de los parámetros de impresión que dieron lugar a fallos a la hora de imprimir, se hizo un ciclo iterativo de dichos parámetros para poder imprimir un dedo que no diese lugar a errores. Una vez conseguido el dedo sin fallos de impresión se fabricaron otros dos dedos iguales para completar la garra.

Una vez montada la garra se le conectaron los tubos neumáticos y se realizaron varias pruebas al agarre de objetos de geometrías diferentes. La garra tenía un rango de actuaciones que no podía coger por si sola objetos de un diámetro inferior a 75mm y de un diámetro superior a 87mm por lo que fuera de ese rango hubo que forzar la introducción de los objetos para el estudio. Pero como el objetivo principal era analizar la flexibilidad al agarre de las diversas geometrías, esas limitaciones no fueron relevantes.

Los resultados fueron satisfactorios: La garra pudo sujetar sin tirar una geometría tipo disco de un diámetro bastante significativo, presentando una deformación elevada, pero pudiendo recuperar después su forma original. También pudo retener un cilindro macizo de 1,5kg sin que cayera.

La conclusión definitiva que se ha demostrado con este proyecto es lo factible que es la fabricación aditiva para personalizar el diseño y la impresión de dedos, lo que abre un abanico de posibilidades en cuanto a versatilidad en un entorno industrial orientado a la manipulación automatizada de piezas.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] “¿Cómo funciona la impresión 3D por Estereolitografía?”. Video disponible en https://www.youtube.com/watch?v=Z3KZUwn_7ns
- [2] “Impresoras de resinas fotocurables. Diferencias entre las tecnologías SLA, DLP y LCD” por Alonso Espinosa. Disponible en <https://tresde.pe/diferencias-entre-las-tecnologias-sla-dlp-y-lcd/>
- [3] “Sinterizado selectivo por láser”. Disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser
- [4] “Sinterización láser selectiva o SLS, ¡te lo explicamos!”. Disponible en <https://www.3dnatives.com/de/selektives-lasersintern/>
- [5] “Guía de impresión 3D metal”. Disponible en <https://all3dp.com/es/1/impresion-3d-metal-impresora-3d-metal/>
- [6] “Nuevas tecnologías para la fabricación de series cortas” por la fundación PRODINTEC. Disponible en http://www.prodintec.es/attachments/article/266/fichero_8_0636.pdf
- [7] “Nuevas tecnologías de inyección para fabricación de piezas grandes”. Disponible en <http://futurotecnologicojordan.blogspot.com/>
- [8] “How does an FDM 3D printer work?”. Disponible en <https://www.kimya.fr/en/how-does-an-fdm-3d-printer-work/>
- [9] “Festo – FlexShapeGripper”. Video disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=m7l-87r4oOY>
- [10] “Adaptive shape gripper DHEF”. Disponible en https://www.festo.com/cms/en-in_in/69457.htm
- [11] “Octopus-Inspired Robotic Grippers Receive Huge Funding Boost” por Jappy Lim. Disponible en <https://futurism.com/19772>
- [12] “Bionic Handling Assistant”. Disponible en <https://asknature.org/idea/bionic-handling-assistant/>
- [13] Artículo “The terrifying TENTACLEBOT: Robotic arm made of soft muscle moves like an octopus and is equipped with rows of suction cups” por Science&Tech. Disponible en <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4365614/Festo-unveils-terrifying-TENTACLEBOT-soft-muscle.html>
- [14] “3-Finger Adaptive Robot Gripper”. Disponible en <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>

- [15] “Adaptive gripper based on FESTO FinGripper fingers”. Video disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=90cXfaFM4O8>
- [16] “Pinza de tres dedos HGDDD-40-A-G2”. Disponible en https://www.festo.com/net/es_es/SupportPortal/InternetSearch.aspx?tab=0&q=1163042
- [17] “Compliant bistable mechanisms” por Andrija Milojevic. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/259291073_Compliant_bistable_mechanisms
- [18] “Smart Materials and Structures”. Disponible en <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/22/1/014005>
- [19] “Why machines that bend are better”. Video disponible en https://www.youtube.com/watch?v=97t7Xj_iBv0
- [20] “Compliant mechanisms printed with PolyFlex!”. Disponible en <https://www.kickstarter.com/projects/polymaker/polymakr-entirely-new-materials-for-desktop-3d-pri/posts/846907>
- [21] “Plástico Termostable”. Disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A1stico_termostable
- [22] “Termoplástico”. Disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/Termopl%C3%A1stico>
- [23] “Filament Properties Table”. Disponible en <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
- [24] “Material datasheet composites” para el límite elástico del nylon. Disponible en https://static.markforged.com/markforged_composites_datasheet.pdf
- [25] Límite elástico del polipropileno disponible en <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=726845c457b94b7cafe31d2e65739e1d&ckck=1>
- [26] “Markforged Mark Two”. Disponible en <https://3dprinting.com/pricewatch/industrial-3d-printer/markforged-mark-two/>
- [27] “Análisis de modos de fallo y efectos (AMFE)”. Disponible en <https://www.progressalean.com/analisis-de-modos-de-fallo-y-efectos-amfe/>

5. ANEXO I: Dimensionamiento del dedo. Cotas en mm.

