

IMPLEMENTACIÓN DE UN GRIPPER FLEXIBLE PARA UN ROBOT

JUAN MANUEL HURTADO LÓPEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.**

2021

IMPLEMENTACIÓN DE UN GRIPPER FLEXIBLE PARA UN ROBOT

JUAN MANUEL HURTADO LÓPEZ

CÓDIGO: 2175348

**TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE SOLUCIÓN DE UN
PROBLEMA DE INGENIERÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

DIRECTOR

INGENIERO JOHANNY FRANCHESCO NIÑO FONSECA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
BOGOTÁ D.C.**

2021

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	6
1. OBJETIVOS	8
1.1 OBJETIVO GENERAL	8
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2. DISEÑO DEL SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO GRIPPER FLEXIBLE ..	8
2.1 Determinación de los requerimientos funcionales y del cliente del gripper flexible	8
2.2 Selección de las características del gripper	9
2.3 Realización del diseño de las pinzas flexibles	10
2.4 Realización del diseño de la caja de acople y sujeción.....	12
3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO GRIPPER FLEXIBLE	14
3.1 Diseño del molde para la fabricación de las pinzas flexibles	14
3.2 Fabricación del molde para las pinzas flexibles	15
3.3 Fabricación de las pinzas flexibles.....	18
3.4 Fabricación de la caja de acople y sujeción	28
4. DESARROLLO DEL CONTROL PARA EL SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO GRIPPER FLEXIBLE	30
4.1 Implementación del circuito para la apertura y cierre de la válvula neumática	30
5. PRUEBAS Y VALIDACIÓN DE LA OPERACIÓN PICK AND PLACE	32
5.1 Simulación del funcionamiento de la pinza mediante software CAE	32
5.2 Pruebas de funcionamiento de las pinzas	36
5.3 Integración del gripper flexible	37
5.4 Pruebas y validación de la operación pick and place	40
6 CONCLUSIONES	41
7 REFERENCIAS	42

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo CAD definitivo de las pinzas a fabricar para el gripper flexible.....	12
Figura 2. Modelo CAD definitivo de la caja de acople y sujeción.....	13
Figura 3. Modelo CAD del núcleo de la zona de los lóbulos.....	14
Figura 4. Modelo CAD de la cavidad de la zona de los lóbulos.....	14
Figura 5. Modelo CAD del núcleo de la zona de agarre.....	15
Figura 6. Modelo CAD de la cavidad de la zona de agarre.....	15
Figura 7. Distribución de las piezas a imprimir en el Software Simplify 3D.....	17
Figura 8. Vista superior del núcleo y la cavidad de la zona de lóbulos.....	17
Figura 9. Vista isométrica del núcleo y la cavidad de la zona de lóbulos.....	17
Figura 10. Vista superior del núcleo y la cavidad de la zona de lóbulos.....	18
Figura 11. Vista isométrica del núcleo y la cavidad de la zona de agarre.....	18
Figura 12. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos con capa de látex aplicada.....	19
Figura 13. Núcleo y cavidad de la zona de agarre con capa de látex aplicada.....	19
Figura 14. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos con capa de látex aplicada ensamblados.....	20
Figura 15. Núcleo y cavidad de la zona de agarre con capa de látex aplicada ensamblados.....	20
Figura 16. Parámetros técnicos de la silicona RTV 120 suministrados por el fabricante.....	21
Figura 17. Núcleo y cavidad de la zona de agarre desensamblados luego de curada la silicona.....	22
Figura 18. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos desensamblados luego de curada la silicona.....	22
Figura 19. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos desensamblados luego de curada la silicona por segunda vez.....	23

Figura 20. Zona de lóbulos y de agarre unidas mediante silicona, soportadas por la cavidad de la zona de lóbulos.....	23
Figura 21. Vista frontal de la pinza retirada de la zona de la cavidad con el borde de silicona.....	24
Figura 22. Vista lateral de la pinza retirada de la zona de la cavidad con el borde de silicona.....	24
Figura 23. Vista frontal de la pinza con el borde de silicona recortado.....	25
Figura 24. Vista lateral de la pinza con el borde de silicona recortado.....	25
Figura 25. Pinza con unión para manguera acoplada.....	26
Figura 26. Zona de agarre de 5 mm de espesor y el respectivo núcleo del molde.....	26
Figura 27. Vista lateral de la pinza gruesa retirada de la zona de la cavidad con el borde de silicona.....	27
Figura 28. Pinza gruesa con unión para manguera acoplada.....	27
Figura 29. Vista isométrica de la caja de acople y sujeción.....	28
Figura 30. Vista superior de la caja de acople y sujeción.....	28
Figura 31. Vista posterior de la caja de acople y sujeción	29
Figura 32. Esquema neumático del gripper flexible realizado en FluidSim.....	30
Figura 33. Vista frontal de la válvula neumática manual de marca Airtac.....	31
Figura 34. Vista superior de la válvula distribuidora de cuatro salidas.....	31
Figura 35. Condición de soporte fijo definida para la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS.....	32
Figura 36. Condición de presión interna definida para la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS.....	33
Figura 37. Resultado final del enmallado de la pinza realizado en el entorno Mechanical del software ANSYS con sus respectivas condiciones.....	33
Figura 38. Parte del menú de configuración de análisis con las configuraciones mencionadas.....	34
Figura 39. Pinza con las configuraciones del método de conformado por tetraedros realizadas en el entorno Mechanical del software ANSYS con sus respectivas condiciones.....	34

Figura 40. Resultado final de la simulación realizada en el entorno Mechanical del software ANSYS para una presión interna de 25 kPa.....	35
Figura 41. Resultado de la simulación realizada en el entorno Mechanical del software ANSYS para una presión interna de 50 kPa.....	35
Figura 42. Resultado de la simulación realizada en el entorno Mechanical del software ANSYS para una presión interna de 75 kPa.....	36
Figura 43. Pinzas gruesas acopladas a la tabla de pruebas.....	37
Figura 44. Vista isométrica del diseño en software CAD del gripper.....	38
Figura 45. Vista superior del diseño en software CAD del gripper.....	39
Figura 46. Circuito neumático integrado a la caja de sujeción.....	39
Figura 47. Gripper flexible realizando el agarre del objeto.....	40
Figura 48. Gripper flexible realizando el posicionamiento del objeto.....	41

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores requeridos para el cálculo del espesor mínimo requerido.....	11
Tabla 2. Parámetros de impresión 3D utilizados para la fabricación del primer prototipo...	15
Tabla 3. Parámetros de impresión 3D utilizados para la fabricación del segundo prototipo...	16

RESUMEN

Se diseña, construye e implementa un gripper flexible para un robot. En primer lugar, se determinan los requerimientos funcionales y del cliente, para definir sus características y su diseño. Posteriormente, se diseña la placa de acople y sujeción según el diseño de pinzas definido. Para la etapa de construcción, se diseña el molde de las dos partes de las pinzas mediante el software NX 10, para su posterior fabricación en impresión 3D, y luego se utilizan para fabricar las pinzas con silicona RTV 120 y su respectivo catalizador. Para la fabricación de la caja de acople y sujeción, se utiliza también el modelo CAD realizado en el software NX 10 para fabricarla en impresión 3D. En la etapa de implementación, se selecciona la válvula de accionamiento y la válvula distribuidora, y se establece la presión de funcionamiento requerida por el gripper, mediante pruebas a cada una de las pinzas realizadas. En la etapa de pruebas se realiza mediante software CAE la simulación del funcionamiento de la pinza, luego la integración del circuito neumático a la caja de acople y sujeción y, finalmente, las pruebas y validación del funcionamiento del gripper mediante la realización de una operación pick and place.

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años, a nivel académico e industrial se desarrollaron diferentes tipos de manipuladores rígidos para robots, generalmente costosos e inapropiados para la manipulación de objetos delicados, al requerir sensores sofisticados y una alta precisión para su correcto funcionamiento. Los manipuladores diseñados para objetos frágiles generalmente son complejos o sólo son apropiados para un objeto en específico [1]. Como solución a este problema, recientemente se empezó a desarrollar el campo de la robótica flexible, al presentar ventajas como su bajo costo de fabricación, su facilidad de manufactura y su reducido peso [2]. Los actuadores flexibles se utilizan en diversas aplicaciones además de la manipulación de objetos, como aplicaciones médicas y biológicas, debido a que logran realizar movimientos complejos con un control simple [3].

Para su funcionamiento, existen sistemas basados en redes neumáticas y en cables movidos por un motor eléctrico. En el primer sistema, se usa el aire para mover los actuadores, y en el segundo, se usan cables [2]. Los robots flexibles se fabrican mediante diversas técnicas de manufactura, como la impresión 3D en distintos materiales, manufactura aditiva, litografía suave, o mediante la integración de múltiples técnicas para crear materiales compuestos [4].

En este trabajo de grado se diseña, construye e implementa un gripper flexible capaz de manipular objetos frágiles y asimétricos, el cual funcionará de forma neumática y sus actuadores serán contruidos en silicona RTV 120 (Room-temperature-vulcanizing). El gripper está compuesto por cuatro pinzas y, su proceso de diseño, construcción y desarrollo del respectivo control se muestra en este trabajo. Finalmente, se realiza la integración del gripper y las pruebas que permitan validar la operación pick and place. Al final de este trabajo se encuentran las conclusiones y recomendaciones según los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, en especial a mi mamá, por todos los esfuerzos y sacrificios realizados durante todos estos años, así como por su apoyo para que pudiera culminar mis estudios, hasta obtener mi título de pregrado. A mi hermana y mi abuela por su paciencia y su motivación ante las dificultades que se me presentaron durante mi etapa universitaria. A mi director por la disposición y colaboración brindada para poder realizar este proyecto. A mis amigos de la Universidad y a mi novia por su comprensión, apoyo y ayuda durante mi etapa universitaria.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un gripper flexible para un robot, con el fin de realizar una operación pick and place.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el sistema de manipulación tipo gripper flexible para un robot mediante una metodología de diseño, que permita realizar una operación pick and place.
- Construir el sistema de manipulación tipo gripper mediante técnicas modernas de manufactura para que se acople a un robot.
- Desarrollar el control para el sistema de manipulación tipo gripper flexible para un robot, que permita realizar una operación pick and place.

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO GRIPPER FLEXIBLE

2.1 Determinación de los requerimientos funcionales y del cliente del gripper flexible

Para la determinación de los requerimientos funcionales y del cliente del gripper se comienza por realizar el análisis de mercado, mediante la consulta de bases de datos de la universidad, patentes encontradas en sitios web, catálogos encontrados, y páginas web que permiten obtener información sobre los tipos de gripper flexibles fabricados y comercializados actualmente.

Posterior a este análisis, se determinan los requerimientos funcionales y del cliente mediante la consulta de la literatura existente sobre la aplicación de la metodología de diseño QFD y a un ingeniero investigador de la universidad, obteniendo los siguientes resultados:

- **Requerimientos funcionales:** largo, número de superficies de contacto, tiempo de ensamble del gripper al robot, número de dedos, peso total, número de ciclos de operación, costo de fabricación, porcentaje de superficie con acabado superficial, tiempo total de fabricación, número de pasos para realizar un proceso, fuerza ejercida, velocidad de operación y tiempo requerido para calibrar el sistema.
- **Requerimientos del cliente:** flexibilidad, seguridad, facilidad de ensamblaje, liviano, larga vida útil, bajo costo de fabricación, estético, fácil fabricación, fácil instalación, ergonómico, adaptable, compatible y preciso.

Al identificar los requerimientos funcionales y del cliente, se procede a asignarle un valor de importancia entre 1 y 5 a los requerimientos del cliente, a comparar las cuatro alternativas seleccionadas, asignándoles un valor de cumplimiento entre 1 y 5 para cada uno de estos requerimientos, con el fin de identificar las características que debe tener el gripper flexible a diseñar, teniendo en cuenta las dos mejores alternativas, y a relacionarlos con los requerimientos funcionales para determinar si hay alta, media, baja relación, o no si no se relacionan entre sí. Luego, se establecen los valores objetivo o límite de los requerimientos funcionales, estableciendo previamente el nivel de dificultad entre 1 y 10 de lograr cumplir con los mismos.

Por último, se identifican las relaciones entre los requerimientos funcionales, para determinar si hay normal o alta dependencia de mejora o perjuicio, o si no hay ningún tipo de dependencia. Como resultado de estas relaciones, se identifica que el largo del gripper aumentará el costo y el tiempo total de fabricación, el número de superficies de contacto aumenta el peso total, el costo de fabricación, y está altamente relacionado con el porcentaje de superficie con acabado superficial, también hace que aumente el tiempo total de fabricación, la fuerza ejercida y la velocidad de operación. Así mismo, el número de pinzas aumenta el peso total del gripper, el costo de fabricación, el tiempo total de fabricación y está altamente relacionado con la fuerza ejercida por el gripper, ya que a mayor número de pinzas, la fuerza ejercida por el gripper aumentará.

En cuanto al peso total, este se ve afectado por el porcentaje de superficie con acabado superficial, al igual que el costo de fabricación, que también aumenta el tiempo total de fabricación. El porcentaje de superficie con acabado superficial afecta negativamente el tiempo total de fabricación y la fuerza ejercida por el gripper se relaciona positivamente con este porcentaje. Finalmente, el número de pasos para realizar la operación está altamente relacionado con la velocidad de operación, ya que, a mayor número de pasos, menor será la velocidad de operación del gripper.

2.2 Selección de las características del gripper

Se encuentran cuatro tipos de gripper acordes a los requerimientos funcionales y de cliente tenidos en cuenta para la aplicación de la metodología de diseño QFD, el gripper mGrip P2 UR de la empresa Softrobotics, el TriMax Gripper de la empresa Chiprobot, el Universal Soft Robotic Gripper, realizado en la Universidad de Beihang, y las pinzas adaptativas flexibles de la empresa Festo.

El gripper mGrip P2 UR es un gripper suave diseñado para robots universales, que permite una manipulación adaptativa de objetos de variado tamaño, forma y peso. Se utiliza para automatizar aplicaciones de ensamblaje, pick and place y embalaje. Como características principales, se puede montar en cualquier robot de serie E o CB, no requiere calibración de sensores, es durable, versátil e integrado [5].

La empresa Chiprobot creó el TriMax Gripper, con todas sus piezas impresas en 3D fabricadas en Ácido Poliláctico (PLA) flexible y compuesto por tres dedos. Estos están conformados por dos tiras de plástico impreso conectadas por alambres, y se encuentran unidos a un actuador lineal ubicado en el punto central del gripper. A medida que el actuador lineal se mueve, los dedos atrapan o liberan cualquier objeto, adaptándose a su forma, debido a la flexibilidad del material [6].

De igual forma, un grupo de investigadores del laboratorio Softrobotics de la universidad de Beihang, en Beijing, China, crearon el Universal Soft Pneumatic Robotic Gripper, compuesto por cuatro dedos neumáticos que se aproximan a la forma de un dedo biológico con infinitos grados de libertad. Para su funcionamiento, se requiere desinflar los actuadores para abrir los dedos del gripper y atrapar los objetos, y luego inflar los actuadores para que entren en contacto con la superficie de los objetos a ser manipulados. Los elementos que componen este gripper son: los dedos de material elastómero suaves, el fijador utilizado para sujetar y conectar los dedos al soporte, y el tubo de articulación que permite al aire comprimido desinflar o inflar los dedos [4].

Este gripper se fabrica usando material elastómero de silicona suave, y sus moldes rígidos se fabrican en PLA mediante impresión 3D.

La generación, evaluación y selección de las alternativas de gripper se realiza con base en los resultados de la metodología QFD, por lo que los diseños preliminares realizados se basan en las características del Universal Soft Robotic Gripper y de las pinzas adaptativas flexibles de Festo. Teniendo en cuenta la complejidad de manufactura de los diseños basados en las pinzas de la empresa Festo, se selecciona como diseño definitivo uno basado en el Universal Soft Robotic Gripper, pero con las ventajas del número de superficies de contacto y ergonomía de las pinzas de la empresa Festo.

2.3 Realización del diseño de las pinzas flexibles

El diseño mediante software CAD del modelo para las pinzas flexibles se compuso de tres diseños preliminares antes de lograr el diseño definitivo. En el primer diseño, se realiza una pinza con quince lóbulos y sin asignación de los espesores requeridos para la cara de agarre y para la cara de los lóbulos. En el siguiente diseño, se reduce el número de lóbulos a diez y se realiza la geometría correspondiente para el ingreso de aire, y en el diseño final se calculan los espesores de las caras mínimos requeridos, se asignan en el modelo, y el número de lóbulos se reducen a cinco.

Mediante la ecuación de la sección VIII, división I del código ASME [7], se calcula el espesor de cara mínimo requerido, teniendo en cuenta la tensión de rotura de la silicona, la presión de diseño, y el ancho de la pinza a fabricar, primero con la ecuación para recipientes cilíndricos, y luego con la ecuación para recipientes esféricos.

$$e = \frac{p * R}{(S * E) - (0,6 * p)} \quad (1)$$

En la cual:

$p \rightarrow$ presión interna de diseño

$R \rightarrow$ ancho de la pinza

$S \rightarrow$ Tensión de rotura de la silicona

$E \rightarrow$ Eficiencia de la junta

Los valores correspondientes a estas variables de la ecuación 1 se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Valores requeridos para el cálculo del espesor mínimo requerido.

Presión interna de diseño	p	15	psi
Ancho de la pinza	R	0,59	pulgadas
Tensión de rotura de la silicona	S	870	psi
Eficiencia de la junta	E	1	-

Al reemplazar los valores de la tabla 1 en la ecuación 1, se obtiene el valor del espesor de pared requerido según la ecuación de recipientes cilíndricos.

$$e = \frac{15 \text{ psi} * 0,59"}{(870 \text{ psi} * 1) - (0,6 * 15 \text{ psi})} \quad (2)$$

$$e = 0.01" = 0,26 \text{ mm}$$

Para calcular el espesor de pared con la ecuación 2, correspondiente a recipientes esféricos, se utiliza la expresión:

$$e = \frac{p * R}{2 * S} \quad (3)$$

En la cual:

$p \rightarrow$ presión interna de diseño

$R \rightarrow$ ancho de la pinza

$S \rightarrow$ Tensión de rotura de la silicona

Al reemplazar los valores de la tabla 1 en la ecuación 2, se obtiene el valor del espesor de pared requerido según la ecuación de recipientes esféricos.

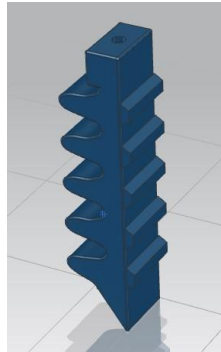
$$e = \frac{15 \text{ psi} * 0,59''}{2 * 870 \text{ psi}} \quad (4)$$

$$e = 0.005'' = 0,12 \text{ mm}$$

Con la realización del cálculo de ambos espesores, se deduce que el espesor de pared mínimo que debe tener la pinza es de 0,26 mm, lo que permite concluir que las paredes de la pinza podrían ser muy delgadas y aun así resisten la presión de aire a utilizar para su funcionamiento.

En la figura 1 se puede observar el modelo CAD definitivo de la pinza a fabricar para realizar el gripper flexible.

Figura 1. Modelo CAD definitivo de las pinzas a fabricar para el gripper flexible.

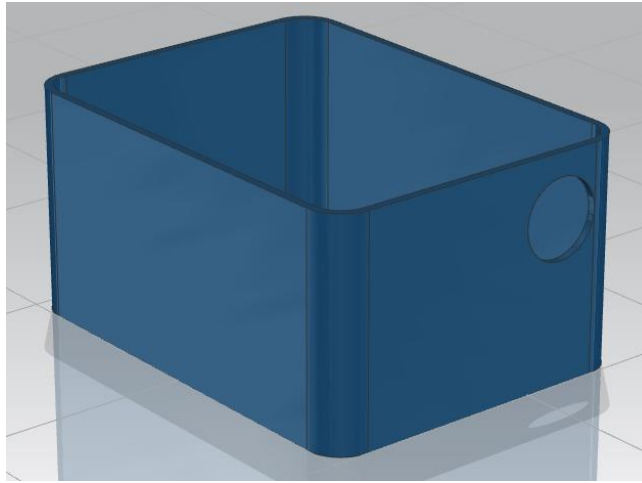


Fuente: Autor

2.4 Realización del diseño de la caja de acople y sujeción

Para el diseño de la caja de acople y sujeción se tiene en cuenta el diseño de la placa utilizada para acoplar y sujetar las pinzas fabricadas en el dispositivo denominado Universal Soft Robotic Gripper [4]. Mediante el software NX 10 se realiza el modelo CAD, en el que se define una geometría para el diseño de la caja que permita el ahorro de material, sin perder la consistencia deseada ni las medidas mínimas requeridas, al igual que garantice el correcto acople de las pinzas mediante las uniones utilizadas, y las mangueras conectadas a las mismas. De igual forma, se realizan las geometrías necesarias en la caja para garantizar la correcta sujeción de la válvula de distribución y de la válvula de accionamiento. En la figura 2 se muestra el modelo CAD definitivo de la caja de acople y sujeción.

Figura 2. Modelo CAD definitivo de la caja de acople y sujeción.



Fuente: Autor

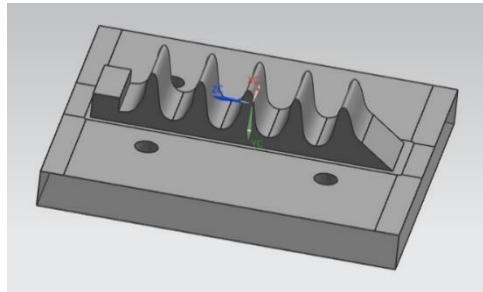
3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO GRIPPER FLEXIBLE

3.1 Diseño del molde para la fabricación de las pinzas flexibles

Para la realización del diseño del molde se consultan diversos tutoriales en la web sobre elaboración de moldes mediante el software NX con los cuales se diseña, teniendo en cuenta el modelo CAD realizado, y los moldes utilizados en varios tutoriales sobre fabricación de objetos en látex y en silicona de diferentes tipos. Debido al diseño requerido de la pinza, es necesario dividirla en dos partes, dejando la zona de agarre separada de la zona de los lóbulos, para poder completar satisfactoriamente la elaboración del molde en el software, garantizando los espesores requeridos por la pinza en las dos mitades generadas, compuestas tanto por la zona de agarre como por la zona de lóbulos.

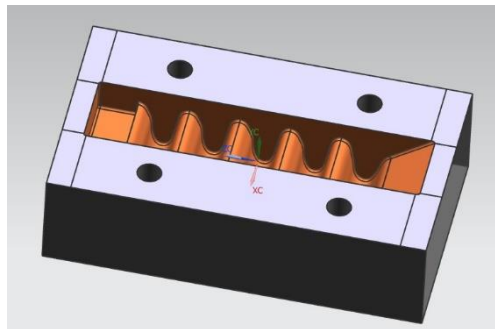
El asistente para moldes del software NX permite generar las piezas correspondientes al núcleo y la cavidad para ambas partes de la pinza, mediante la asignación del material a utilizar, la definición de las regiones de la pinza correspondientes al núcleo y la cavidad, y la línea de separación entre el núcleo y la cavidad. En la figura 3 y figura 4 se observa el diseño generado mediante el software NX del núcleo y cavidad respectivamente, requeridos para fabricar la zona de los lóbulos de la pinza flexible, con los agujeros realizados para garantizar su correcto ensamblaje, y sus dimensiones reducidas para reducir costos de fabricación.

Figura 3. Modelo CAD del núcleo de la zona de los lóbulos.



Fuente: Autor

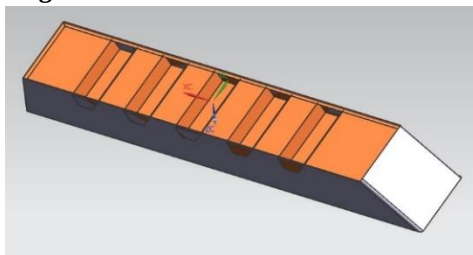
Figura 4. Modelo CAD de la cavidad de la zona de los lóbulos.



Fuente: Autor

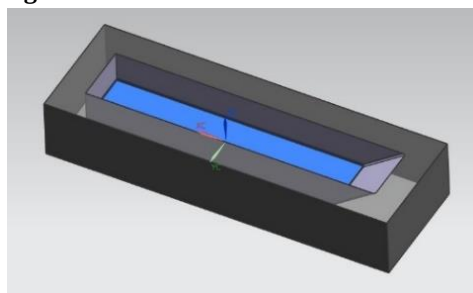
En la figura 5 y figura 6 se observa el diseño generado mediante el mismo software del núcleo y la cavidad respectivamente, requeridos para fabricar la zona de agarre de la pinza flexible.

Figura 5. Modelo CAD del núcleo de la zona de agarre.



Fuente: Autor

Figura 6. Modelo CAD de la cavidad de la zona de agarre.



Fuente: Autor

Posterior a la validación del núcleo y la cavidad de las dos mitades de las pinzas, de la definición de las dimensiones y geometrías requeridas para el ensamble del núcleo y de la cavidad de ambas zonas, se procede a realizar la fabricación de estas.

3.2 Fabricación del molde para las pinzas flexibles

Previo a la realización del diseño del molde, se evalúa, mediante la consulta de varios artículos científicos, la posibilidad de realizar la fabricación de las pinzas mediante impresión 3D, con el objetivo de facilitar el proceso, ahorrar tiempo y reducir costos de fabricación. En el primer prototipo de pinza fabricado, por recomendación de un fabricante de piezas en Poliuretano Termoplástico (TPU), se utilizan los parámetros de impresión indicados en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de impresión 3D utilizados para la fabricación del primer prototipo.

Altura de capa	0.3 mm
Ancho de extrusión	0.4 mm
Densidad	20%
Temperatura de impresión	220°C
Temperatura de cama	60°C
Velocidad de retracción	50 mm/s
Longitud de retracción	2 mm
Velocidad de primera capa	30 mm/s

Fuente: Autor

Posteriormente, se realiza el curado de la pinza mediante la aplicación de una delgada capa de resina epóxica en toda la superficie de esta, para cerrar los poros que pudiera tener, y así evitar las fugas de aire. Luego de realizar el proceso de curado, se conecta la pinza al compresor de aire para verificar su correcto funcionamiento, resultando en la aparición de varias fugas, incluso después de repetir el proceso de curado tres veces.

Como consecuencia del resultado de la prueba, se procede a revisar de nuevo los artículos científicos para encontrar los parámetros de impresión que permitieran no tener fugas de aire en la pieza, de modo que cumpliera su función. En el artículo de Charbel Tawk, Yuan Gao, Rahim Mutlu y Gursel Alici [8], se encuentran los parámetros de impresión utilizados para realizar el segundo prototipo de pinza, indicados en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de impresión 3D utilizados para la fabricación del segundo prototipo.

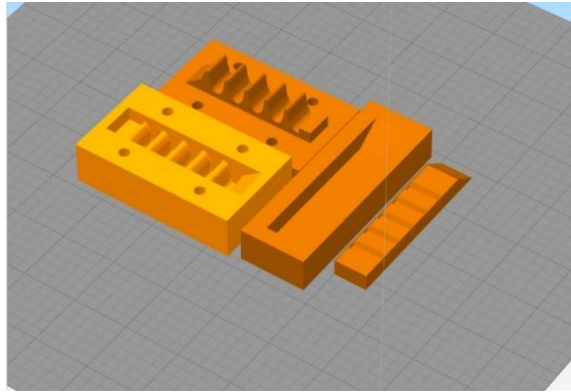
Altura de capa	0.1 mm
Ancho de extrusión	0.4 mm
Densidad	20%
Temperatura de impresión	220°C
Temperatura de cama	60°C
Velocidad de retracción	40 mm/s
Longitud de retracción	2 mm
Velocidad de primera capa	30 mm/s

Fuente: [8].

Luego de imprimir la pieza con los nuevos parámetros, se realiza la misma prueba efectuada al primer modelo, resultando en la aparición de fugas menores y, contrario a lo que se esperaba, la pinza no efectúa ningún tipo de movimiento al realizar la conexión al compresor de aire, por lo que se decide no seguir realizando prototipos de la pinza en impresión 3D y proceder a realizar la fabricación de la misma mediante moldes.

La fabricación de los moldes para ambas partes de las pinzas se realiza mediante impresión 3D, utilizando filamento de PET-G. En la figura 7 se muestra la distribución de las piezas en el software Simplify 3D y, por tanto, en la impresora 3D. Se fabrican con una altura de capa de 0.2 mm, correspondiente a una calidad media de impresión, 20% de relleno, y se le realizan cuatro capas internas.

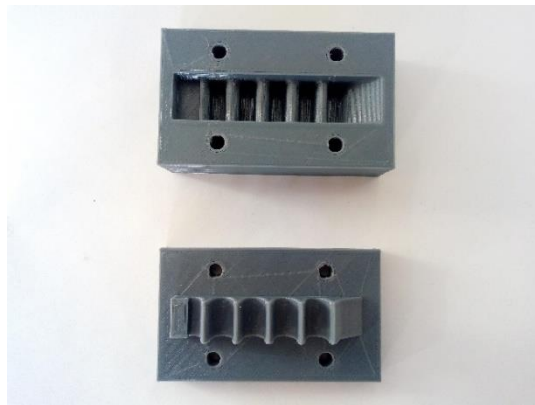
Figura 7. Distribución de las piezas a imprimir en el Software Simplify 3D.



Fuente: Autor

En la figura 8 y 9 se puede observar la vista superior e isométrica respectivamente del núcleo y la cavidad de la zona de los lóbulos ya impresos en 3D.

Figura 8. Vista superior del núcleo y la cavidad de la zona de lóbulos.



Fuente: Autor

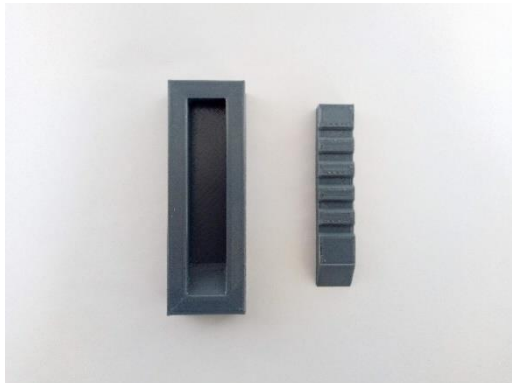
Figura 9. Vista isométrica del núcleo y la cavidad de la zona de lóbulos.



Fuente: Autor

En la figura 10 y 11 se puede observar la vista superior e isométrica respectivamente del núcleo y la cavidad de la zona de agarre impresos en 3D.

Figura 10. Vista superior del núcleo y la cavidad de la zona de lóbulos.



Fuente: Autor

Figura 11. Vista isométrica del núcleo y la cavidad de la zona de agarre.



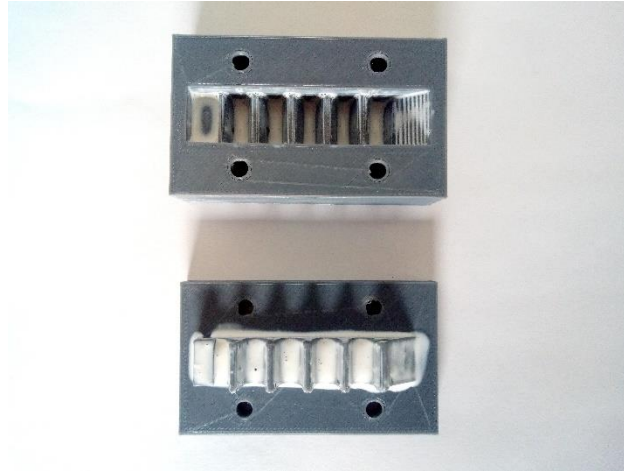
Fuente: Autor

3.3 Fabricación de las pinzas flexibles

Para realizar la fabricación de la pinza, se comienza por implementar el proceso mediante el uso de látex, ya que el material se adquiere desde la etapa de diseño del gripper, por lo que se encuentra disponible para realizar la fabricación. Como primer procedimiento, se aplica una capa de látex en la zona de contacto del material con las piezas correspondientes al núcleo y la cavidad. En la figura 12 se observa la aplicación de la capa de látex al núcleo y la cavidad de la zona de los lóbulos. De igual forma, en la figura 13 se observa la aplicación de la capa de látex al núcleo y la cavidad de la zona de agarre de la pinza. Luego de dejar curar durante

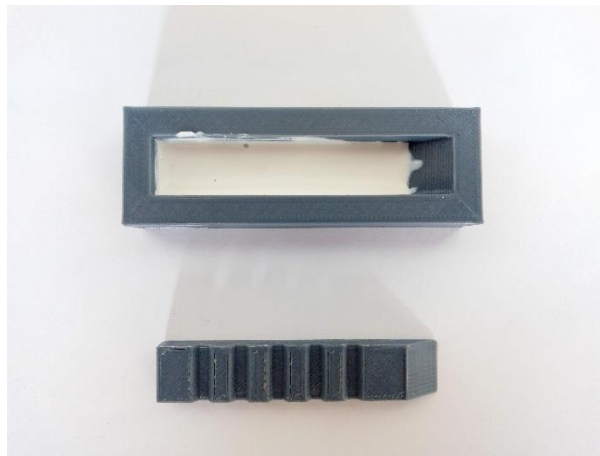
media hora la capa de látex, se procede a realizar el llenado de látex de la cavidad de la zona de los lóbulos y de la cavidad de la zona de agarre, y se ensambla el núcleo y la cavidad de ambas zonas, para dejar curar el material durante 24 horas.

Figura 12. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos con capa de látex aplicada.



Fuente: Autor

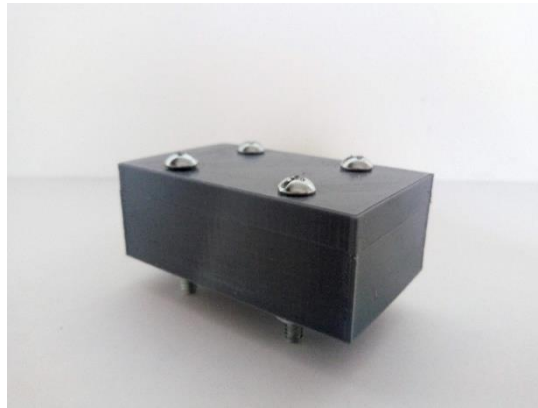
Figura 13. Núcleo y cavidad de la zona de agarre con capa de látex aplicada.



Fuente: Autor

En la figura 14 y 15 se observa el molde de la zona de lóbulos y el molde de la zona de agarre respectivamente ensamblados, luego de llenarlos de látex.

Figura 14. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos con capa de látex aplicada ensamblados.



Fuente: Autor

Figura 15. Núcleo y cavidad de la zona de agarre con capa de látex aplicada ensamblados.



Fuente: Autor

Para el primer intento de fabricación de la pinza en látex, se deja curar por 24 horas ambas partes, y luego se comprueba que el material no formó una capa lo suficientemente gruesa, por lo que se busca otro procedimiento, que consiste en verter el látex líquido de los moldes a un recipiente, para mezclarlo con el látex en proceso de curación y, cerrar de nuevo los moldes para dejar curar otras 24 horas. El procedimiento se repite nuevamente luego de este lapso de tiempo, para obtener la pieza a las siguientes 24 horas, tardando un total de 72 horas. Posterior a la realización de este procedimiento, se observa que se había formado una capa muy delgada y dispareja de látex, por lo que se decide cambiar el material por silicona RTV (Room Temperature Vulcanizing), teniendo en cuenta que en el artículo de Mochammad Ariyanto, M. Munadi, Joga D. Setiawan, Dedi Mulyanto y Tanto Nugrobo se utiliza silicona de tipo RTV 52 para fabricar la pinzas suaves utilizadas en el gripper fabricado [2].

Al realizar la búsqueda en el mercado de este tipo de silicona, se encuentra, mediante la consulta a los proveedores del material, que la silicona con propiedades similares en el mercado para realizar la fabricación de las dos partes de la pinza es la silicona de tipo RTV

120, por lo cual se realiza la fabricación de la pinza en este material. En la figura 16 se observa la tabla de parámetros técnicos de la silicona RTV 120 suministrada por el fabricante, en el catálogo del producto.

Figura 16. Parámetros técnicos de la silicona RTV 120 suministrados por el fabricante.

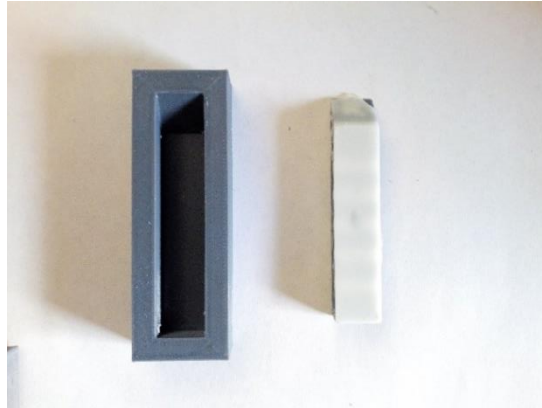
Technical Parameters	
ITEMS	PARAMETERS
Appearance:	WHITE
Mixed Viscosity (25°C)(Mpa.s)	22000±1000
Mixing ratio (A:B)	100:3
Hardness (ShoreA)	20
Elongation (%)	≥ 500
Tear strength (Mpa)	≥ 5.0
Tensile strength (MPa)	≥ 4.0
Potlife (25°C) (mins)	25
Cure time (25°C) (hours)	10-12
Linear shrinkage (%)≤	0.2

Fuente: [9]

Mediante pruebas con la proporción de silicona y catalizador recomendados por el fabricante, se toman 33 medidas de silicona y 1 medida de catalizador y se mezclan, generando una solidificación muy rápida, debido a los 25 minutos que tarda en comenzar a curar la silicona luego de vertida en otro recipiente, según la ficha técnica brindada por el fabricante. Luego, se procede a verter en la cavidad de la zona de los lóbulos y en la cavidad de la zona de agarre, se ensambló el núcleo y la cavidad de ambas zonas, y se deja curar durante 24 horas.

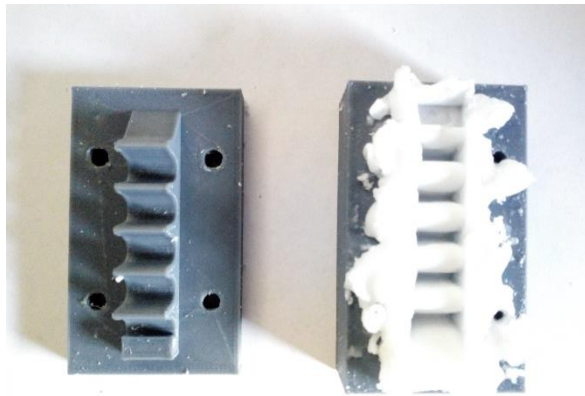
En la figura 17 y figura 18 se puede observar el molde de la zona de agarre y de la zona de lóbulos respectivamente, desensamblados después de completado el tiempo de curado.

Figura 17. Núcleo y cavidad de la zona de agarre desensamblados luego de curada la silicona.



Fuente: Autor

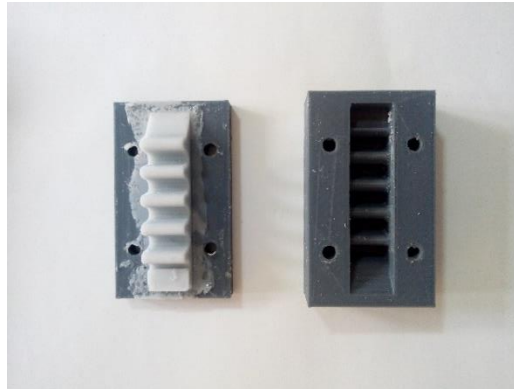
Figura 18. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos desensamblados luego de curada la silicona.



Fuente: Autor

Debido al rápido secado, y a la mala formación de la zona de lóbulos causado por el exceso de material utilizado, se decide reducir la cantidad de silicona a 8.33 ml y de catalizador a 0.25 ml, manteniendo así la proporción recomendada por el fabricante, logrando reducir el tiempo de llenado de la silicona y permitiendo el correcto vaciado de la mezcla en la cavidad de la zona de lóbulos. En la figura 19 se muestra el núcleo y la cavidad de la zona de lóbulos desensamblados, al curar la silicona por segunda vez.

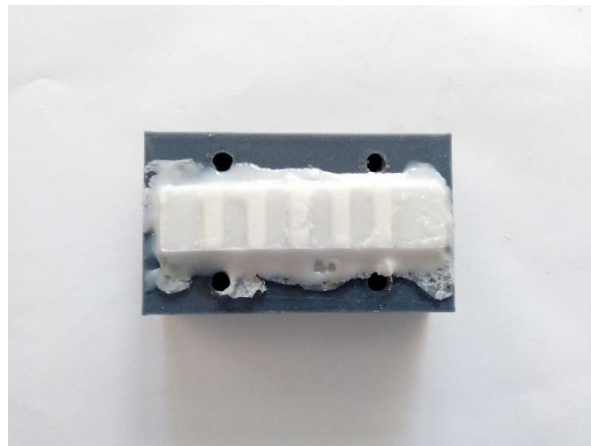
Figura 19. Núcleo y cavidad de la zona de lóbulos desensamblados luego de curada la silicona por segunda vez.



Fuente: Autor

Para realizar el acople entre la zona de agarre y la zona de los lóbulos, se procede a juntar ambas zonas, insertando la zona de los lóbulos en la cavidad correspondiente y colocando la zona de agarre en la posición deseada sobre la zona de los lóbulos, para realizar la unión de ambas mediante silicona en los bordes de esta, como lo indica el artículo anteriormente mencionado [2]. En la figura 20 se puede observar las zonas unidas luego de aplicar silicona tanto en el borde de la zona de lóbulos, como en el borde de la zona de agarre, para garantizar un correcto sellado del área de contacto entre ambas partes de la pinza.

Figura 20. Zona de lóbulos y de agarre unidas mediante silicona, soportadas por la cavidad de la zona de lóbulos.



Fuente: Autor

Luego de completar el tiempo de curado de la unión de la silicona, se retira la pinza de la cavidad de la zona de lóbulos. En la figura 21 y figura 22 se puede observar la vista frontal y la vista lateral respectivamente, de la pinza retirada de la cavidad con los bordes de silicona producto de la unión realizada.

Figura 21. Vista frontal de la pinza retirada de la zona de la cavidad con el borde de silicona.



Fuente: Autor

Figura 22. Vista lateral de la pinza retirada de la zona de la cavidad con el borde de silicona.



Fuente: Autor

Para retirar el borde de silicona generado por la unión, se procede a recortarlo, y a verificar el correcto sellado de la zona de unión entre la zona de lóbulos y la zona de agarre, realizando con silicona el sellado de las partes dónde la unión no se realiza correctamente. En la figura 23 y 24 se puede observar la vista frontal y lateral respectivamente, de la pinza con el borde de silicona recortado y la zona de unión verificada y sellada.

Figura 23. Vista frontal de la pinza con el borde de silicona recortado.



Fuente: Autor

Figura 24. Vista lateral de la pinza con el borde de silicona recortado.



Fuente: Autor

Posterior a la fabricación de las cuatro pinzas, se realiza la perforación del agujero, mediante un alambre de 1 mm de espesor, el cual se calienta para poder perforar la pinza, y ensamblar la unión que permite el ingreso de aire a cada una de las pinzas. Para acoplar la pinza y la unión, se aplica silicona en una de las puntas de la unión, se introduce en el agujero realizado a la pinza, y luego se aplica más silicona alrededor de la unión y en la zona de contacto entre la pinza y la unión acoplada. En la figura 25 se puede observar una de las pinzas con la unión acoplada.

Figura 25. Pinza con unión para manguera acoplada.



Fuente: Autor

Al terminar la fabricación, se procede a realizar pruebas a las cuatro pinzas para validar que no tengan microfugas y así garantizar su correcto funcionamiento, conectándolas a un compresor de aire, y sumergiéndolas en un recipiente con agua. De igual forma, se comprueba que las pinzas realicen el tipo de movimiento esperado por acción de la presión de aire.

Como resultado de las pruebas realizadas a las cuatro pinzas, se determina que para disminuir su flexibilidad y lograr el movimiento requerido, es necesario aumentar el espesor tanto de la zona de lóbulos como de la zona de agarre, por lo cual se fabrican dos pinzas de 3 mm de espesor para realizarles pruebas y determinar la disminución de la flexibilidad. Al notar un movimiento pronunciado en la zona de agarre con respecto al movimiento de la zona de lóbulos, se decide aumentar el espesor de esta zona a 5 mm. En la figura 26 se ilustra la zona de agarre y el núcleo del molde de esta zona después de curada la silicona utilizada para aumentar su espesor.

Figura 26. Zona de agarre de 5 mm de espesor y el respectivo núcleo del molde.



Fuente: Autor

Las zonas de lóbulos de 3 mm de espesor se reutilizan y se corrigen con ayuda de su correspondiente núcleo, para luego de curadas unirlos a sus respectivas zonas de agarre. En la figura 27 se aprecia la vista lateral de la pinza gruesa retirada de la cavidad del molde de la zona de agarre.

Figura 27. Vista lateral de la pinza gruesa retirada de la zona de la cavidad con el borde de silicona.



Fuente: Autor

Luego de cortar el exceso de silicona producto de la unión de la zona de agarre y de la zona de lóbulos, se procede a perforar el agujero en la parte superior de la pinza, para acoplar la unión a la nueva pinza, realizando el procedimiento indicado anteriormente. En la figura 28 se puede observar la pinza gruesa con la unión para manguera acoplada.

Figura 28. Pinza gruesa con unión para manguera acoplada.



Fuente: Autor

3.4 Fabricación de la caja de acople y sujeción

La fabricación de la caja de acople y sujeción se realiza mediante impresión 3D, utilizando filamento de PET-G. Se fabrica con una altura de capa de 0.25 mm, correspondiente a una calidad media de impresión, 50% de relleno, y se le realizan dos capas internas de 0.8 mm de espesor. En la figura 29 se muestra la vista isométrica de la caja de acople y sujeción impresa.

Figura 29. Vista isométrica de la caja de acople y sujeción.



Fuente: Autor

En la figura 30 y 31 se puede observar la vista superior y posterior respectivamente de la caja de acople y sujeción impresa.

Figura 30. Vista superior de la caja de acople y sujeción.



Fuente: Autor

Figura 31. Vista posterior de la caja de acople y sujeción.



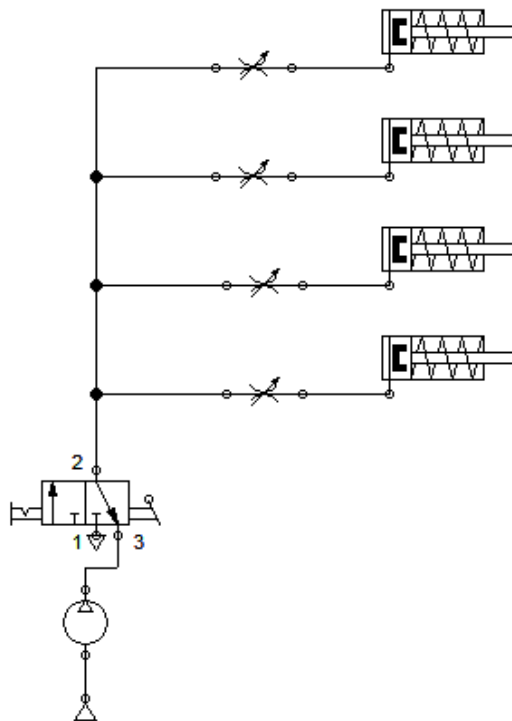
Fuente: Autor

4. DESARROLLO DEL CONTROL PARA EL SISTEMA DE MANIPULACIÓN TIPO GRIPPER FLEXIBLE

4.1 Implementación del circuito para la apertura y cierre de la válvula neumática

Para garantizar la apertura y cierre de las pinzas, se decide implementar una válvula neumática manual, ya que este tipo de válvula permite simplificar el circuito neumático de control de las pinzas, al requerir menor cantidad de componentes para su funcionamiento. En la figura 32 se ilustra el esquema neumático del gripper flexible, realizado en el software FluidSim.

Figura 32. Esquema neumático del gripper flexible realizado en el software FluidSim.



Fuente: Autor

Para seleccionar la válvula neumática adecuada, se realiza una búsqueda en el mercado de válvulas neumáticas manuales, y se adquiere la que tiene las entradas de $\frac{1}{4}$ "de diámetro, y un fácil accionamiento, conforme a la ubicación de la válvula en la caja de acople y sujeción, por lo que se escoge una válvula de 3 posiciones y 2 vías, con accionamiento manual por palanca, marca Airtac, mostrada en la figura 33.

Figura 33. Vista frontal de la válvula neumática manual de marca Airtac.



Fuente: Autor

Para distribuir el aire saliente de la válvula neumática, se decide implementar una válvula distribuidora de cuatro salidas regulables, de modo que se pueda controlar la cantidad de aire que ingresa a cada una de las pinzas. En la figura 34 se puede observar la válvula escogida.

Figura 34. Vista superior de la válvula distribuidora de cuatro salidas.



Fuente: Autor

Con el fin de definir la presión adecuada de funcionamiento para las pinzas, se realizan pruebas a cada una de las pinzas a una presión de 1 psi. Como resultado de estas pruebas, se determinó que el rango ideal de presiones para lograr el movimiento deseado debe ser entre 1 y 3 psi, por lo cual se configuró el compresor para que generara una presión de 2 psi. Finalmente, se conecta el compresor a la válvula neumática manual mediante manguera y racores de 1/4", luego la válvula neumática a la válvula distribuidora y, por último, la válvula distribuidora a las pinzas mediante las uniones de manguera estándar.

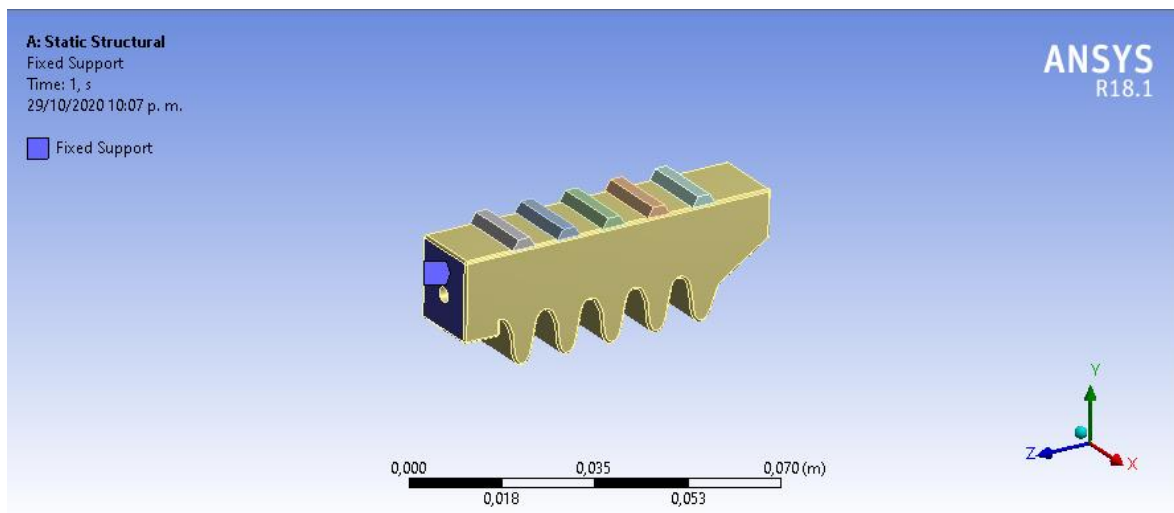
5. PRUEBAS Y VALIDACIÓN DE LA OPERACIÓN PICK AND PLACE

5.1 Simulación del funcionamiento de la pinza mediante software CAE

Para la realización de la simulación mediante software CAE se comienza por consultar en diversos artículos científicos el software utilizado, las condiciones del material, el enmallado, las condiciones del entorno, y la correcta generación de la solución del modelo.

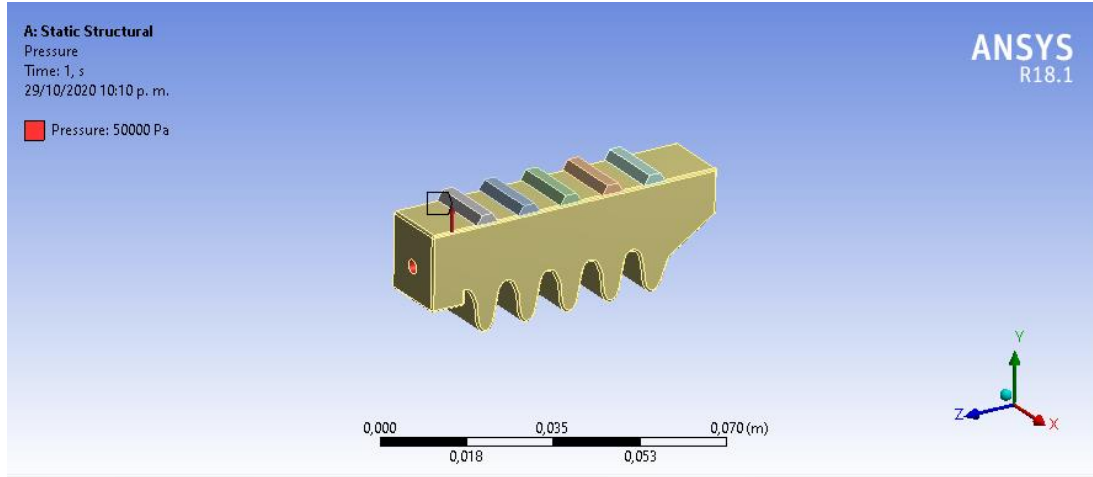
En primer lugar, se definen los valores del módulo de Young (2 MPa) y el coeficiente de Poisson (0.48) de la silicona RTV 120, con base en el tutorial de simulación de pinzas neumáticas realizado por Huei-Huang Lee [10], luego se carga la geometría de la pinza realizada en el software NX, para proceder a establecer las condiciones del entorno. En la figura 35 y figura 36 se observa las condiciones de soporte fijo y presión interna respectivamente, asignadas a la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS.

Figura 35. Condición de soporte fijo definida para la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS.



Fuente: Autor

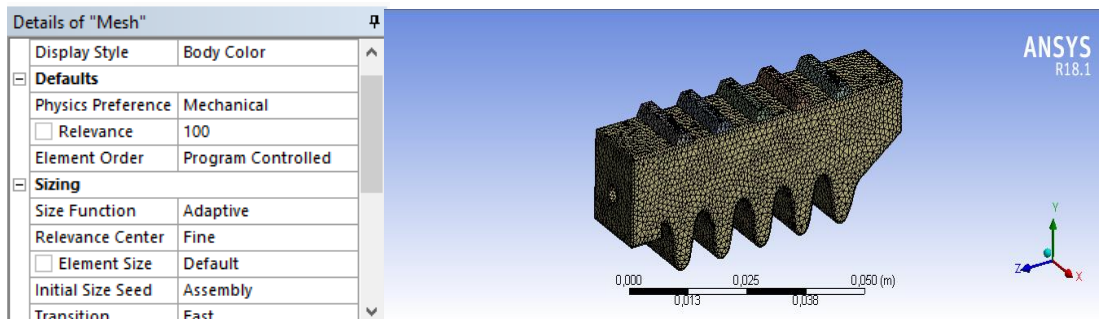
Figura 36. Condición de presión interna definida para la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS.



Fuente: Autor

El enmallado se realiza siguiendo el procedimiento de generar elementos grandes en primer lugar, para luego mejorar la calidad del enmallado con el objetivo de disminuir el número de elementos de gran tamaño, hasta obtener un enmallado de tipo fino, donde la gran mayoría de elementos sean de menor tamaño y el enmallado tenga un porcentaje de relevancia del 100%. En la figura 37 se puede observar el resultado final del enmallado con sus condiciones definidas.

Figura 37. Resultado final del enmallado de la pinza realizado en el entorno Mechanical del software ANSYS con sus respectivas condiciones.

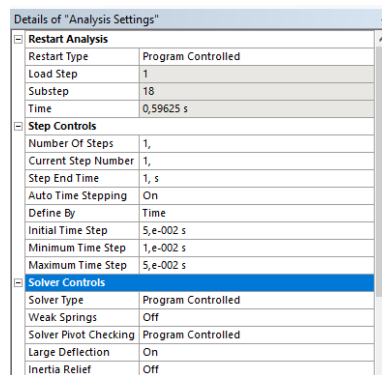


Fuente: Autor

A continuación, se debe insertar una deformación de tipo direccional y designar su orientación en el eje Y, para luego puede generar la solución lineal del problema. Debido a que el comportamiento del material no es lineal, ya que la silicona utilizada es de tipo hiperelástica, a causa de su estructura flexible [11], se debe configurar el análisis para que el software de análisis de elementos finitos simule correctamente el comportamiento de la pinza

bajo las condiciones indicadas y, genere una solución de tipo no lineal. Se debe primero activar la configuración de paso automático de tiempo, para que el software pueda configurarlo, definido por tiempo, y configurar el paso de tiempo inicial en 0.05 segundos, el paso mínimo de tiempo en 0.01 segundos, y el paso máximo de tiempo en 0.05 segundos. Luego se debe activar la deflexión en el mismo menú de configuraciones del análisis. En la figura 38 se muestran la parte del menú mencionado con las configuraciones mencionadas.

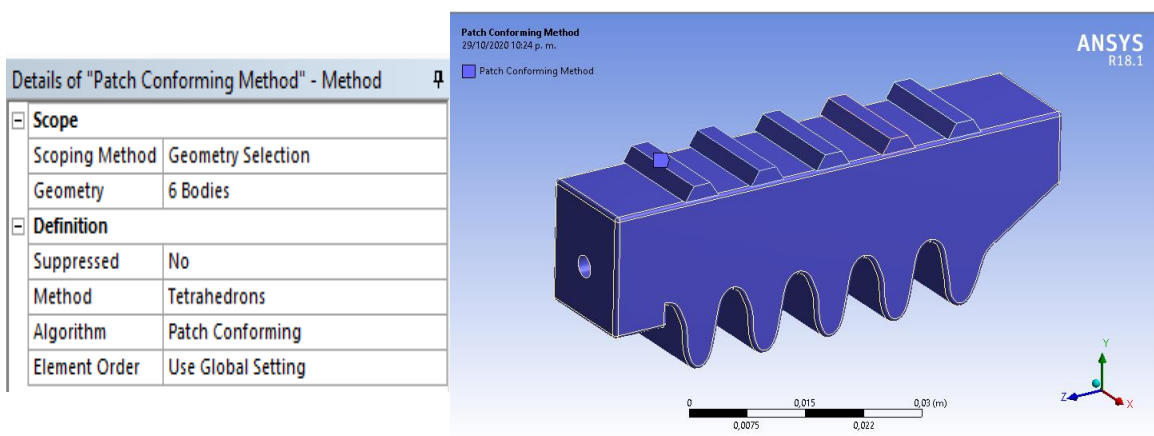
Figura 38. Parte del menú de configuración de análisis con las configuraciones mencionadas.



Fuente: Autor

Luego, se debe entrar al menú de configuración del enmallado para cambiar el método de conformado a elementos tetraedrales, con el objetivo de asegurar que los resultados sean independientes del enmallado, como lo menciona el artículo de Charbel Tawk, Yuan Gao, Rahim Mutlu y Gursel Alici [8]. En la figura 39 se puede observar la pinza con las configuraciones del método de conformado por tetraedros.

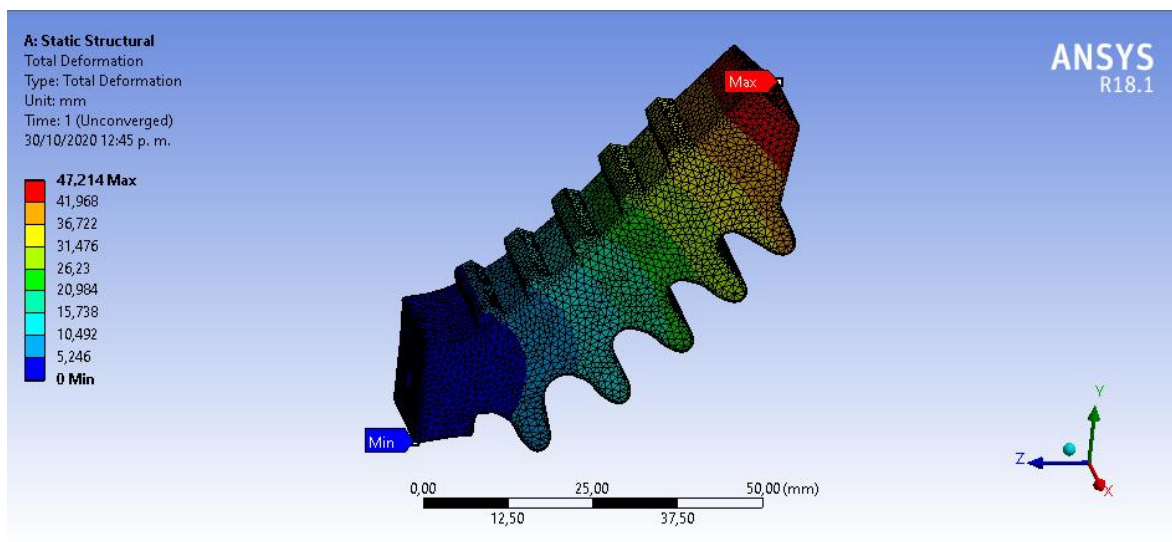
Figura 39. Pinza con las configuraciones del método de conformado por tetraedros realizadas en el entorno Mechanical del software ANSYS con sus respectivas condiciones.



Fuente: Autor

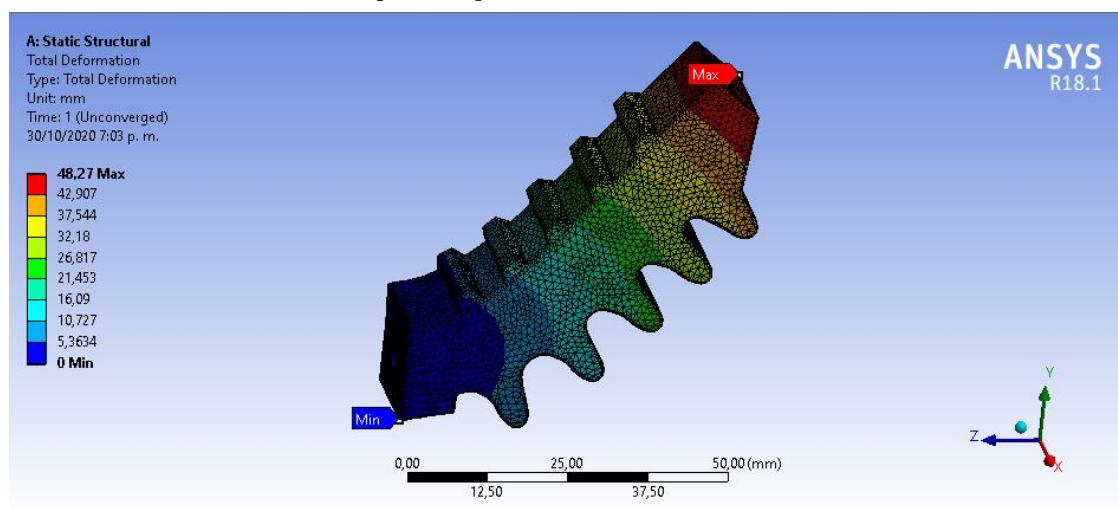
Finalmente, antes de solucionar el modelo, en el menú de configuración de la solución, se verifica que siga seleccionada la opción de generar la gráfica de convergencia de desplazamiento, la cual permite validar la correcta generación de la solución. En las figuras 40, 41 y 42 se pueden ver los resultados de la simulación realizada para 25 kPa, 50 kPa y 75 kPa de presión interna. La escala de colores muestra las regiones de la pinza con mayores y menores desplazamientos y sus respectivos valores en milímetros.

Figura 40. Resultado de la simulación realizada a la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS para una presión interna de 25 kPa.



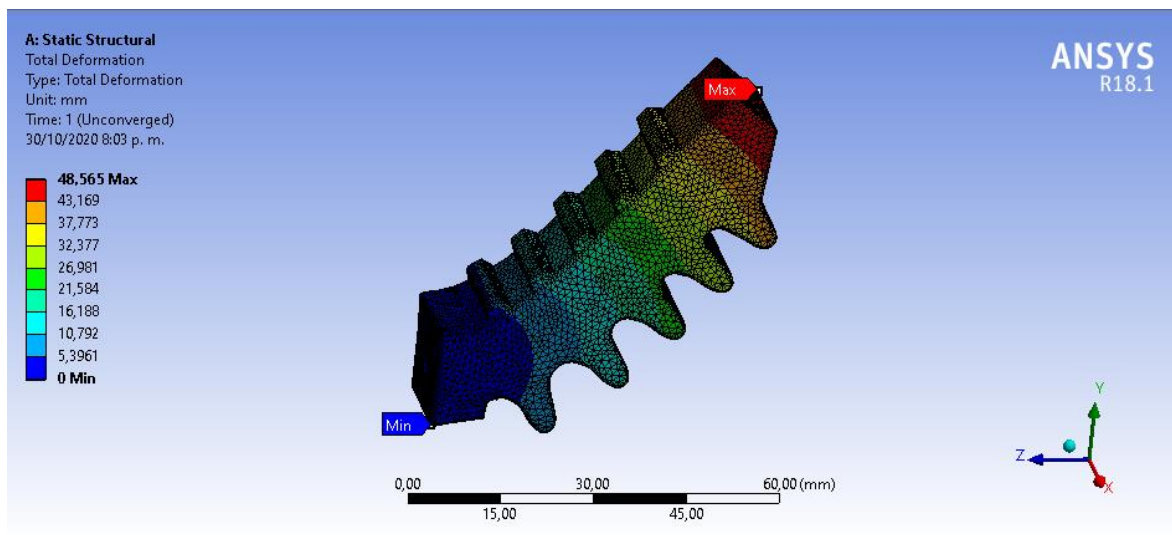
Fuente: Autor

Figura 41. Resultado de la simulación realizada a la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS para una presión interna de 50 kPa.



Fuente: Autor

Figura 42. Resultado de la simulación realizada a la pinza en el entorno Mechanical del software ANSYS para una presión interna de 75 kPa.



Fuente: Autor

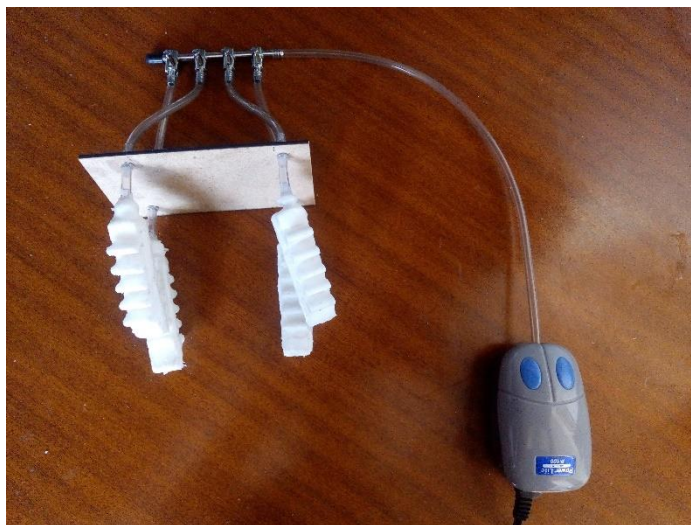
Los análisis realizados en el entorno Mechanical del software Ansys demuestran que, a medida que incrementa la presión de aire, el desplazamiento de las pinzas será mayor, por lo que podrán realizar correctamente el agarre de objetos acordes con la distribución escogida para las pinzas, de forma que validan el funcionamiento del diseño de estas. Con el fin de comparar los resultados de la simulación con los resultados experimentales, se realiza una simulación a la presión de salida indicada por el fabricante del compresor para acuario, y una medición del desplazamiento que genera esta presión en las cuatro pinzas. Al presentarse una diferencia del 3.5% entre el valor del desplazamiento promedio medido, correspondiente a 20.25 mm y el valor indicado por la simulación, correspondiente a 20.96 mm, se comprueba que los valores del módulo de Young y del coeficiente de Poisson son los indicados, ya que logran de forma muy aproximada simular el comportamiento de la silicona RTV 120.

5.2 Pruebas de funcionamiento de las pinzas

Para validar el correcto funcionamiento de las pinzas, se le realizan pruebas sometiénolas a diferentes presiones, con el fin de verificar el movimiento y la flexibilidad necesarias para la realización de la operación pick and place. Como resultado de la prueba realizada con una presión de entrada de 2 psi, se determinó que se debía reducir la flexibilidad de las pinzas, por lo que se fabricaron dos pinzas de 2 mm de espesor y dos de 3 mm de espesor, con el objetivo de comprobar si al aumentar el espesor tanto de la zona de lóbulos, como de la zona de agarre, disminuye la flexibilidad de las pinzas y, por lo tanto, aumenta su capacidad de carga. Al realizar de nuevo las pruebas a las pinzas fabricadas, se determinó que la flexibilidad de la zona de lóbulos debía disminuirse, por lo que se aumentó el espesor de esa

zona, y se acopló de nuevo a la zona de lóbulos de 3 mm de espesor, como se describe en la sección 3.3 de este documento. Al tener fabricadas las cuatro pinzas de estas características, se les realizan diferentes pruebas de agarre de objetos livianos a distintas presiones, con el fin de validar su correcto funcionamiento. En la figura 43 se observan las cuatro pinzas acopladas a la tabla de pruebas y al compresor.

Figura 43. Pinzas gruesas acopladas a la tabla de pruebas.

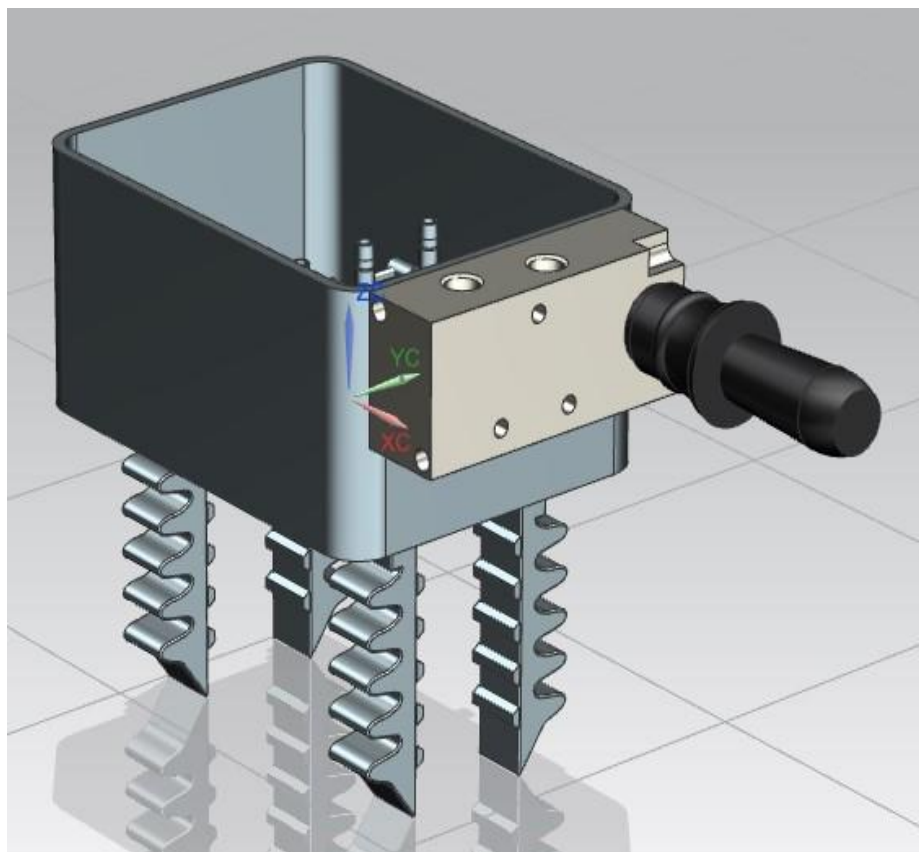


Fuente: Autor

5.3 Integración del gripper flexible

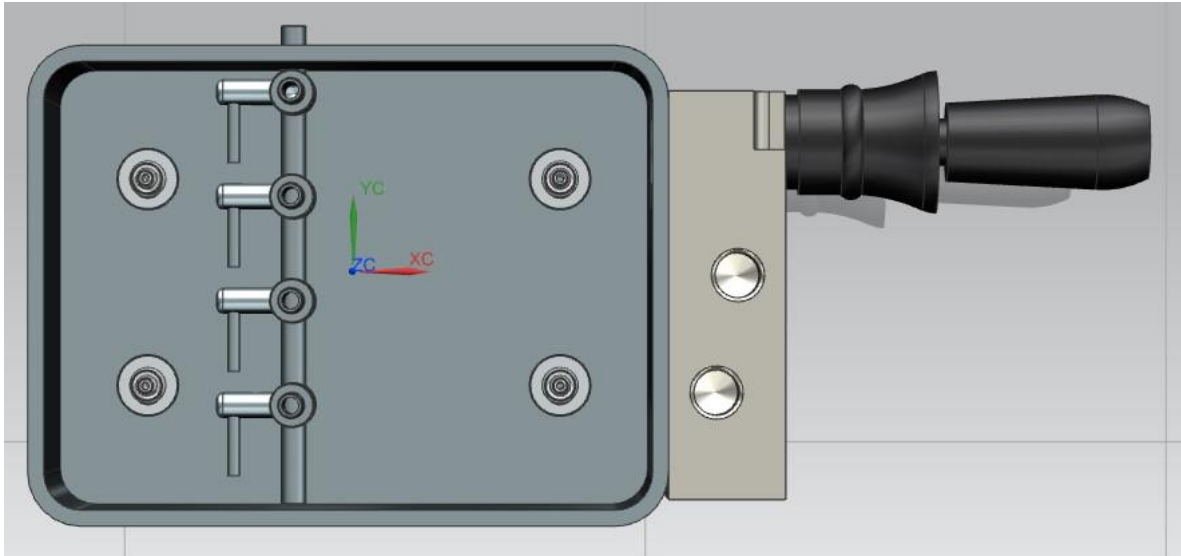
Posterior a la implementación y validación del circuito neumático, se procede a instalar la válvula neumática, la válvula distribuidora, y las pinzas en la caja de acople de sujeción mediante los agujeros realizados en la misma, y se realizaron las conexiones neumáticas requeridas para el funcionamiento del gripper. En la figura 44 y figura 45 se puede apreciar la vista isométrica y superior respectivamente del diseño realizado en software CAD del gripper, utilizado como referencia para instalar los componentes mencionados.

Figura 44. Vista isométrica del diseño en software CAD del gripper.



Fuente: Autor

Figura 45. Vista superior del diseño en software CAD del gripper.



Fuente: Autor

En la figura 46 se ilustra el circuito neumático integrado a la caja de sujeción.

Figura 46. Circuito neumático integrado a la caja de sujeción.



Fuente: Autor

Al comprobar de nuevo el correcto funcionamiento del circuito neumático una vez integrado a la caja de acople y sujeción, se procede a realizar las pruebas respectivas para validar la operación pick and place.

5.4 Pruebas y validación de la operación pick and place

Las pruebas y la validación de la operación pick and place se realizan mediante varios intentos de agarre y cambio de posición de dos tipos de objetos. En primer lugar, se comprueba que la presión de funcionamiento del sistema sea la adecuada para mover las pinzas lo suficiente para generar la fuerza requerida de agarre en el objeto. Luego, para lograr un movimiento lo más parecido posible en todas las pinzas, se regula la presión de aire que ingresa a cada una, mediante la regulación de la cantidad de aire en cada una de las salidas de la válvula distribuidora.

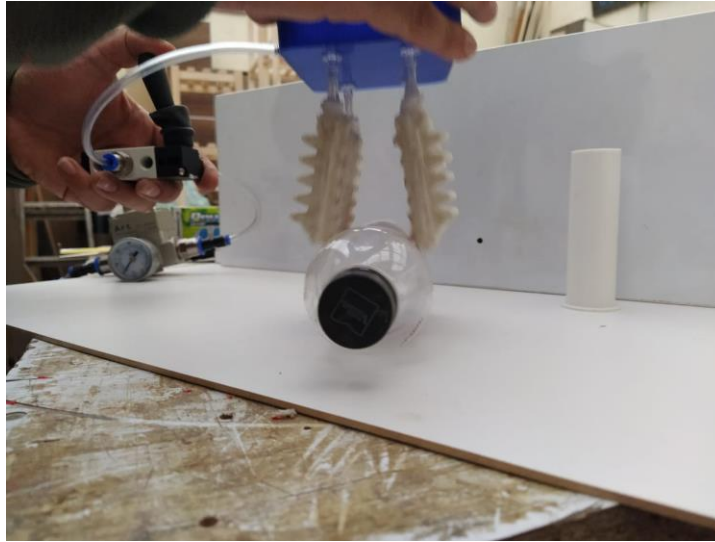
Al realizar diez pruebas de funcionamiento del gripper, se determina que la presión de salida del compresor debe ser de 2 psi para lograr el correcto funcionamiento de las pinzas, el agarre requerido y el posicionamiento del objeto. En la figura 47 y figura 48 se observa el gripper flexible realizando el agarre del objeto y su posicionamiento respectivamente.

Figura 47. Gripper flexible realizando el agarre del objeto.



Fuente: Autor

Figura 48. Gripper flexible realizando el posicionamiento del objeto.



Fuente: Autor

6 CONCLUSIONES

Se diseña un gripper flexible mediante la implementación de la metodología de diseño QFD y a través de software CAD, luego de calculadas las dimensiones requeridas, tanto de las pinzas como de caja de acople y sujeción, realizando un procedimiento que se puede implementar para fabricar grippers flexibles para diversas aplicaciones, por lo que este documento brinda un apoyo a los estudiantes, ingenieros y docentes que deseen profundizar más en el tema.

Al evaluar el primer diseño de pinza propuesto, se comprueba que su alta flexibilidad no permite realizar correctamente el agarre de objetos, por lo cual finalmente se determina que el diseño adecuado debía tener mayor espesor en la zona de agarre que en la zona de lóbulos, definiendo en 5 mm y 3 mm respectivamente sus espesores.

Como resultado de la fabricación de pinzas mediante la técnica de impresión 3D, utilizando diferentes parámetros de impresión, se observa que la técnica de manufactura más adecuada para fabricar las pinzas es mediante moldes, ya que se puede garantizar que no tengan fugas, al poder utilizar silicona RTV 120 para su fabricación. La técnica más adecuada para construir los moldes y la caja de acople y sujeción es la impresión 3D, al ser una alternativa de bajo costo que sólo requiere la impresora y el filamento para fabricar piezas.

La implementación del control para el gripper flexible mediante un circuito neumático permite reducir la cantidad de componentes, al ser un sistema manual, que sólo requiere para

funcionamiento una fuente de aire, racores, válvulas, compresores y mangueras. La simulación realizada a través del software de tipo CAE permite comprobar el funcionamiento del diseño realizado para las pinzas, bajo diferentes presiones, lo que valida el correcto diseño y funcionamiento del gripper.

Las pruebas realizadas para validar la operación pick and place permitieron definir la presión requerida para el funcionamiento del gripper, de modo que completara satisfactoriamente una operación pick and place con un objeto asimétrico, por lo que se cumple satisfactoriamente con el objetivo del presente trabajo de grado.

7 REFERENCIAS

- [1] J. Frías, M. Macías, F. Czubaczynski, P. Salek, and J. Glowka, “Soft flexible gripper design, characterization and application,” *Recent Advances Syst. Control Inf. Technol. Proc. Int. Conf. SCIT 2016*, no. December, pp. 368–377, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-48923-0.
- [2] M. Ariyanto, M. Munadi, J. D. Setiawan, D. Mulyanto, and T. Nugroho, “Three-fingered soft robotic gripper based on pneumatic network actuator,” *2019 6th Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. ICITACEE 2019*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/ICITACEE.2019.8904145.
- [3] H. K. Yap, H. Y. Ng, and C. H. Yeow, “High-Force Soft Printable Pneumatics for Soft Robotic Applications,” *Soft Robot.*, vol. 3, no. 3, pp. 144–158, 2016, doi: 10.1089/soro.2016.0030.
- [4] Y. Hao *et al.*, “Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length,” *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2016-Augus, pp. 6109–6114, 2016, doi: 10.1109/ChiCC.2016.7554316.
- [5] S. Robotics, “m Grip P2 UR + Kit,” 2019, [Online]. Available: <https://static1.squarespace.com/static/58af472d20099ee6574a92ad/t/5c793c93652deab695920412/1551449235966/mGrip%2BP2%2BUR%2BSales%2B-%2BSheet%2B800134%2Brev%2BB.pdf>.
- [6] A. Fabio, “Compliant robot gripper won’t scramble your eggs,” 2013. <https://hackaday.com/2013/12/03/compliant-robot-gripper-wont-scramble-your-eggs/>.
- [7] ASME, “VIII.- Diseño y Análisis Estructural de Recipientes a Presión,” in *Código ASME*, 2019, pp. 249–271.
- [8] C. Tawak, Y. Gao, R. Mutlu, and G. Alici, “Fully 3D printed monolithic soft gripper with high conformal grasping capability,” *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, vol. 2019-July, pp. 1139–1144, 2019, doi: 10.1109/AIM.2019.8868668.

- [9] Q. S.A.S., “QUIMTRADE QT-120.pdf.” p. 2, 2020.
- [10] L. Huei-Huang, “Sec09-1(18),” 2018.
https://www.youtube.com/watch?v=SPN4cGCM3kk&ab_channel=Huei-HuangLee.
- [11] G. Zhong, Y. Hou, and W. Dou, “A soft pneumatic dexterous gripper with convertible grasping modes,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 153–154, no. February, pp. 445–456, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.02.028.