
Diseño e implementación de herramientas para la fabricación y caracterización de actuadores neumáticos basados en la robótica blanda

José Fernando de León González



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de herramientas para la fabricación
y caracterización de actuadores neumáticos basados en la
robótica blanda**

Trabajo de graduación presentado por José Fernando de León González
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Diseño e implementación de herramientas para la fabricación
y caracterización de actuadores neumáticos basados en la
robótica blanda**

Trabajo de graduación presentado por José Fernando de León González
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica


Guatemala,

2025

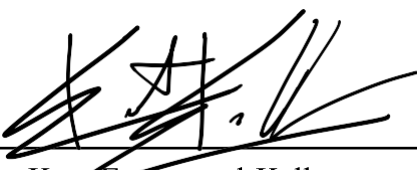
Vo.Bo.:

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

Tribunal Examinador:

(f) 
M.Sc. Carlos Esquit

(f) 
M. Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

Fecha de aprobación: Guatemala, 13 de febrero de 2025.

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad del Valle de Guatemala, por abrirme las puertas y brindarme el entorno ideal para crecer académica y personalmente. Su compromiso con la excelencia y la formación integral de sus estudiantes ha sido una fuente constante de inspiración a lo largo de mi camino.

A mis padres, les agradezco por sus palabras de aliento, su fe inquebrantable en mis capacidades y su amor incondicional, que me han dado la fuerza necesaria para superar cada desafío y alcanzar esta meta. Este logro es tan suyo como mío.

A mi asesor, Kurt Kellner, agradezco profundamente por sus consejos y por creer en este proyecto desde el principio, a pesar de ser muy diferente a cualquier otro realizado anteriormente en el departamento. Su guía fue fundamental para dar forma a esta investigación y concluirla exitosamente.

A mis amigos, mi más profundo agradecimiento por su apoyo constante y por la amistad sincera que me han brindado. Ustedes estuvieron allí en los momentos de alegría, pero también en los días difíciles, ofreciéndome siempre palabras de ánimo y momentos de genuina conexión. Compartimos juntos innumerables experiencias que me acompañarán por siempre: desde largas jornadas de estudio y proyectos desafiantes, hasta conversaciones que llenaron de risas y reflexiones en los días más complicados. Su compañía hizo que este viaje fuera mucho más llevadero y memorable.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad: profesores, compañeros, familiares y todos aquellos que, con pequeños gestos o grandes acciones, dejaron una huella en este recorrido. Cada uno de ustedes ocupa un lugar especial en esta etapa de mi vida, y es gracias a su apoyo que hoy puedo mirar hacia el futuro con esperanza y gratitud.

A todos ustedes, mi más sincera gratitud y reconocimiento. Este logro no habría sido posible sin su apoyo.

Prefacio	III
Lista de figuras	VIII
Lista de cuadros	IX
Resumen	X
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	10
6. Marco teórico	11
6.1. Robótica blanda	11
6.2. Estructura y diseño de un actuador blando con redes neumáticas	12
6.3. Ecoflex 00-30	13
6.4. Litografía blanda	14
6.5. Modelado de materiales hiperelásticos	15
6.5.1. Modelos de materiales hiperelásticos	15
6.6. El método de elementos finitos	18
6.7. Ensayos de tensión	18
6.7.1. Ensayos de tensión pura	18
6.7.2. Ensayos de tensión planar	19

7. Diseño e implementación de una máquina de ensayos a tensión para elastómeros	21
7.1. Diseño mecánico	21
7.1.1. Primera iteración	23
7.1.2. Segunda iteración	30
7.2. Diseño electrónico	32
7.3. Diseño y programación del microcontrolador y de la aplicación de control de la máquina de ensayos	34
7.4. Diseño y fabricación de moldes para probetas de Ecoflex 00-30	36
7.5. Fabricación de probetas de Ecoflex 00-30	38
7.6. Ejecución y validación de ensayos a tensión	42
8. Simulación de un actuador neumático blando de canales rectos	52
8.1. Simulación utilizando Ansys	52
9. Fabricación de un actuador neumático blando de canales rectos	60
9.1. Primera iteración	60
9.2. Segunda iteración	65
10. Diseño e implementación de una plataforma de pruebas para actuadores neumáticos blandos	70
10.1. Diseño mecánico	71
10.2. Diseño electrónico	75
10.3. Programación del microcontrolador y diseño de la aplicación de control de la plataforma de pruebas	78
10.4. Ejecución y validación del análisis de desplazamiento total de un actuador neumático blando	79
11. Redacción de manuales de uso para la máquina de ensayos y la plataforma de pruebas	83
11.1. Investigación preliminar para la redacción de los manuales	83
11.2. Redacción del contenido de los manuales	84
12. Conclusiones	88
13. Recomendaciones	89
14. Bibliografía	90

Lista de figuras

1.	Actuador blando con redes neumáticas completamente accionado [15]	12
2.	Interior de un actuador blando con redes neumáticas [17]	12
3.	Sección de un actuador blando con cámaras oblicuas dobles [20]	13
4.	Proceso de manufactura de una estructura polimérica mediante litografía blanda [14]	14
5.	Proceso de manufactura de un actuador blando utilizando litografía blanda [16]	15
6.	Impresora 3D MK4S de Prusa [27]	22
7.	Isométrico del diseño final del módulo de estructura y ejes de la máquina de ensayos	23
8.	Diagrama de torques máximos del motor Nema 17 para determinadas velocidades de operación [28]	25
9.	Isométrico del diseño final del módulo de pinza móvil de la máquina de ensayos, primera iteración	26
10.	Vista lateral del diseño final del módulo de pinza móvil de la máquina de ensayos, primera iteración	27
11.	Vista seccionada parcialmente de la pinza diseñada para la máquina de ensayos	27
12.	Isométrico del diseño final de la pinza fija, primera iteración	28
13.	Ensamblaje general de la máquina de ensayos, primera iteración	29
14.	Implementación física de la máquina de ensayos, primera iteración	29
15.	Isométrico del diseño final de la pinza móvil, segunda iteración	30
16.	Isométrico del diseño final de la pinza fija, segunda iteración	31
17.	Implementación final del diseño mecánico de la máquina de ensayos	31
18.	Diagrama electrónico de la máquina de ensayos	32
19.	Disposición de componentes en la PCB para la máquina de ensayos	33
20.	Placa de circuito impreso integrada en la máquina de ensayos	34
21.	Interfaz de usuario de la aplicación para el control de la máquina de ensayos	35
22.	Estructura de guardado de datos de un ensayo en Excel	36
23.	Probetas diseñadas para ensayos a tensión pura y tensión planar	37
24.	Moldes diseñados para las probetas de ensayos a tensión pura y tensión planar	38
25.	Diferentes tipos de moldes impresos para fabricar probetas de ensayos a tensión	38
26.	Envases y paletas etiquetadas para la fabricación de probetas de Ecoflex 00-30	39
27.	Envases y paletas etiquetadas para la fabricación de probetas de Ecoflex 00-30	39

28.	Pesaje de 174 g de la mezcla de ambas partes de Ecoflex 00-30	40
29.	Presión de vacío máxima alcanzada	41
30.	Probetas y actuador neumático blando en proceso de curación	41
31.	Resultado final de todas las probetas curadas	42
32.	Tipos de sujetadores disponibles para la realización de ensayos	43
33.	Peso de 100 g utilizado para la recalibración de la máquina de ensayos	43
34.	Sujeción de una probeta para ensayos de tensión pura entre las pinzas de la máquina de ensayos	44
35.	Sistema de análisis de un ensayo montado en Tracker, y rastreo de deformación de la probeta	45
36.	Diagrama de esfuerzo - deformación resultante del promedio de 5 ensayos utilizando las probetas con relación de largo útil a ancho de 10:1	46
37.	Diagrama de esfuerzo - deformación resultante del promedio de 5 ensayos utilizando las probetas con relación de largo útil a ancho de 5:1	46
38.	Sujeción de una probeta para ensayos de tensión planar entre las pinzas de la máquina de ensayos	47
39.	Diagrama de esfuerzo - deformación resultante del promedio de 5 ensayos utilizando las probetas con relación de ancho a largo útil de 10:1, destinadas a tensión planar	48
40.	Diagrama de esfuerzo - deformación resultante de ensayos de tensión pura y tensión planar, con ajustes de curvas de un modelo hiperelástico [5]	49
41.	Ajuste de los datos obtenidos experimentalmente de los ensayos a tensión de Ecoflex 00-30 a la curva del modelo hiperelástico de Ogden de tercer orden	53
42.	Geometría seccionada del actuador blando utilizado para la simulación en Ansys	54
43.	Grupos de caras seleccionados del actuador neumático blando	54
44.	Mallado tetrahédrico realizado para la simulación del actuador neumático blando	55
45.	Diagrama de barras de número de elementos - relación de aspecto para el mallado del actuador neumático blando	56
46.	Diagrama de barras de número de elementos - oblicuidad para el mallado del actuador neumático blando	56
47.	Simulación de deformación total del actuador neumático blando	57
48.	Diagrama de deformación total máxima - presión interna del actuador neumático blando	57
49.	Simulación de los esfuerzos de Von Mises en el actuador neumático blando	58
50.	Diagrama de esfuerzo máximo de Von Mises - presión interna del actuador neumático blando	58
51.	Vista isométrica del cuerpo principal del actuador neumático blando, primera iteración	61
52.	Vista isométrica inferior del cuerpo principal del actuador neumático blando, primera iteración	61
53.	Molde del cuerpo principal del actuador neumático blando, primera iteración	62
54.	Vista isométrica de la capa inextensible del actuador neumático blando, primera iteración	62
55.	Vista isométrica del molde de la capa inextensible del actuador neumático blando, primera iteración	63

56.	Moldes para la fabricación del actuador neumático blando, primera iteración .	63
57.	Actuador neumático blando resultante, primera iteración	64
58.	Vista isométrica del cuerpo principal del actuador neumático blando, segunda iteración	66
59.	Piezas que conforman el molde del cuerpo principal del actuador neumático blando, segunda iteración	66
60.	Moldes para la fabricación del actuador neumático blando, segunda iteración	67
61.	Actuador neumático blando resultante, segunda iteración	67
62.	Pruebas preliminares en el actuador neumático blando	68
63.	Prueba preliminar del actuador neumático blando para la sujeción de un vaso	69
64.	Módulo de entrada de presión de la plataforma de pruebas.	71
65.	Base y sujetador del actuador neumático blando para la plataforma de pruebas	72
66.	Módulo de medición de fuerza diseñado para la plataforma de pruebas	73
67.	Base de montaje y marco de la plataforma de pruebas	74
68.	Ensamble general de la plataforma de pruebas	74
69.	Ensamble físico de la plataforma de pruebas	75
70.	Diagrama electrónico de la plataforma de pruebas	76
71.	Disposición de componentes en la PCB de la plataforma de pruebas	77
72.	Placa de circuito impreso integrada en la plataforma de pruebas	77
73.	Interfaz de usuario de la aplicación de control de la plataforma de pruebas . .	78
74.	Sistema utilizado en Tracker para la medición de desplazamiento del actuador neumático blando, en donde el actuador neumático blando tenía una presión interna de 0 kPa	80
75.	Desplazamiento total del actuador neumático blando con una presión interna de 20 kPa	80
76.	Diagrama de desplazamiento total vs. presión interna del extremo libre del actuador evaluado en un rango de presiones de 0 a 20 kPa	81
77.	Portadas de los manuales realizados	85
78.	Fragmento del apartado de descripción y uso de la aplicación de control de la máquina de ensayos	86
79.	Apartado de soporte técnico y fragmento del apartado de más información del manual de la máquina de ensayos	87

Lista de cuadros

1.	Datos técnicos del Ecoflex 00-30 [21]	14
2.	Datos técnicos de la varilla roscada seleccionada	24
3.	Matriz de decisión para la selección del microcontrolador de la máquina de ensayos	33
4.	Comparación de puntos de interés del diagrama de esfuerzo - deformación experimental obtenido utilizando las probetas con relación de largo a ancho de 5:1 contra el diagrama teórico, y sus respectivos porcentajes de error . . .	50
5.	Comparación de puntos de interés del diagrama de esfuerzo - deformación experimental obtenido utilizando las probetas con relación de largo a ancho de 10:1 contra el diagrama teórico, y sus respectivos porcentajes de error . . .	50
6.	Comparación de puntos de interés del diagrama de esfuerzo - deformación experimental obtenido utilizando las probetas con relación de ancho a largo útil de 10:1 para ensayos de tensión planar contra el diagrama teórico, y sus respectivos porcentajes de error	51
7.	Parámetros del modelo hiperelástico tras el ajuste de los datos experimentales	53

Este trabajo de graduación se centró en el desarrollo de herramientas y técnicas para la caracterización y puesta a prueba de actuadores neumáticos blandos, con la intención de iniciar la investigación de robótica blanda en la Universidad del Valle de Guatemala.

Primero, se implementó una máquina de ensayos a tensión para elastómeros, con la cual se realizaron ensayos a tensión pura y planar de probetas fabricadas con la silicona Ecoflex 00-30. Estos ensayos resultaron en diagramas de esfuerzo - deformación del material, los cuales se compararon con resultados obtenidos utilizando una máquina de ensayos profesional. En el caso de los ensayos a tensión pura, la máquina de ensayos implementada fue capaz de producir resultados con un porcentaje de error menor al 10 %, mientras que los ensayos a tensión planar, se produjo un porcentaje de error máximo del 60 %.

A continuación, se diseñó un actuador neumático blando y se utilizó su modelo CAD para la simulación de la respuesta del actuador frente a una entrada de presión utilizando análisis de elementos finitos. El mallado del modelo de estas simulaciones se validó con métricas de calidad de malla. Como resultado, se obtuvieron diagramas de deformación total y esfuerzo máximo equivalente de Von Mises vs. presión interna del actuador.

Después, se diseñó un molde para la implementación física del actuador neumático blando, utilizando consideraciones de diseño y fabricación digital. El resultado fue un molde impreso en 3D capaz de producir consistentemente actuadores neumáticos blandos funcionales, los cuales se probaron al utilizarlos como pinzas para la sujeción de diferentes objetos con forma irregular.

Luego, se implementó una plataforma de pruebas para una caracterización detallada del actuador neumático blando fabricado. Así, fue posible obtener histogramas experimentales de desplazamiento y fuerza vs. presión interna del actuador. Estos resultados fueron utilizados para validar las simulaciones realizadas anteriormente.

Por último, se redactaron manuales de uso para la máquina de ensayos y para la plataforma de pruebas. Los manuales de uso fueron compartidos con estudiantes de ingeniería mecatrónica para validar que fueran lo suficientemente descriptivos como para que nuevos usuarios fueran capaces de usar estos equipos.

This graduation project is focused on developing tools and techniques for the characterization and testing of soft pneumatic actuators, aiming to initiate soft robotics research at Universidad del Valle de Guatemala.

First, a tensile testing machine for elastomers was developed to perform pure tension and planar tension tests on specimens made from Ecoflex 00-30 silicone. These tests resulted in stress - strain diagrams for the material, which were compared to results obtained using a professional testing machine. For pure tension tests, the implemented testing machine was able to produce results with an error percentage of less than 10 %, while for planar tension tests, a maximum error percentage of 60 % was observed.

Next, a soft pneumatic actuator was designed, and its CAD model was used to simulate the actuator's response to a pressure input using finite element analysis. The meshing of the model in these simulations was validated with mesh quality metrics. As a result, total deformation and maximum equivalent Von Mises stress diagrams were obtained versus the internal pressure of the actuator.

Subsequently, a mold was designed for the physical implementation of the soft pneumatic actuator, applying design considerations and digital manufacturing techniques. The result was a 3D-printed mold capable of consistently producing functional soft pneumatic actuators, which were tested as soft grippers for holding various objects with irregular shapes.

Then, a testing platform was implemented for a detailed characterization of the fabricated soft pneumatic actuator. This setup made it possible to obtain experimental displacement and force histograms versus the actuator's internal pressure. These results were used to validate the previously conducted simulations.

Finally, user manuals were drafted for the testing machine and the testing platform. The user manuals were shared with mechatronics engineering students to verify that they were sufficiently descriptive for new users to operate these devices effectively.

La robótica blanda es un campo emergente en la ingeniería que se centra en el desarrollo de sistemas robóticos flexibles, capaces de adaptarse a su entorno y manipular objetos frágiles o irregulares con facilidad. Debido a que los robots blandos utilizan materiales flexibles, estos son capaces de alcanzar altas deformaciones, absorber impactos y realizar tareas de manipulación con mayor versatilidad que los robots rígidos típicos.

Sin embargo, la caracterización de estos actuadores plantea desafíos únicos, debido a la naturaleza no lineal y altamente deformable de los materiales implicados. Es por ello que este trabajo de graduación busca desarrollar y validar herramientas y técnicas para la caracterización y puesta a prueba de actuadores neumáticos blandos, con el propósito de establecer una base sólida para la investigación de este campo en la Universidad del Valle de Guatemala.

Para alcanzar este objetivo, se desarrolló una máquina de ensayos a tensión diseñada específicamente para caracterizar el elastómero Ecoflex 00-30, el cual es muy utilizado en la elaboración de actuadores neumáticos blandos. Con la implementación de esta máquina, se buscó obtener diagramas esfuerzo-deformación, los cuales son fundamentales para entender el comportamiento mecánico de este material.

Asimismo, se llevó a cabo la simulación de un actuador neumático blando con canales rectos, utilizando un modelo de hiperelasticidad para predecir su respuesta ante una entrada de presión constante. A partir de los resultados obtenidos en estas simulaciones, se fabricó un actuador neumático blando, el cual fue sometido a pruebas de funcionamiento preliminares al sujetar diferentes objetos. Para finalizar, se diseñó e implementó una plataforma de pruebas, que permitió la caracterización y análisis detallado del actuador en condiciones reales de funcionamiento.

Finalmente, se elaboraron manuales de usuario tanto para la máquina de ensayos como para la plataforma de pruebas. Estos manuales tienen como objetivo facilitar el mantenimiento y el uso de las herramientas desarrolladas, asegurando que futuros investigadores puedan beneficiarse de los procedimientos y metodologías descritas.

En conjunto, el presente trabajo busca contribuir significativamente al campo de la robótica blanda en la Universidad del Valle de Guatemala, ofreciendo un enfoque práctico para la evaluación y optimización de actuadores neumáticos blandos mediante el uso de herramientas especializadas.

Metodologías de manufactura de robots blandos

Soft Robotics For Chemists

En *Soft Robotics for Chemists*, el equipo de investigación compuesto por Ilievski, Mazzeo, Shepherd, Chen y Whitesides presentó una metodología de diseño para elaborar actuadores blandos que utiliza redes neumáticas (*PneuNets*, en inglés) embebidas en elastómeros para producir un amplio rango de comportamientos al activar los actuadores mediante una única fuente de presión. Para ello, elaboraron moldes con una serie de canales y cámaras de aire haciendo uso de impresión 3D, y vertieron una silicona comercial llamada Ecoflex 00-30 en el molde para elaborar el actuador. Los investigadores notaron que al presurizar el actuador resultante, este se deformó más en las secciones de menor rigidez, por lo que aprovecharon este resultado para utilizar polydimethylsiloxano (PDMS), un elastómero más rígido, en ciertas secciones para así controlar el movimiento del actuador. Con estos resultados, los investigadores fueron capaces de producir un robot en forma de estrella de mar que podía manipular un huevo y un ratón anestesiado. Sin embargo, el equipo de investigación indicó que el actuador no era capaz de sostener objetos mucho más pesados, y que era susceptible a deformaciones permanentes tras una poca cantidad de actuaciones [1].

A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots

En *A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots*, Marchese, Katzschman y Rus buscaron comparar el desempeño de tres morfologías de robots blandos de redes neumáticas, elaborados con tres métodos de manufactura distintos. Para lograrlo, diseñaron y fabricaron robots blandos basados en tres morfologías diferenciables por la estructura de sus canales internos: acanalados, cilíndricos y plisados. A continuación, exploraron tres métodos de manufactura distintos: fundición por laminación, fundición por pines retractables y fundición por pérdida de cera. Entre los resultados más relevantes, los investigadores encontraron que el actua-

dor con la estructura de canales internos plisados producía la mayor presión interna con respecto al volumen de aire suministrado, lo que le permitió alcanzar mayores curvaturas que los otros dos tipos de actuadores. Los métodos de fundición por pines retractables y por pérdida de cera demostraron ser ventajosos ya que eliminaban la tendencia de los actuadores a romperse en las uniones donde diferentes capas de elastómeros se laminaban utilizando el método de fundición por laminación. Durante este estudio, los investigadores se limitaron a caracterizar experimentalmente los actuadores realizados, utilizando sensores de presión y de fuerza y midiendo el volumen y el grado de curvatura que los actuadores generaban [2].

The Soft Robotics Toolkit: Shared Resources for Research and Design

En *The Soft Robotics Toolkit: Shared Resources for Research and Design*, Holland, Park, Polygerinos, Bennett y Walsh presentan el desarrollo del *Soft Robotics Toolkit* (conjunto de herramientas de robótica blanda, en español), un set de recursos de código abierto que respalda el diseño, fabricación, modelado, caracterización y control de robots blandos. Los investigadores dividieron las etapas de desarrollo de robots blandos en: diseño, fabricación, caracterización, y control, y construyeron un sitio web que recopilase la información más importante de cada etapa para asistir a investigadores en la implementación de sus propios robots blandos. Inicialmente la página web fue lanzada únicamente para estudiantes de un curso de diseño mecánico en Harvard, y se iteró hasta que pudiera cumplir con las necesidades de cada uno de los estudiantes del curso. El resultado más importante fue la inclusión de diagramas de diseño de equipos que son aplicables a cualquier sistema de robótica blanda, como puede ser el equipo de control de flujo de aire. Los investigadores se limitaron a realizar una página web que recopilase investigaciones previas, y que se actualice conforme se produzcan nuevas investigaciones [3].

Caracterización, análisis y modelado de robots blandos

Soft Material Characterization for Robotic Applications

En *Soft Material Characterization for Robotic Applications*, El equipo de investigadores compuesto por Case, White y Kramer se planteó demostrar los efectos de las propiedades no lineales y dependientes del tiempo de tres elastómeros comúnmente usados en la elaboración de robots blandos: Sylgard 184 (PDMS), Smooth-sil 950 y Ecoflex 00-30. Además, buscaron evaluar cual modelo de relajación viscoelástica se ajustaba mejor al comportamiento de los elastómeros, siendo las opciones los modelos Maxwell, Zenner y Burgers. Para ello, realizaron pruebas de estiramiento al fallo, de carga cíclica y de relajación de esfuerzos en probetas realizadas de cada uno de los materiales. Con esto, los investigadores descubrieron que estos elastómeros son dependientes de la razón de deformación, que son muy sensibles a las variaciones de producción, que no presentan endurecimiento de trabajo, y que los comportamientos de relajación de esfuerzos se modelan adecuadamente con el modelo Burgers, aunque este resultado no es cierto para el EcoFlex 00-30. Los investigadores dejaron fuera de su alcance caracterizar y modelar rigurosamente estos elastómeros más allá de las pruebas de tensión realizadas. [4].

Modeling, Design, and Development of Soft Pneumatic Actuators with Finite Element Method

En *Modeling, Design, and Development of Soft Pneumatic Actuators with Finite Element Method*, Moseley, Florez, Sonar, Agarwal, Curtin y Paik buscaron proporcionar procedimientos generales para modelar actuadores neumáticos blandos (SPA, por sus siglas en inglés) y validarlos frente a prototipos experimentales, además de diseñar una herramienta de código abierto que guíe al usuario a través de los procedimientos anteriormente mencionados. Para lograrlo, tomaron el material Ecoflex 00-30 como base para sus pruebas, y decidieron caracterizarlo utilizando el modelo de hiperelasticidad de Ogden, en donde los parámetros de ajuste fueron obtenidos luego de realizar ensayos de tensión uniaxial y cortante puro (ejecutado indirectamente través del ensayo de tensión planar). Así mismo, llevaron a cabo un ensayo de relajación para obtener una aproximación de las propiedades viscoelásticas del material. Luego, utilizaron el software Abaqus para simular la respuesta dos tipos diferentes de actuadores neumáticos blandos bajo diferentes condiciones de carga cuasiestática, siendo de principal interés las pruebas de desplazamiento y de fuerzas de contacto. Finalmente, los investigadores automatizaron la ejecución de estos procedimientos codificando diferentes módulos de Python [5].

Entre los resultados más importantes, los investigadores encontraron que los resultados de las simulaciones de los actuadores neumáticos blandos son consistentes con los resultados experimentales bajo diferentes condiciones de presión interna en los actuadores. Gracias a esto, pudieron implementar actuadores neumáticos blandos en un guante de rehabilitación y en el exoesqueleto blando de un roedor. A su vez, lograron implementar una herramienta de código abierto que facilita el diseño de actuadores neumáticos blandos. Los autores se limitaron a analizar solo dos tipos de actuadores neumáticos blandos (lineales y flexibles) utilizando la herramienta de análisis de elementos finitos Abaqus para las simulaciones [5].

SPADA: A Toolbox of Designing Soft Pneumatic Actuators for Shape Matching Based on Surrogate Modeling

En *SPADA: A Toolbox of Designing Soft Pneumatic Actuators for Shape Matching Based on Surrogate Modeling*, Yao, He y Miaolino diseñaron e implementaron el conjunto de herramientas de Matlab SPADA (*Soft Pneumatic Actuator Design framework*), el cual posee un modelo cinemático de un actuador blando modular personalizable, métodos de elementos finitos (MEF) para simulaciones, y un algoritmo que define las cualidades óptimas del actuador para ajustarse a una curva paramétrica dada. El modelo cinemático del actuador fue diseñado mediante un modelo sustituto basado en data recolectada mediante MEF y entrenamientos de redes neuronales artificiales. Con esto, los investigadores fueron capaces de obtener un actuador que emula el comportamiento de una trompa de elefante, al modelarla mediante una curva paramétrica, y de obtener actuadores que al activarse, adoptan las formas de distintas letras. Esta investigación se limitó a diseñar un conjunto de herramientas funcional para actuadores blandos de fuelle, por lo que no es capaz de simular el comportamiento de otro tipo de actuadores [6].

Aplicaciones de la robótica blanda

Design, Fabrication and Performance Test of a New Type of Soft-Robotic Gripper for Grasping

En *Design, Fabrication and Performance Test of a New Type of Soft-Robotic Gripper for Grasping*, Zhang, Liu, Yu y Hou diseñaron, fabricaron y probaron un actuador neumático blando utilizado para elaborar una pinza robótica. El objetivo de esta pinza fue mejorar el desempeño del modelo de pinza neumática convencional construida mediante actuadores neumáticos blandos. Los investigadores realizaron análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés) para verificar las condiciones de esfuerzos que afectarían al actuador, y realizaron simulaciones para obtener la fuerza de agarre teórica de las pinzas, para posteriormente construirlas utilizando elastómeros e impresión 3D. Los resultados de las pruebas físicas demostraron que las pinzas poseían gran fiabilidad y estabilidad agarrando objetos pesados de forma irregular. Los autores se limitaron a recabar datos de este modelo de pinza propuesto, dejando posibles aplicaciones para una investigación futura [7].

Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs

En *Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs*, Galloway, Becker, Phillips, Kirby, Licht, Tchernov, Wood y Gruber diseñaron un manipulador hidráulico blando funcional debajo del agua, que era capaz de manipular y muestrear especímenes frágiles de un arrecife profundo. Para ello, construyeron un sistema hidráulico y probaron dos diseños para el manipulador hidráulico: uno que utilizaba actuadores blandos tipo boa, y otro que utilizaba actuadores blandos de fuelle. Con estos manipuladores, fueron capaces de recolectar un coral *Dendronephthya* y un coral *Alcyonacean* a una profundidad de 100 m, sin que ninguno de los dos corales fuera dañado por el actuador. La investigación se limitó a probar el manipulador en profundidades de entre 100 a 170 metros [8].

Integrating Soft Robotics with the Robot Operating System: A Hybrid Pick and Place Arm

En *Integrating Soft Robotics with the Robot Operating System: A Hybrid Pick and Place Arm*, McKenzie, Barranclough y Stokes detallan el diseño, la fabricación y la validación de un marco de trabajo de código abierto construido con el sistema operativo robótico (ROS, por sus siglas en inglés), el cual utilizaron para implementar un robot híbrido (tanto blando como rígido) modular capaz de completar tareas de recolección y colocación. Para lograrlo, los investigadores diseñaron un sistema de control utilizando ROS, un brazo robótico de juntas rígidas, y un manipulador blando utilizando elastómeros. Así, los investigadores lograron construir un brazo robótico lo suficientemente preciso para proveer una plataforma para el manipulador blando, y demostraron que era capaz de recoger objetos frágiles, como un tomate. Los investigadores se limitaron a desarrollar el marco de trabajo utilizando ROS, por lo que la integración con otras plataformas se deja a una investigación futura [9].

Desde su origen como disciplina, la robótica se ha enfocado en construir máquinas programables que sean capaces de llevar a cabo tareas en entornos que no son aptos para los seres humanos, ya sea porque son peligrosos, difíciles de acceder, o porque requieran llevar a cabo tareas demasiado monótonas, repetitivas o aburridas que, de ser realizadas por un ser humano, terminarían afectando negativamente su calidad de vida [10].

Debido a la naturaleza de las tareas que los robots convencionales deben realizar, normalmente están contruidos de materiales rígidos, como acero, aluminio o plástico ABS. Si bien muchos de estos robots son capaces de alcanzar altos niveles de precisión, fuerza y velocidad, muy pocos de ellos pueden operar con seguridad en entornos naturales o en proximidad a humanos u otros seres vivos [11].

Este hecho ha dificultado la expansión de la robótica hacia aplicaciones relacionadas con la asistencia médica, el diseño y manufactura de prótesis, la cooperación entre máquinas y humanos, la exploración de campo, los dispositivos vestibles, y la manipulación de alimentos, hortalizas, y seres vivos.

La necesidad de superar estas dificultades ha abierto las puertas a nuevas formas de hacer robótica. Una posible solución es la robótica blanda, una subrama de la robótica que se enfoca en el uso de materiales elásticos, flexibles y con una rigidez similar a la de los tejidos orgánicos, de tal forma que los robots blandos puedan ser utilizados en aplicaciones como las descritas anteriormente.

Sin embargo, aún no se ha llegado a una estandarización sobre las herramientas, técnicas y metodologías óptimas para fabricar y estudiar a los robots blandos. A diferencia de los robots convencionales, el carácter no rígido y el comportamiento no lineal de los robots blandos dificultan su adopción en investigaciones de pregrado.

Como área de investigación académica, la robótica blanda es altamente multidisciplinaria. Los retos que supone requieren conocimiento de campos como la mecánica, electrónica, ciencias de la computación, ciencias de los materiales, física aplicada, química, entre otros

[12]. Además, su facilidad de manufactura, reducido peso, relativo bajo costo, y la oportunidad de producir movimientos más complejos en comparación con robots convencionales convierte a los robots blandos en alternativas valiosas que permitan crear nuevas tecnologías y soluciones a diferentes problemas de ingeniería.

Por ello, en el presente trabajo, se busca implementar herramientas, como una máquina de ensayos a tensión y una plataforma de pruebas, que permitan modelar y caracterizar actuadores neumáticos blandos, y que puedan ser utilizadas por otros investigadores, estudiantes, y catedráticos de la Universidad del Valle de Guatemala que deseen aprovechar la robótica blanda en sus propios proyectos y en la creación de nuevas líneas de investigación.

Por último, los resultados del presente trabajo pretenden iniciar la investigación de robótica blanda en Guatemala, lo que facilitará el desarrollo de nuevas plataformas robóticas, e inspirará futuras investigaciones biomédicas, nueva tecnología biomimética, y la aplicación de teoría matemática y física que no había podido ser aplicada en el pasado.

4.1. Objetivo general

Implementar herramientas para la caracterización y puesta a prueba de actuadores neumáticos blandos.

4.2. Objetivos específicos

- Implementar una máquina de ensayos de tensión que permita obtener diagramas de esfuerzo - deformación de elastómeros utilizados en actuadores neumáticos de robótica blanda.
- Simular un actuador neumático blando de canales rectos utilizando modelos de hiperelasticidad
- Fabricar un actuador neumático blando de canales rectos.
- Implementar una plataforma de pruebas que permita caracterizar actuadores neumáticos blandos.
- Redactar manuales de uso para la máquina de ensayos de tensión y la plataforma de pruebas.

Este proyecto representa el inicio de una nueva línea de investigación en la Universidad del Valle de Guatemala, la cual busca asistir en la investigación de robótica blanda. Considerando esto, el presente trabajo se enfocó únicamente en el desarrollo de las herramientas básicas necesarias para estudiar esta rama, por lo que no se buscó formular aplicaciones prácticas durante esta etapa.

Se buscó que todas las herramientas implementadas pudieran fabricarse utilizando software, componentes y materiales disponibles localmente. Aunque esto limitó el rendimiento de ciertas herramientas, permitió explorar diferentes alternativas y sentar un precedente a partir del cual las herramientas implementadas puedan actualizarse y mejorarse.

La máquina de ensayos implementada se diseñó para realizar únicamente ensayos a tensión semiautomáticos de la silicona Ecoflex 00-30. Ya que el objetivo de ese trabajo de graduación se centra en la investigación de robótica blanda, no se incluyó la adición de un extensómetro para la medición de deformación en la máquina de ensayos.

Las simulaciones realizadas se hicieron únicamente bajo condiciones estáticas, y el modelo utilizado para la simulación fue una versión simplificada del real para facilitar la convergencia a un resultado. En el presente trabajo de investigación, las simulaciones realizadas se realizaron aislando el actuador neumático blando del entorno, y no se consideró su montaje o interacción con otras piezas.

Durante esta investigación se fabricó un solo tipo de actuador neumático blando, el cual fue utilizado principalmente para validar el funcionamiento de las herramientas implementadas. Por ello, no se buscó optimizar el actuador neumático blando para una aplicación particular.

La plataforma de pruebas implementada se diseñó para llevar a cabo análisis de desplazamiento y fuerza del actuador. El diseño de la plataforma de pruebas permite la expansión de sus funcionalidades en investigaciones futuras, como la adición de análisis de fatiga, de condiciones de fallo, entre otros.

6.1. Robótica blanda

Los robots blandos pueden definirse formalmente como cualquier robot que posea un cuerpo flexible y suave, y que utilice estas características físicas para adaptarse a su entorno o a los objetos que lo rodean. Cualquier robot blando requiere un sistema de actuación que permita concebir fuerzas y generar movimiento en el robot, el cual depende de las señales recibidas por un sistema de control [13].

Existen dos tipos de sistemas de actuación para robots blandos: los sistemas de actuación por impedancia variable y los sistemas de actuación por rigidez variable (VIA y VSA por sus siglas en inglés, respectivamente). Los sistemas de actuación por impedancia variable poseen juntas conectadas por eslabones rígidos, hechos de metal o plástico, en donde un sistema de control permite regular la impedancia mecánica de las articulaciones y así, ajustar la rigidez y el nivel de amortiguación frente a colisiones del robot blando al interactuar con diferentes situaciones y tareas [14].

En los sistemas de actuación por rigidez variable, la estructura de las articulaciones es de carácter elástico, y usualmente está hecha de materiales como hules, esponjas, geles, o elastómeros. En estos sistemas, la elasticidad de las articulaciones es controlada al cambiar su presión interna, lo que puede producir movimientos de expansión, estiramiento y flexión en los actuadores, dependiendo de la morfología de las membranas de las articulaciones y de las restricciones de estiramiento que posean [13].

Los actuadores blandos de redes neumáticas (*pneuNet actuators*, en inglés) son una clase de actuadores por rigidez variable. La estructura interior de estos actuadores está conformada por múltiples cámaras unidas por uno o más canales. Al incrementar la presión interna de las cámaras utilizando un medio neumático o hidráulico, las cámaras se expanden, resultando en una deformación flexional del actuador, como puede observarse en la Figura 1 [13].

La estructura de los actuadores blandos de redes neumáticas permite a los robots blandos



Figura 1: Actuador blando con redes neumáticas completamente accionado [15]

generar movimientos sofisticados, como apretar, caminar, gatear, y manipular objetos con geometrías irregulares. Por ello, este tipo de actuadores es de los más investigados en la rama de la robótica blanda [14].

6.2. Estructura y diseño de un actuador blando con redes neumáticas

Comúnmente, los actuadores blandos con redes neumáticas poseen una capa expansible con un arreglo de canales y cámaras en su interior, una capa inextensible y una entrada de presión neumática, como puede verse en la Figura 2 [16].

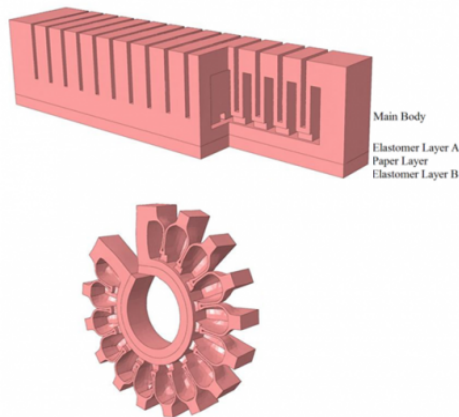


Figura 2: Interior de un actuador blando con redes neumáticas [17]

La capa expansible se deforma y genera un movimiento en el actuador al recibir un incremento de presión en su interior. La naturaleza del movimiento que realice depende de la geometría y el grosor de las paredes de sus cámaras interiores, en donde las geometrías más comunes incluyen: cámaras rectas, cámaras oblicuas y cámaras oblicuas dobles.

Los actuadores blandos que poseen cámaras rectas reproducen una flexión bidimensional al ser actuados, como en la Figura 1. Mediante análisis de elementos finitos y experimentos empíricos, se sabe que entre más delgadas sean las paredes de las cámaras de este tipo de actuador, la fuerza de salida aumentará, y la presión necesaria para alcanzar la máxima flexión se reducirá. Además, aumentar la altura de las cámaras aumenta la fuerza producida, pero no afecta la trayectoria de la punta del actuador [18].

Los actuadores blandos con cámaras oblicuas son capaces de reproducir flexión helicoidal, lo que les permite generar una trayectoria de movimiento tridimensional. En este tipo de actuadores, el grado de enroscamiento incrementa conforme el ángulo de las cámaras aumenta. Esta característica helicoidal de los actuadores permite lograr sujeciones más estables que con los actuadores de cámaras rectas, principalmente porque el área de contacto con el objeto a sujetar aumenta [19].

Los actuadores blandos con cámaras oblicuas dobles son capaces de reproducir el mismo movimiento helicoidal que los actuadores blandos con cámaras oblicuas, con la diferencia de que ahora puede controlarse la dirección en donde se producirá la hélice. Esto se logra al incorporar dos canales independientes en el actuador, cada uno de los cuales dirige el fluido presurizado hacia una serie de canales oblicuos cuya geometría es simétrica con respecto a un plano imaginario que corta al actuador axialmente, tal y como se observa en la Figura 3 [20].

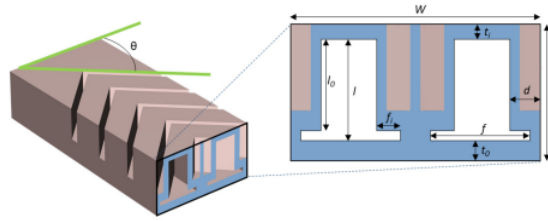


Figura 3: Sección de un actuador blando con cámaras oblicuas dobles [20]

La finalidad de la capa inextensible en el actuador blando es restringir la expansión axial al ser presurizado. Esto se logra gracias a que el material que compone a la capa inextensible es usualmente más rígido que el material que compone la capa expansible, lo que significa que tiene mayor resistencia a la deformación al ser aplicada una fuerza externa. El objetivo de restringir la expansión axial del actuador es ocasionar un movimiento de flexión, el cual es más práctico para distintas aplicaciones [16].

6.3. Ecoflex 00-30

El Ecoflex 00-30 es una silicona catalizada por platino fabricada por la empresa estadounidense Smooth-On. Posee una certificación de seguridad para el contacto directo con la piel, y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, entre las cuales se incluye la fabricación de aparatos prostéticos, amortiguación para aparatos ortopédicos y aplicaciones de efectos especiales [21]. En el Cuadro 1, se presentan los datos técnicos más importantes del Ecoflex 00-30.

Cuadro 1: Datos técnicos del Ecoflex 00-30 [21]

Tipo de silicona	Catalizada por platino
Tiempo de curado	4 horas
Dureza Shore A	00-30
Color	Translucido
Esfuerzo último de tensión	200 psi
Porcentaje de elongación a la ruptura	900 %
Volumen específico	26 in/lb
Temperatura de trabajo mínima	-65 °F
Temperatura de trabajo máxima	450 °F

Debido a su baja dureza Shore A y alto porcentaje de elongación a la ruptura, el Ecoflex 00-30 es un materiales comúnmente en la investigación de actuadores blandos con redes neumáticas para conformar la capa expansible del actuador [16].

6.4. Litografía blanda

La litografía blanda fue originalmente propuesta para la fabricación de micro y nanoestructuras en 1998. En ese entonces, una estampa elastomérica con patrones estructurales en su superficie era utilizada para generar ciertas estructuras en un material polimérico, como se observa en la Figura 4. El desarrollo de la impresión 3D y los avances en los procesos de manufactura aditiva han permitido implementar la litografía blanda en la creación de macroestructuras, convirtiéndola en una técnica representativa para la fabricación de robots blandos [14].

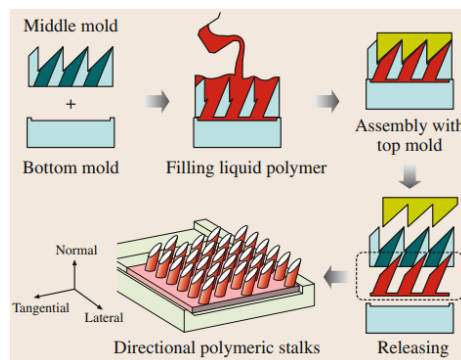


Figura 4: Proceso de manufactura de una estructura polimérica mediante litografía blanda [14]

Actualmente, la litografía blanda consiste en la fabricación de moldes mediante impresión 3D, haciendo uso de materiales como PLA o resina. Cada uno de estos moldes poseen un segmento de la configuración de la estructura, por lo que se vierte en ellos las siliconas de los materiales deseados para el actuador blando. Una vez curadas las siliconas, se extraen de sus respectivos moldes, y se unen aplicando una ligera capa de silicona sin curar [14]. En la Figura 5, se ejemplifica este proceso de manufactura.

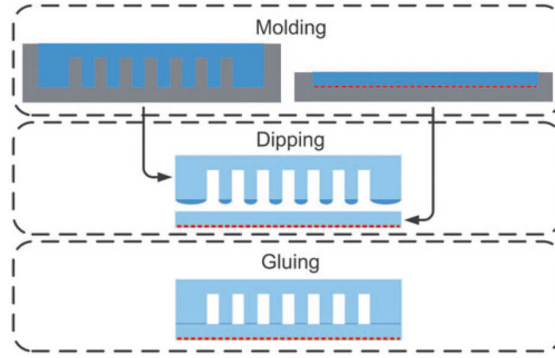


Figura 5: Proceso de manufactura de un actuador blando utilizando litografía blanda [16]

6.5. Modelado de materiales hiperelásticos

La investigación enfocada en actuadores blandos se relaciona estrechamente con los campos de la mecánica, la electrónica, la química, y la biología, por lo que los principales métodos de modelado pueden categorizarse en tres tipos: métodos empíricos, métodos matemáticos y métodos de elementos finitos. Los métodos empíricos están basados principalmente en resultados experimentales, y los métodos matemáticos permiten predecir con fidelidad el comportamiento del sistema, lo que a su vez permite desarrollar técnicas de control y de diseño óptimas y exactas [13].

Sin embargo, los métodos matemáticos actuales solo pueden ser aplicados cuando el actuador blando es simple (posee menos de 3 cámaras), posee un comportamiento lineal, y no se somete a grandes deformaciones [13]. Los materiales que usualmente constituyen un actuador blando, como el Ecoflex 00-30 o el Smooth-Sil 950, son elastómeros incompresibles que presentan una alta deformación elástica antes de fallar, y poseen una respuesta no lineal en su diagrama de esfuerzo - deformación [22]. Esto ocasiona que, para actuadores blandos complejos, sea necesario implementar un modelo de material hiperelástico en un análisis de elementos finitos para simular adecuadamente el comportamiento del actuador blando al ser presurizado [13].

6.5.1. Modelos de materiales hiperelásticos

Dos de las características clave de los materiales hiperelásticos son que presentan una alta deformación elástica antes de llegar a presentar deformaciones permanentes, y que todo el trabajo realizado durante su deformación se almacena como energía interna, la cual puede recuperarse completamente durante la descarga de esfuerzos del material [22].

El área debajo de la curva de esfuerzo - deformación representa la energía interna almacenada en el material, y permanece constante siempre y cuando la deformación en el material permanezca constante. Por esta razón, la función de densidad de energía de deformación es ideal para modelar matemáticamente a los materiales hiperelásticos. Esta función de energía se define usualmente en función del tensor de deformación del material, como se observa en la Ecuación 1.

$$\Psi = f(\epsilon) \quad (1)$$

Con esta ecuación, es posible calcular los esfuerzos en el material producidos por una deformación dada. Comúnmente, esta función de energía se divide en sus componentes desviadoras y volumétricas, como se observa en la Ecuación 2 [22].

$$\Psi = \Psi_{dev} + \Psi_{vol} \quad (2)$$

En los materiales hiperelásticos, el tipo de deformación al cual se somete el cuerpo del material desarrolla diferentes magnitudes de esfuerzos. Un material hiperelástico puede experimentar tres modos de deformación diferentes que caracterizan a su componente desviadora: deformación por tensión uniaxial, deformación por compresión uniaxial y deformación por cortante. Existen dos métodos para diferenciar el modo de deformación al cual está sometido el material: utilizando las deformaciones principales y utilizando invariantes de deformación [22].

La razón entre el largo final de un material hiperelástico que ha sido deformado y su largo inicial, en cada una de las tres direcciones principales, se conocen como las deformaciones principales, como se observa en la Ecuación 3. Asumiendo que es incompresible, un material hiperelástico estirado en una dirección, se encogerá en las otras dos direcciones para conservar su volumen [22].

$$\begin{aligned} \lambda_x &= l_x/L_x \\ \lambda_y &= l_y/L_y \\ \lambda_z &= l_z/L_z \end{aligned} \quad (3)$$

Una componente del tensor de deformación mayor que la unidad representa una tensión en esa dirección, mientras que una componente del tensor de deformación menor que la unidad representa una compresión en esa dirección.

Las invariantes de deformación no varían cuando el sistema de coordenadas de referencia a partir del cual se miden las deformaciones cambia, por lo que permanecen constantes cuando el material sufre deformaciones por tensión, compresión, cortante o esfuerzos combinados. Las invariantes de deformación se definen en la Ecuación 4 [22].

$$\begin{aligned} I_1 &= tr(\epsilon) \\ I_2 &= \frac{1}{2}(tr(\epsilon^2) - [tr(\epsilon)]^2) \\ I_3 &= det(\epsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

De esta forma, la función de densidad de energía de deformación también suele definirse en función de las deformaciones principales, o de las invariantes de deformación, como se presenta en la Ecuación 5 [22].

$$\begin{aligned}\Psi &= f(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z) \\ \Psi &= f(I_1, I_2, I_3)\end{aligned}\tag{5}$$

Existen diferentes modelos de materiales hiperelásticos que utilizan la definición de la función de densidad de energía de deformación dada en la ecuación 5. El más simple de ellos se conoce como el modelo Neo-Hooke, descrito en la Ecuación 6 [22].

$$\Psi = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) + 1/d(J - 1)^2\tag{6}$$

En donde μ es el módulo de corte y $d = \frac{2}{K_0}$, siendo K_0 el módulo volumétrico inicial. Estos parámetros del material, de la misma forma que los parámetros en los siguientes modelos, se obtienen al realizar una regresión no lineal de los diagramas de esfuerzo - deformación obtenidos al realizar ensayos de tensión, compresión y corte puro del material a modelar [22].

El modelo de Mooney Rivlin es capaz de modelar comportamientos de materiales con un mayor grado de no linealidad. Esto gracias a que utiliza más invariantes de deformación y parámetros para ajustarse al comportamiento real del material. Este modelo se describe en la Ecuación 7 [22].

$$\Psi = C_{10}(I_3 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + 1/d(J - 1)^2\tag{7}$$

En donde $\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01})$ y $K_0 = 2/d$.

Por último, el modelo de Ogden es otro de los modelos hiperelásticos más utilizados, y se define en función de las deformaciones principales. Tanto su componente volumétrica como desviadora pueden poseer múltiples términos, donde cada componente volumétrica posee un parámetro del material y cada componente desviadora posee dos parámetros. La ecuación que define al modelo de Ogden se describe en la Ecuación 8 [22].

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_x^{\alpha_i} + \lambda_y^{\alpha_i} + \lambda_z^{\alpha_i} - 3) + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}\tag{8}$$

En donde $\mu_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu_i$ y $K_0 = \sum_{k=1}^N \frac{2}{d_k}$. En este modelo, α es una constante de no linealidad adimensional.

Los modelos de Mooney Rivlin y de Ogden pueden poseer múltiples términos. Cada uno de estos términos representa una respuesta o componente no lineal del material, por lo que su superposición permite capturar y modelar mejor su comportamiento completo [22].

6.6. El método de elementos finitos

El método de elementos finitos es una técnica numérica utilizada para resolver problemas que están descritos por ecuaciones diferenciales parciales. En este método, se escoge un dominio de interés continuo del sistema, y se discretiza en una malla de elementos finitos durante una etapa de preprocesamiento. A continuación, se definen las condiciones de frontera en cada una de las mallas. Esta discretización del sistema permite obtener un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, las cuales pueden resolverse durante la etapa de cálculo. Como último paso, es posible obtener variables derivadas de las obtenidas en la resolución del sistema de ecuaciones global, durante la etapa de postprocesado [23].

6.7. Ensayos de tensión

Los ensayos de tensión se realizan por diferentes motivos, siendo los más importantes, encontrar la resistencia de un material, hallar su capacidad de elongación, y obtener demás datos físicos que permitan llevar a cabo una comparación entre diferentes materiales para seleccionar el más adecuado según la aplicación. Además de esto, los ensayos de tensión permiten caracterizar un material, con lo cual es posible predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga, además de la tensión uniaxial [24].

Las máquinas utilizadas para realizar ensayos a tensión pueden ser hidráulicas o electromecánicas, siendo la principal diferencia el método con el que la carga es aplicada. Las máquinas hidráulicas funcionan utilizando uno o dos pistones de acción doble que pueden desplazar la pinza móvil hacia arriba o hacia abajo. En las máquinas electromecánicas, se utiliza un motor de velocidad variable y uno o más tornillos de potencia que desplazan la pinza móvil hacia arriba o hacia abajo [24].

En el caso de un tornillo de potencia con rosca trapezoidal, el torque requerido para elevar una carga de magnitud F se presenta en la Ecuación 9.

$$T_R = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \pi\mu_t d_m \sec\alpha}{\pi d_m - \mu_t l \sec\alpha} \right) + \frac{F\mu_c d_c}{2} \quad (9)$$

En donde F es la carga, d_m es el diámetro medio del tornillo, d_c es el diámetro medio del collarín, l es el avance del tornillo, μ_t es el coeficiente de fricción entre el tornillo y la tuerca, μ_c es el coeficiente de fricción entre el collarín y el elemento estacionario, y α es el ángulo de la rosca [25].

6.7.1. Ensayos de tensión pura

Un ensayo de tensión pura implica someter una probeta a una fuerza axial creciente hasta un punto de interés, registrando la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante. La ecuación básica que describe este comportamiento es:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

donde σ es el esfuerzo (en Pa), F es la fuerza aplicada (en N) y A es el área de la sección transversal inicial de la probeta (en m²). Este modelo asume que el material es homogéneo e isotrópico, y que la deformación es uniforme a lo largo de la probeta [25].

Para estandarizar estos ensayos en elastómeros, se utiliza la norma ASTM D412, titulada *Métodos de prueba estándar para caucho vulcanizado y elastómeros termoplásticos: tensión*. Esta norma especifica procedimientos para evaluar las propiedades de tensión pura, incluyendo la preparación de las probetas, las condiciones de ensayo y los métodos de cálculo de los resultados. Específicamente, define dos métodos: el Método A, que utiliza probetas en forma de “hueso de perro“ o sección recta, y el Método B, que emplea probetas en forma de anillo. La elección del método depende de la aplicación y las características del material a ensayar [26].

Los resultados de los ensayos de tensión pura en elastómeros pueden verse significativamente influenciados por varios factores externos, que deben ser cuidadosamente controlados para obtener datos consistentes y precisos. Entre estos factores, la velocidad de aplicación de la carga juega un papel crucial, ya que los elastómeros presentan una respuesta viscoelástica, lo que significa que su rigidez y capacidad de deformación pueden variar dependiendo de la rapidez con la que se aplica la tensión [25].

Además, las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, afectan el comportamiento de los elastómeros, ya que estos materiales tienden a ser sensibles a los cambios en el entorno. A temperaturas elevadas, por ejemplo, los elastómeros pueden mostrar una mayor ductilidad y menor resistencia, mientras que a bajas temperaturas pueden volverse más rígidos y frágiles [26].

De igual forma, una alta humedad puede afectar la estructura molecular del material, alterando sus propiedades mecánicas y su resistencia al esfuerzo. Considerar estos factores es esencial para asegurar que los datos obtenidos sean representativos del comportamiento del material en condiciones reales de operación [26].

En el modelado de materiales hiperelásticos, los resultados de los ensayos a tensión son utilizados para calcular las direcciones principales o las invariantes de deformación, según el modelo que se esté utilizando [22].

6.7.2. Ensayos de tensión planar

Los ensayos de tensión planar representan un método indirecto para evaluar la respuesta al esfuerzo cortante de elastómeros. Este tipo de ensayo permite determinar el esfuerzo cortante puro mediante la aplicación de cargas axiales en una probeta cuya longitud en la dirección de estiramiento es mucho menor que en la dirección del ancho. Asumiendo que el material a ensayar es incompresible, durante el ensayo se produce un estado de cortante puro a 45° de la dirección de estiramiento [29].

Análisis de elementos finitos realizados a probetas de este tipo muestran que las probetas

deben ser por lo menos 10 veces más anchas que el largo de la dirección de estiramiento, y que los experimentos son muy sensibles a esta razón. Gracias a esta condición es posible asegurar que el esfuerzo en la dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga sea 0 en el centro de la probeta [29].

Así, en un ensayo de tensión planar, una probeta rectangular se somete a fuerzas de tracción en una dirección y , manteniendo los bordes laterales libres de carga. Esta configuración genera una condición de tensión donde se producen esfuerzos normales σ_y en la dirección de aplicación de la carga, mientras que el esfuerzo en la dirección perpendicular (σ_x) se asume como nulo. Para este ensayo, la ecuación de esfuerzo en la dirección de la carga se expresa como:

$$\sigma_y = \frac{F}{A} \quad (11)$$

donde σ_y es el esfuerzo normal en la dirección de la tracción, F es la fuerza aplicada, y A es el área de la sección transversal en la dirección perpendicular a la carga [25].

Con esto, se puede utilizar el círculo de Mohr para derivar el esfuerzo cortante. Considerando que el esfuerzo normal en la dirección perpendicular (σ_x) es cero, el esfuerzo cortante máximo τ_{xy} se da en un plano inclinado 45° respecto al eje de carga y puede calcularse como:

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_y}{2} \quad (12)$$

Como se mencionó anteriormente, este análisis es muy sensible a la razón entre el ancho y el largo de la probeta, al punto de medición utilizado para tomar las muestras, a la precisión del muestreo, a la velocidad de estiramiento de la probeta, además de factores ambientales como la temperatura y la humedad. Todo esto hace que este análisis sea difícil de llevar a cabo para la obtención de un diagrama esfuerzo - deformación válido.

Nuevamente, en el modelado de materiales hiperelásticos, los resultados de los ensayos a tensión planar son utilizados para calcular las direcciones principales o las invariantes de deformación, según el modelo que se esté utilizando [22]. En el caso de herramientas de análisis de elementos finitos como Ansys, basta con introducir los datos de esfuerzo - deformación, en donde el esfuerzo se calcula como en la Ecuación 11, para el modelado del material hiperelástico.

Diseño e implementación de una máquina de ensayos a tensión para elastómeros

El diseño y funcionamiento de un actuador neumático blando depende en gran medida de las propiedades mecánicas de los materiales que lo componen. Estos materiales, que a menudo son elastómeros, poseen un comportamiento no lineal bajo diferentes condiciones de carga, por lo que es fundamental para el diseño de actuadores neumáticos blandos caracterizarlos de manera precisa. Conocer su resistencia, capacidad de elongación, y otras propiedades críticas, es esencial para evitar fallos estructurales y mejorar el diseño de actuadores neumáticos blandos.

El uso de una máquina de ensayos es fundamental bajo este contexto, ya que facilita significativamente la caracterización de los materiales. A través de ensayos de tensión uniaxial, es posible obtener un perfil completo de cómo un elastómero se deforma, lo que representa información invaluable para posteriormente ajustar modelos hiperelásticos y realizar simulaciones precisas del comportamiento de los actuadores neumáticos blandos en aplicaciones reales.

En Guatemala, las máquinas de ensayos disponibles destinadas a materiales elastoméricos o poliméricos son de difícil acceso, por lo que el primer paso de este trabajo de graduación es diseñar e implementar una máquina de ensayos para elastómeros que devuelva datos confiables, y que pueda implementarse utilizando materiales que estén disponibles localmente.

7.1. Diseño mecánico

El punto de partida de la etapa de diseño mecánico fue seleccionar el sistema de accionamiento para la máquina de ensayos. Aunque las máquinas de ensayos hidráulicas son ampliamente utilizadas por su capacidad para generar grandes fuerzas y su control preciso,

se optó por diseñar una máquina de ensayo electromecánica haciendo uso de un motor paso a paso en su lugar. Se seleccionó este sistema ya que las máquinas de ensayos hidráulicas suelen requerir un mantenimiento más complejo y costoso, además de que necesitan componentes que no suelen ser fácilmente accesibles en el contexto local de Guatemala. Por otro lado, diseñar una máquina de ensayos electromecánica utilizando un motor paso a paso representó una solución más adecuada a la necesidad de caracterizar propiedades mecánicas de elastómeros, en donde las fuerzas requeridas no son extremadamente elevadas, además que una máquina de este tipo no requiere adquirir componentes no disponibles en Guatemala.

Acto seguido, se decidió que la máquina de ensayos consistiera de tres módulos principales: una pinza fija, una pinza móvil, y una estructura que sirviera de base para todos los componentes de la máquina de ensayos. La máquina de ensayos se diseñó siguiendo las indicaciones dadas por Davis en [24], y por el estándar ASTM D412 [26], el cual establece los procedimientos usados para evaluar ensayos a tensión en polímeros y elastómeros.

El modo de funcionamiento de la máquina de ensayos se inspiró en el de algunas impresoras 3D, como la impresora MK4S de Prusa que se puede observar en la Figura 6, en donde un carro puede desplazarse axialmente gracias a estar acoplado a una varilla roscada unida a un motor paso a paso, utilizando ejes guía como soporte estructural.



Figura 6: Impresora 3D MK4S de Prusa [27]

La máquina de ensayos se diseñó principalmente para ensayar probetas de Ecoflex 00-30, sin llevarlas a la ruptura, ya que el objetivo de los ensayos es caracterizar la respuesta del material bajo diferentes condiciones de carga, en vez de encontrar su esfuerzo último a la tensión. La decisión de utilizar Ecoflex 00-30 radicó en su amplio uso en la fabricación de actuadores neumáticos blandos, y su disponibilidad local en Guatemala.

A continuación, se detalla como se seleccionaron los componentes de cada módulo para dar lugar a la primera iteración de esta máquina de ensayos.

7.1.1. Primera iteración

El primer módulo diseñado durante esta iteración fue el módulo de estructura y ejes. Se diseñó este módulo para que sirviera de soporte para el módulo de pinza fija, el módulo de pinza móvil, y los circuitos electrónicos de la máquina. En la Figura 7, se presenta el resultado final del diseño de este módulo. A continuación, se detalla el proceso seguido para seleccionar los componentes que lo conforman.



Figura 7: Isométrico del diseño final del módulo de estructura y ejes de la máquina de ensayos

El primer componente seleccionado para este módulo fue la varilla roscada que se acoplaría al motor paso a paso, funcionando como un tornillo de potencia. El único criterio para su selección fue su longitud, ya que esto determinará la carrera total disponible para la pinza móvil.

El estándar ASTM D412 indica que cualquier máquina de ensayos debe ser capaz de finalizar la prueba con una carrera de por lo menos 750 mm, sin embargo, en [4] los autores llevaron a la ruptura una probeta de Ecoflex 00-30 con una separación final entre pinzas de aproximadamente 476 mm, mientras que en [5], los autores lograron caracterizar adecuadamente el material tras realizar ensayos con una separación final entre pinzas de 400 mm,

por lo que se decidió adquirir una varilla roscada con largo de 500 mm para la máquina de ensayos, considerando el hecho que no sería necesario que la máquina abarque una carrera de 750 mm para el material con el cual se realizaran los ensayos. Los datos técnicos de la varilla seleccionada se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Datos técnicos de la varilla roscada seleccionada

Variable	Magnitud
Diámetro mayor d (mm)	8
Diámetro menor d_r (mm)	6
Diámetro medio d_m (mm)	7
Paso (mm)	2
Avance l (mm/rev)	2
Ángulo de avance λ (grados)	5.20
Ángulo de la rosca α (grados)	15
Coefficiente de fricción estático (acero sobre bronce) μ_t	0.23

A continuación, se seleccionaron los dos ejes guía que permitirán al módulo de pinza móvil desplazarse sin rotar alrededor de la varilla roscada. El único criterio para su selección fue poseer el mismo largo que la varilla roscada, por lo que se seleccionaron 2 ejes guía de acero cementado de 500 mm de largo, con un diámetro de 8mm.

La varilla roscada que se adquirió incluía un collarín con un diámetro medio d_m de 11 mm, el cual fue utilizado para soportar el efecto de las cargas axiales en la varilla. Ya que el proveedor no lo especificó, se asumió que el material de la varilla roscada era de acero inoxidable y que el collarín era de bronce, asumiendo en consecuencia un coeficiente de fricción estático μ_t de 0.23 entre ambos materiales, como se indica en el Cuadro 2 [25].

Más adelante, se instaló la base del módulo de pinza móvil, fabricada utilizando PLA, sobre el collarín. Ya que no se conoce el coeficiente de fricción estático μ_c entre el collarín de bronce y el PLA, se utilizó el mismo coeficiente mencionado anteriormente para los cálculos posteriores.

El siguiente componente seleccionado fue el motor paso a paso. los criterios para la selección de este motor fueron que tuviera la capacidad de entregar una velocidad angular y un torque constante durante la realización de todo el ensayo.

El estándar ASTM D412 indica que la razón de separación entre pinzas debe ser de 500 \pm 50 mm/min. En el Cuadro 2, se indica que el avance de la varilla roscada es de 2 mm/rev, por lo que el motor paso a paso a seleccionar debe ser capaz de mantener 250 rpm para cumplir con el estándar, de acuerdo al resultado de la Ecuación 13:

$$\omega_m = \frac{V_p}{l} = \frac{500 \frac{mm}{min}}{2 \frac{mm}{rev}} = 250rpm \quad (13)$$

Aunque no se desea llevar las probetas a la ruptura, la fuerza F máxima que se producirá durante el ensayo se calculará utilizando el esfuerzo último de tensión del Ecoflex 00-30, el cual es de 200 psi, tal como se indica en el Cuadro 1. Asumiendo que las probetas tendrán un área transversal de 100 mm², la fuerza máxima que se producirá sobre la varilla se calcula

en la Ecuación 14:

$$F = \sigma A_t = 200psi * 100mm^2 * \frac{1MPa}{145.038psi} = 138N \quad (14)$$

Para calcular el torque requerido por el motor paso a paso, se introdujo la fuerza calculada en la Ecuación 14, y los datos presentados en el Cuadro 2, en la Ecuación 9, obteniendo como resultado un par deseado de 33.7 Ncm. En la Figura 8, se presenta un diagrama de los torques máximos que el motor paso a paso Nema 17 puede entregar en distintas velocidades de operación. En este diagrama, puede observarse que para una velocidad angular de 250 RPM, el motor Nema 17 puede entregar una torque de aproximadamente 40 Ncm. Ya que este torque es superior al torque deseado de 33.7 Ncm, se decidió utilizar este motor paso a paso para la implementación de la máquina de ensayos.

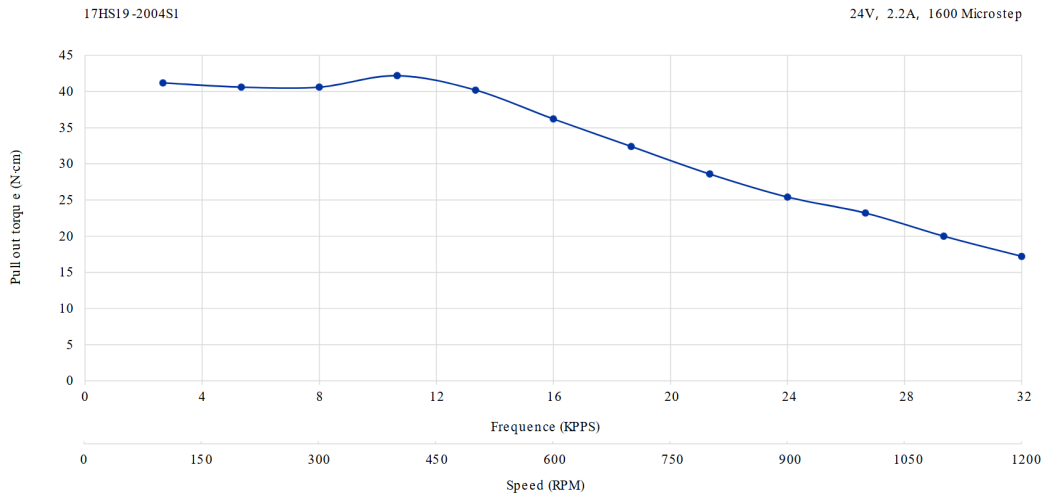


Figura 8: Diagrama de torques máximos del motor Nema 17 para determinadas velocidades de operación [28]

El motor paso a paso Nema 17 posee un eje con un diámetro de 5mm, por lo que a continuación, se escogió un acople flexible para unir la varilla roscada de 8 mm con el eje del motor de 5 mm. Luego, se escogieron perfiles 2020T para diseñar la estructura de la máquina de ensayos, debido principalmente a su geometría y a la disponibilidad de accesorios de sujeción para unir perfiles entre ellos y contra otros elementos. No se consideró necesario realizar cálculos de resistencia para estos perfiles, ya que no se someten directamente a ningún esfuerzo significativo. En la Figura 7, se observa como se utilizaron angulares internos en L para la unión entre diferentes segmentos de perfiles.

Por último, se utilizaron técnicas de fabricación digital para diseñar una base a dos piezas para el motor paso a paso, representadas en la Figura 7 como las piezas azul y gris, y dos soportes para los ejes guía del módulo de pinza móvil, representadas en la Figura como dos piezas de color amarillo. Los soportes para los ejes guía y la base del motor paso a paso están acoplados a los perfiles 2020T utilizando tuercas T deslizables M3.

Tras finalizar el diseño del módulo de estructura y ejes, se inició el diseño del módulo de pinza móvil. Durante la primera iteración, se decidió instalar la celda de carga de la máquina

de ensayos sobre este módulo. En la Figura 9, se presenta el resultado final del diseño de este módulo.

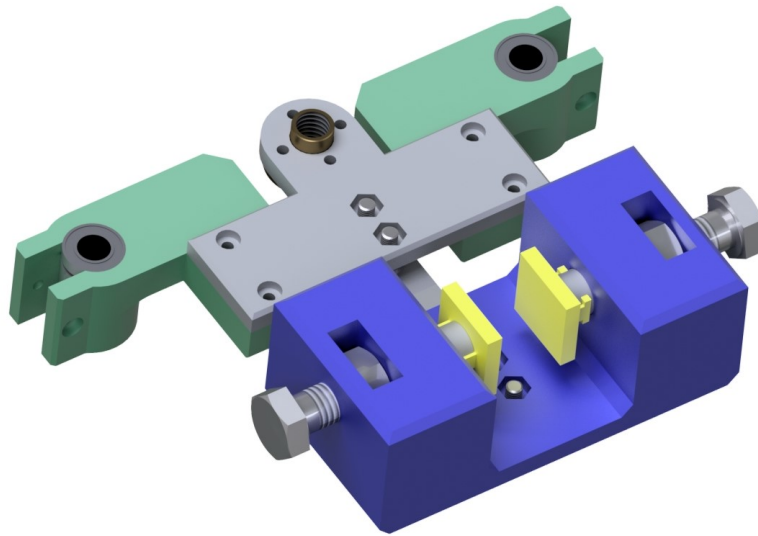


Figura 9: Isométrico del diseño final del módulo de pinza móvil de la máquina de ensayos, primera iteración

El primer componente seleccionado para este módulo fue la celda de carga. Aunque existían varias opciones disponibles localmente, se escogió una celda de carga de galgas extensiométricas en forma de barra de aluminio, considerando su bajo precio, precisión y durabilidad. La capacidad máxima de medición de la celda de carga seleccionada fue de 20 kg, lo que equivale a 196 N, lo que es superior a la fuerza máxima calculada en la Ecuación 14. Luego, se seleccionaron dos cojinetes lineales LM8UU, los cuales serán usados para unir la pinza móvil con los ejes guía produciendo la menor cantidad de fricción posible.

A continuación, se diseñó el soporte de la celda de carga, representado como una pieza color gris en la Figura 9. Esta pieza se diseñó de tal forma que pudiera acoplarse al collarín de la varilla roscada, y sirviera como punto de unión para los collares de los cojinetes, los cuales se representan como piezas verdes en esta Figura.

Los collares fueron diseñados para poder apretar a presión el cojinete en su lugar utilizando un tornillo y una tuerca, lo cual es una técnica común de fabricación digital utilizada sobretodo en el diseño de impresoras 3D.

El último componente diseñado para este módulo fue la pinza, cuya base se representa como una pieza de color azul en la Figura 9. La geometría de esta pinza se diseñó de tal forma que pudiera reutilizarse en el módulo de pinza fija. En el caso del módulo de pinza móvil, la base de la pinza se une a la celda de carga tal como se presenta en la vista lateral de la Figura 10. Esta unión permite transmitir directamente los esfuerzos que se producirán en la probeta de Ecoflex 00-30 a la celda de carga.

En la Figura 11, se presenta una vista seccionada parcialmente por el lado izquierdo de la pinza diseñada, lo que permite visualizar su mecanismo de funcionamiento. El eje de la pinza es una pieza representada en la Figura mediante el color gris, la cual puede desplazarse

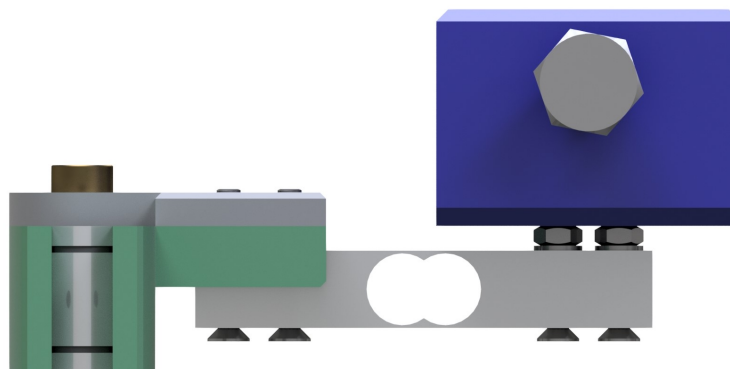


Figura 10: Vista lateral del diseño final del módulo de pinza móvil de la máquina de ensayos, primera iteración

axialmente al apretar o aflojar el tornillo al cual está unida, y que posee una cuña integrada para evitar que rote dentro de la base de la pinza.



Figura 11: Vista seccionada parcialmente de la pinza diseñada para la máquina de ensayos

El eje de la pinza posee una ranura en forma de T en un extremo, la cual es utilizada para deslizar en posición a los sujetadores de la probeta, los cuales se representan en la Figura 11 con el color amarillo. La razón detrás de esta decisión de diseño fue que permite reemplazar fácilmente los sujetadores de la probeta por otros sujetadores, además de permitir la sujeción de otros componentes, como un peso de calibración, tal y como se describirá más adelante. Tanto la base de la pinza, los ejes de la pinza y los sujetadores de la probeta se diseñaron con un ajuste de holgura de 0.2 mm, la cual es la holgura recomendada para piezas impresas en 3D que se unirán entre ellas.

Tras finalizar el diseño de la pinza móvil, se procedió con el diseño del módulo de pinza fija, cuyo resultado final se presenta en la Figura 12. La pieza de la pinza diseñada para el módulo de pinza móvil fue reutilizada en este módulo.

El soporte de la pinza fija se presenta como una pieza color gris en la Figura 12. Esta pieza se atornilla a un perfil 2020T del módulo de estructura y ejes, y se une a dos collares fijos a ambos lados, representados como piezas de color verde en la figura, los cuales mantienen los ejes guía en posición.

El soporte de la pinza fija posee un agujero que será atravesado por la varilla roscada. En este agujero no se colocó ningún rodamiento, con el fin de evitar restringir el movimiento

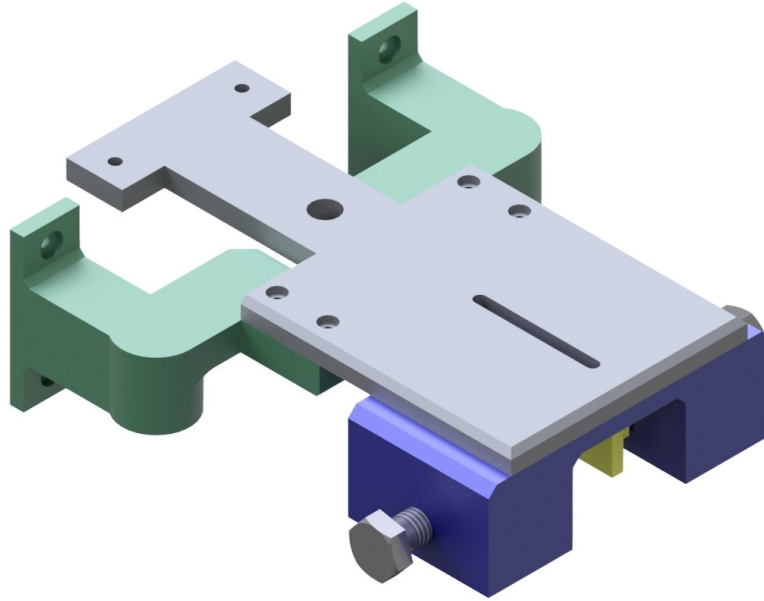


Figura 12: Isométrico del diseño final de la pinza fija, primera iteración

de la varilla roscada en caso de que se encuentre desalineada de fábrica, ya que en este caso, la restricción podría producir un pandeo en la varilla. El soporte de la pinza fija posee una ranura alargada que servirá para unir la base de la pinza, representada como la pieza azul en la Figura 12. Esta ranura se diseñó de esta manera para asegurar que tanto la pinza móvil como la pinza fija estén alineadas en el momento del ensamblaje final.

En la Figura 13 se presenta un ensamblaje general en el que se han unido los módulos de estructura y ejes, de pinza móvil, y de pinza fija.

Tras finalizar el diseño mecánico, se compraron los componentes disponibles localmente y se imprimieron el resto de piezas diseñadas con fabricación digital. Una vez reunidos todos los componentes, se procedió con el ensamblaje físico de la máquina de ensayos, el cual se realizó en el laboratorio de manufactura del D-HIVE, y tomó aproximadamente 1 hora.

En la Figura 14, se presenta el resultado del ensamblaje físico. Una vez ensamblada la máquina de ensayos, se realizaron pruebas preliminares para verificar el funcionamiento del motor paso a paso y de la celda de carga. Fue en estas pruebas preliminares que se observó que la celda de carga se descalibraba al utilizarse en conjunto con el motor paso a paso.

Esto pudo deberse a que el movimiento en los cables de la celda de carga al subir y bajar la pinza introducía ruido en las mediciones, por lo que se decidió hacer una nueva iteración en el diseño de la máquina de ensayos, en la que se intercambié la posición de la celda de carga, para ahora ubicarse en el módulo de pinza fija.

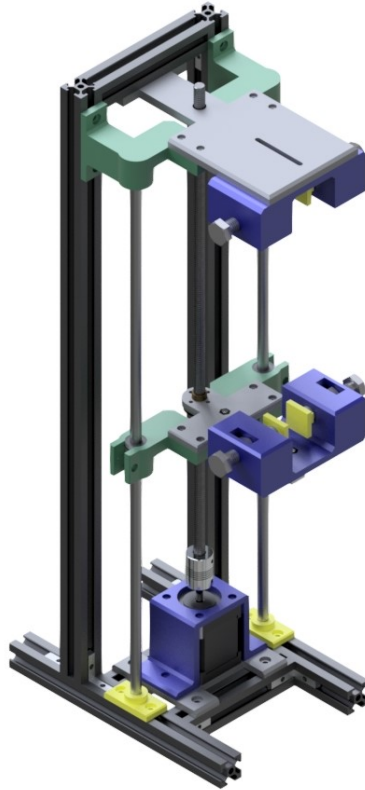


Figura 13: Ensamblaje general de la máquina de ensayos, primera iteración

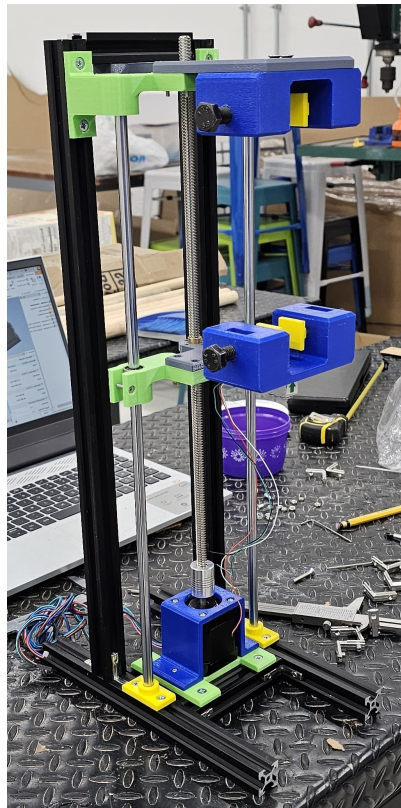


Figura 14: Implementación física de la máquina de ensayos, primera iteración

7.1.2. Segunda iteración

La segunda iteración del diseño mecánico de la máquina de ensayos inició con una modificación en el módulo de pinza móvil, en específico, a la pieza del soporte del módulo, representada con el color gris en la Figura 15. En esta figura, se aumentó la transparencia de la base de la pinza para visualizar mejor los cambios hechos a la pieza de soporte.

En la Figura 15, se puede observar que tras rediseñarlo, el soporte de la pinza de la base móvil es más largo, y posee una ranura para poder acoplar la base de la pinza. Como en el caso del soporte de la pinza fija en la primera iteración, esta ranura se diseñó de esta forma para poder alinear la pinza móvil y la pinza fija en el ensamblaje físico de la máquina de ensayos.

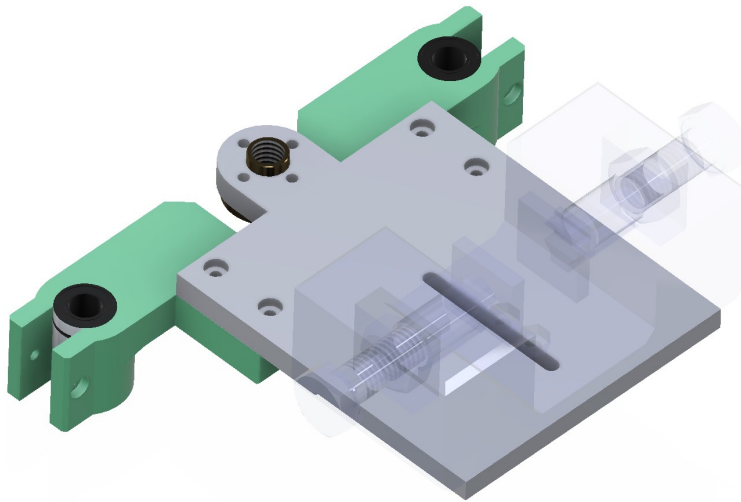


Figura 15: Isométrico del diseño final de la pinza móvil, segunda iteración

A continuación, El soporte de la pinza fija fue rediseñado para poder sujetar la celda de carga. En la Figura 16, se observa el resultado final del rediseño de esta pieza, la cual se presenta con color gris.

Una vez terminada la segunda iteración del diseño del mecanismo, las piezas modificadas fueron impresas en 3D, y la máquina de ensayos volvió a ensamblarse. El resultado final del ensamblaje físico de la máquina de ensayos puede observarse en la Figura 17. Como puede observarse en la figura, también se instalaron recuadros de lija de gramaje fino en los sujetadores de la probeta para mejorar su agarre, y se instaló una fuente de alimentación y la placa de circuito impreso sobre el módulo de estructura y ejes de la máquina de ensayos.

A continuación, se describe el proceso de diseño seguido para la elaboración de la placa de circuito impreso de la máquina de ensayos.

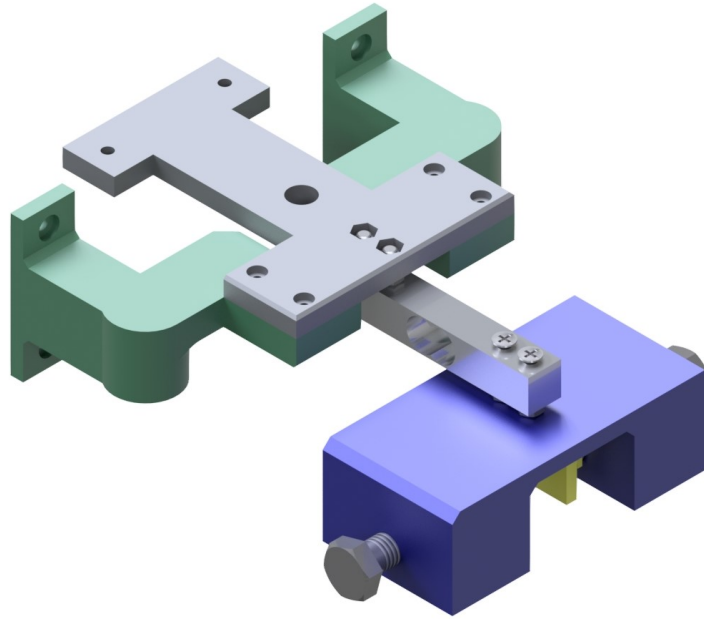


Figura 16: Isométrico del diseño final de la pinza fija, segunda iteración

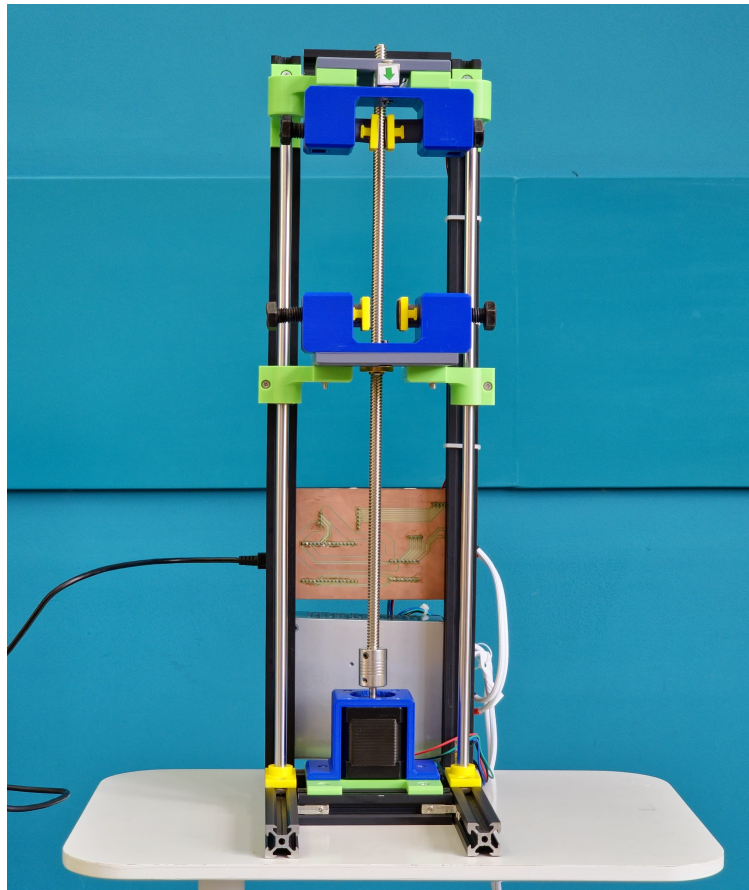


Figura 17: Implementación final del diseño mecánico de la máquina de ensayos

7.2. Diseño electrónico

En la Figura 18, se presenta el diagrama electrónico utilizado para la máquina de ensayos. En este diagrama, el controlador HX711 es utilizado para amplificar el voltaje recibido por el puente Whitestone de la celda de carga, y para transmitir este voltaje al microcontrolador principal haciendo uso de un DAC de 24 bits.

El controlador A4988 permite operar el motor paso a paso con dos señales del microcontrolador principal: una para indicar la dirección y otra para producir los pasos. Este controlador es alimentado por una fuente de voltaje de 24 V, y se configuró para utilizar pasos completos, en vez de usar micropasos, y para permitir al motor stepper una demanda de corriente máxima de 2A, para asegurar que los datos presentados en la Figura 8 sean válidos. La fuente de voltaje de 24 V se encuentra aislada del circuito principal para evitar que introduzca ruido en el sistema.

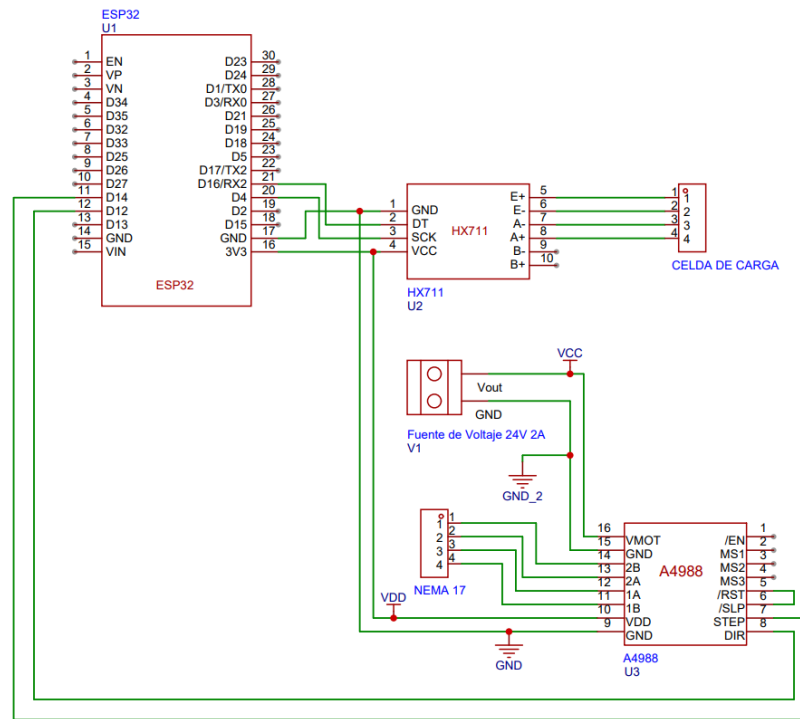


Figura 18: Diagrama electrónico de la máquina de ensayos

En el diagrama de la Figura 18, se utilizaron conectores de 4 pines para representar la conexión con la celda de carga y el motor paso a paso, y se utilizó un conector de tornillo de 2 pines para representar la conexión con la fuente de voltaje de 24 V. El diseño se realizó de esta manera para poder instalar estos conectores en una placa de circuito impreso.

El microcontrolador utilizado para operar la máquina de ensayos fue un ESP32, seleccionado a partir de comparar diferentes microcontroladores disponibles localmente utilizando una matriz de decisión, la cual se presenta en el Cuadro 3. La alimentación de voltaje de del microcontrolador será obtenida a través de una conexión por cable con una computadora, la cual se utilizará también para el envío y recepción de datos de la máquina de ensayos con una aplicación de control, que se describirá más adelante.

Cuadro 3: Matriz de decisión para la selección del microcontrolador de la máquina de ensayos

	Costo (0.30)	Capacidad de procesamiento (0.30)	Conectividad (0.10)	Librerías y soporte (0.20)	Puntuación Total
ESP32	6 / 1.80	9 / 2.70	9 / 0.90	9 / 1.80	7.20
Arduino Uno	8 / 2.40	4 / 1.20	2 / 0.20	8 / 1.60	5.40
TivaC	4 / 1.20	7 / 2.10	5 / 0.50	5 / 1.00	4.80
PIC16F887	9 / 2.70	5 / 1.50	3 / 0.30	6 / 1.20	5.70

El último paso de esta etapa de diseño electrónico fue el desarrollo e implementación de una placa de circuito impreso, cuya disposición de componentes se presenta en la Figura 19. La placa de circuito impreso se diseñó utilizando el software de código abierto EasyEDA, el cual se escogió debido a que es de uso gratuito. La placa se desarrolló siguiendo las restricciones de manufactura del laboratorio Makerlab de la Universidad del Valle de Guatemala.

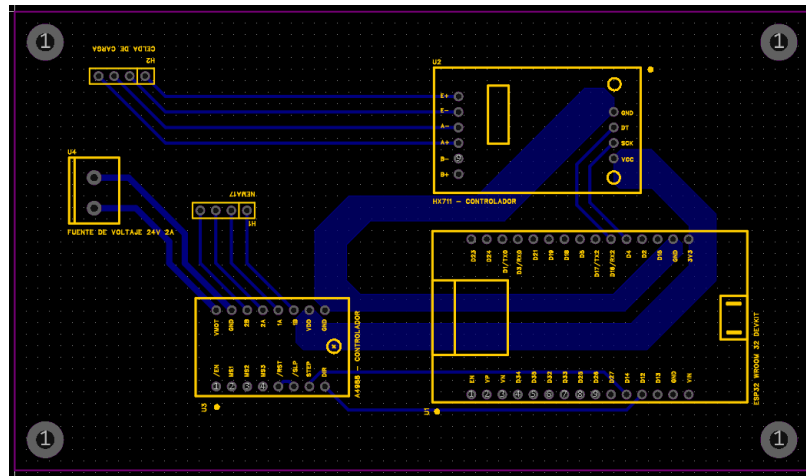


Figura 19: Disposición de componentes en la PCB para la máquina de ensayos

El ancho de las pistas de esta placa de circuito impreso se calculó de acuerdo con la máxima corriente que podría circular en ellas, y se utilizaron polígonos para conectar el voltaje de alimentación y la puesta a tierra de cada uno de los controladores en la placa. El resultado de la implementación física se presenta en la Figura 20

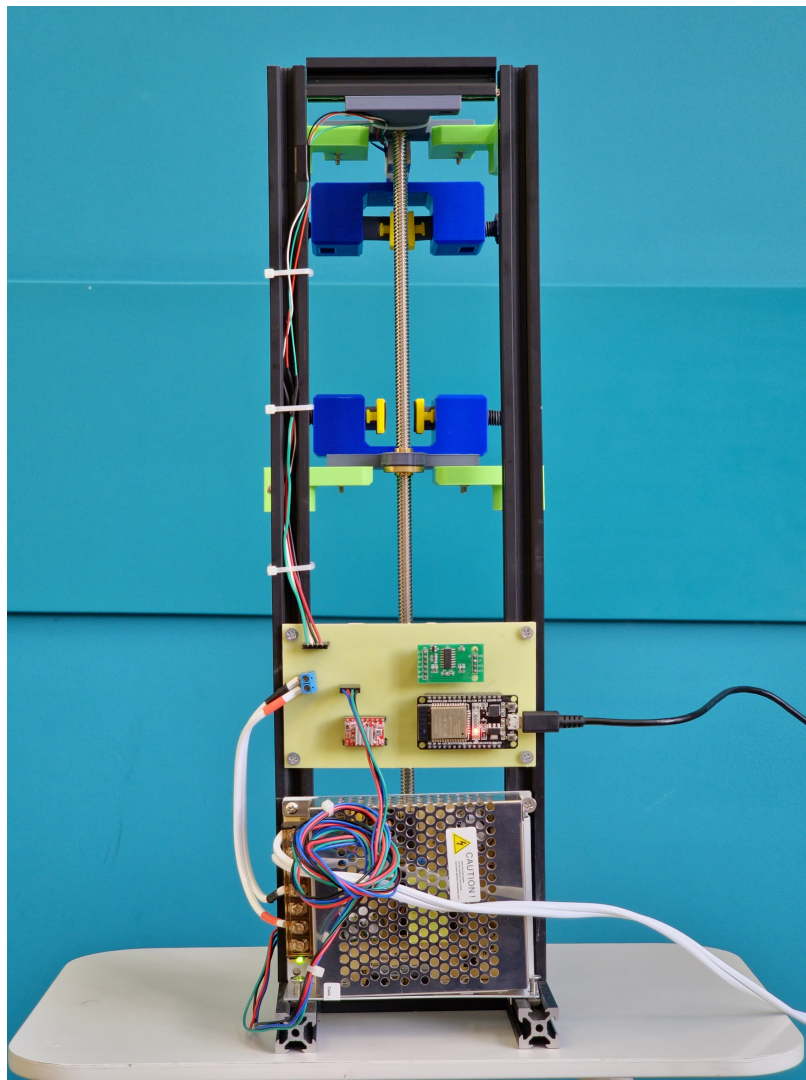


Figura 20: Placa de circuito impreso integrada en la máquina de ensayos

7.3. Diseño y programación del microcontrolador y de la aplicación de control de la máquina de ensayos

Para controlar la máquina de ensayos, se diseñó una aplicación utilizando la herramienta de creación de aplicaciones de MATLAB (MATLAB *app designer*, en inglés). En la Figura 21, se presenta la interfaz de usuario diseñada para la aplicación.

Esta aplicación envía los comandos recibidos por el usuario al microcontrolador de la máquina de ensayos vía comunicación serial, utilizando el formato de texto JSON, escogido gracias a su sistema estructurado, autodestructivo y sintácticamente legible por los seres humanos.

La aplicación se dividió en 8 paneles, cada uno diseñado para representar uno de los pasos a seguir para realizar un ensayo a tensión. El primero de ellos permite una conexión

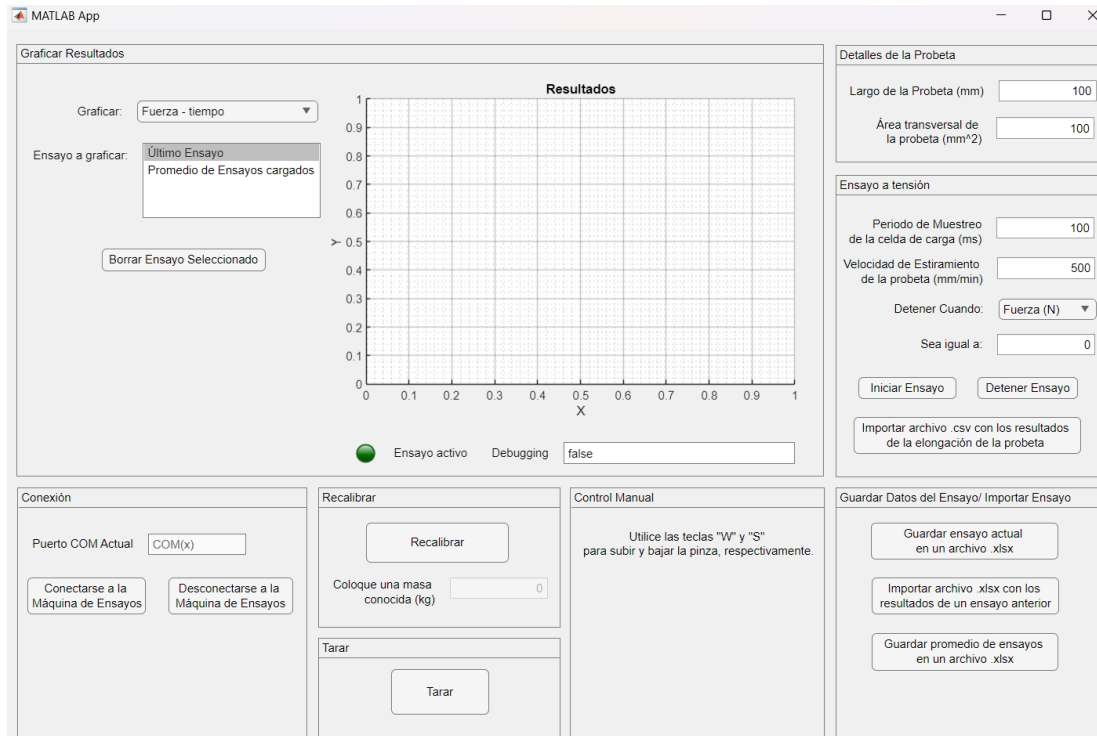


Figura 21: Interfaz de usuario de la aplicación para el control de la máquina de ensayos

automática con la máquina de ensayos, el cual es un paso fundamental para la ejecución de las funciones de la aplicación. El panel de recalibración y el de tara permiten asegurar la precisión de los resultados obtenidos durante los ensayos, eliminando cualquier desviación acumulada que pudiera afectar las mediciones, y estableciendo un valor cero en la lectura actual de la celda de carga antes de iniciar el ensayo.

El panel de control manual ofrece una forma directa de manipular el movimiento de la pinza móvil que sujeta la probeta. Mediante las teclas W y S, permite al usuario controlar el desplazamiento hacia arriba y hacia abajo de la pinza. Este control se realiza a una velocidad del motor paso a paso a 250 RPM, lo que se traduce en una velocidad lineal de 500 mm/s para la pinza móvil. Esta funcionalidad es utilizada para posicionar la probeta antes de iniciar un ensayo, o para liberar la probeta después de concluido el mismo.

El panel de guardar datos permite guardar en un archivo de Excel la información del último ensayo evaluado, así como los detalles de la probeta, la configuración del ensayo y los resultados de la fuerza y la deformación producida en la probeta. Este panel también permite cargar resultados de ensayos anteriores, con lo cual se puede obtener el resultado de un promedio de diferentes ensayos. En la Figura 22, se ejemplifica la estructura seguida para el guardado de datos de un ensayo en Excel.

El panel de detalles de la probeta permite al usuario ingresar las características físicas de la probeta antes de realizar un ensayo. Este panel incluye campos para especificar el largo de la probeta y su área transversal, lo que permite a la aplicación calcular el esfuerzo aplicado durante el ensayo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Tiempo (ms)	Fuerza (N)	Esfuerzo (MPa)	Deformación unitaria	Largo de la Probeta (mm)	Área transversal de la probeta (mm ²)	Periodo de muestreo del ensayo (ms)	Velocidad de estiramiento de la probeta (mm/s)	
2	0	-0.3431	-0.0034	-0.0020	50		100	100	500
3	100	-0.3326	-0.0033	0.0475					
4	200	-0.2076	-0.0021	0.0958					
5	300	0.1690	0.0017	0.1517					
6	400	0.5813	0.0058	0.2056					
7	500	0.9411	0.0094	0.2578					
8	600	1.2683	0.0127	0.3137					
9	700	1.5323	0.0153	0.3706					
10	800	1.7863	0.0179	0.4159					
11	900	2.0441	0.0204	0.4706					
12	1000	2.3023	0.0230	0.5272					
13	1100	2.5466	0.0255	0.5831					
14	1200	2.7199	0.0272	0.6404					
15	1300	2.8901	0.0289	0.6964					
16	1400	3.0479	0.0305	0.7464					
17	1500	3.2410	0.0324	0.8006					
18	1600	3.4237	0.0342	0.8537					
19	1700	3.5968	0.0360	0.9054					
20	1800	3.7613	0.0376	0.9593					
21	1900	4.0839	0.0408	1.0160					
22	2000	4.2415	0.0424	1.0624					
23	2100	4.3934	0.0439	1.1047					
24	2200	4.5456	0.0455	1.1595					
25	2300	4.7095	0.0471	1.2102					
26	2400	4.8518	0.0485	1.2602					
27	2500	5.0207	0.0502	1.3014					

Figura 22: Estructura de guardado de datos de un ensayo en Excel

El panel de ensayo a tensión permite al usuario iniciar y detener el ensayo a tensión de manera controlada. En este panel se pueden especificar parámetros como el periodo de muestreo de datos, la velocidad de estiramiento de la probeta y la condición para terminar el ensayo, lo que garantiza que los ensayos se realicen dentro de las condiciones deseadas. Este panel incluye un botón para importar los resultados de la elongación del ensayo, el cual es consecuencia que la máquina de ensayos no posee un módulo que permita obtener estos datos automáticamente. Con este botón, es posible utilizar otra herramienta para obtener los datos de elongación del ensayo, y cargarlos en la aplicación para poder obtener el diagrama esfuerzo - deformación.

Por último, El panel de graficar ensayo permite al usuario visualizar el progreso del ensayo en tiempo real, y el resultado final al terminar el ensayo. Este panel permite graficar diagramas fuerza - tiempo, esfuerzo - tiempo, y esfuerzo deformación. Utilizando el cuadro de lista del panel, es posible graficar también los resultados de diferentes ensayos cargados, y un promedio general de estos, si comparten la misma configuración de ensayo y de probeta.

El código del microcontrolador fue desarrollado utilizando el entorno Arduino IDE, versión 2.0.0. Se emplearon diversas librerías, como HX711 para la lectura de la celda de carga, AccelStepper para el control del motor paso a paso Nema 17, y ArduinoJson para la gestión de la comunicación entre la máquina y la aplicación móvil. El código también incluye mecanismos para manejar errores en la deserialización de comandos JSON, garantizando la fiabilidad del sistema.

7.4. Diseño y fabricación de moldes para probetas de Ecoflex 00-30

El estándar ASTM D412 [26] indica que las probetas utilizadas en ensayos a tensión que lleguen a la ruptura deben tener forma de hueso, mientras que para ensayos en el que la probeta no llegue a la ruptura es recomendado el uso de probetas rectas, cuyo tamaño se deja a criterio del diseñador. En [29], se recomienda que para ensayos a tensión pura, las probetas tengan un largo útil de por lo menos 10 veces el ancho, mientras que para ensayos a tensión planar, las probetas deben tener un ancho de por lo menos 10 veces el largo útil.

Se optó por diseñar tres tipos de moldes, cada uno destinado a obtener probetas específicas según el tipo de ensayo a realizar. El primer molde fue diseñado para generar probetas adecuadas para ensayos de tensión pura, con una relación entre el largo útil y el ancho de 5:1. El segundo molde, también para ensayos de tensión pura, se diseñó con una relación de largo útil y ancho de 10:1. Finalmente, el tercer molde fue creado para ensayos de tensión planar, con una relación entre el ancho y el largo útil de 10:1.

La razón por la cual se diseñaron dos moldes de probetas para ensayos a tensión pura fue para comparar si la variación en las dimensiones de las probetas produce diferencias significativas en los diagramas esfuerzo - deformación resultantes.

El diseño de los moldes para las probetas se llevó a cabo siguiendo una estrategia de generación de cavidades. Esta estrategia implica primero desarrollar el diseño del objeto que se desea moldear, para luego proceder con la creación del molde en sí, asegurando así una correspondencia precisa entre ambos.

En la Figura 23, se presentan los resultados finales de las probetas diseñadas para llevar a cabo los ensayos a tensión pura y tensión planar.

La primera probeta, mostrada en 23a, se diseñó con una relación de largo útil a ancho de 5:1. Esta probeta posee un área transversal cuadrada de $10 \times 10 \text{ mm}^2$, y un largo total de 110 mm. Cada pinza de la máquina de ensayos sujeta 20 mm de la probeta, dejando un margen de 10mm a ambos extremos de la probeta entre cada punto de sujeción y cada punto en el que haría la medición de la deformación, obteniendo así un largo útil de 50 mm.

Se dejó un margen de 10 mm entre el punto de sujeción y el punto de medición a ambos lados de la probeta para evitar que la deformación local producida en esta debido a la sujeción afecte las mediciones.

La segunda probeta, mostrada en 23b, fue diseñada con una relación de largo útil a ancho de 10:1. Para lograr esta proporción, se ajustó el área transversal a $5 \times 5 \text{ mm}^2$, manteniendo el resto de dimensiones iguales a las de la probeta anterior.

La última probeta, mostrada en 23c, se diseñó con una relación de ancho a largo útil de 10:1. Esta probeta posee un área transversal rectangular de $2 \times 50 \text{ mm}^2$, con un largo total de 65 mm. Al igual que en el caso de la primera probeta, cada pinza de la máquina de ensayos sujeta 20 mm de la probeta, y se dejó un margen de 10 mm a ambos extremos de ella, obteniendo así un largo útil de 5 mm.

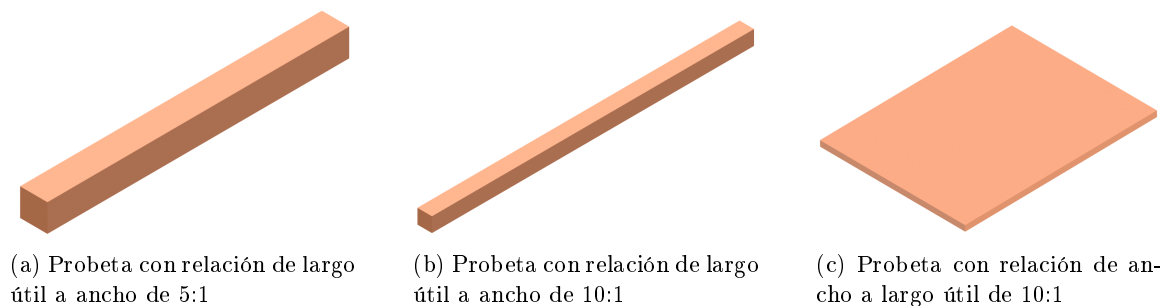


Figura 23: Probetas diseñadas para ensayos a tensión pura y tensión planar

Una vez diseñadas las probetas, se utilizaron sus geometrías para obtener los respectivos moldes, cuyos diseños finales se presentan en la Figura 24. Dado que las piezas a fabricar estarán compuestas de material elastomérico, no fue necesario incluir un ángulo de desmoldeo en el diseño, ya que la elasticidad del material evita que se queden atascadas en los moldes.

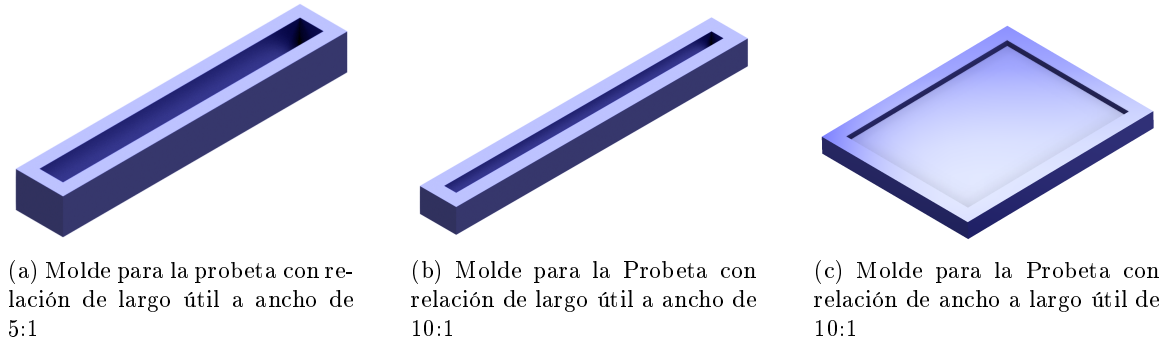


Figura 24: Moldes diseñados para las probetas de ensayos a tensión pura y tensión planar

Una vez finalizado el diseño de los moldes, se procedió a su fabricación mediante impresión 3D. Según lo estipulado por el estándar ASTM D412, es necesario realizar un promedio de cinco ensayos para que los resultados sean válidos. Por este motivo, se fabricaron seis moldes de cada tipo, asegurando la disponibilidad de una probeta extra de respaldo y garantizando que todas las probetas fueran curadas bajo las mismas condiciones. En la Figura 25, se muestran en conjunto todos los moldes impresos.

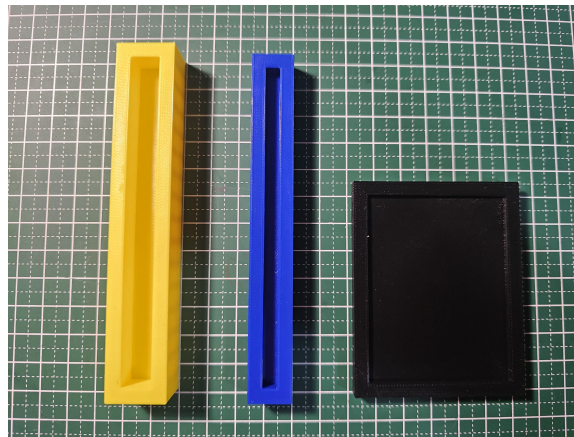


Figura 25: Diferentes tipos de moldes impresos para fabricar probetas de ensayos a tensión

7.5. Fabricación de probetas de Ecoflex 00-30

El proceso de fabricación de las probetas de Ecoflex 00-30 se realizó siguiendo las recomendaciones indicadas por Smooth-On, el fabricante del material.

El primer consistió en etiquetar los envases en donde se vertiría la parte A y la parte B de Ecoflex 00-30, y el envase donde se haría la mezcla de ambas partes. Así mismo, se etiquetaron las paletas que se utilizarían para mezclar ambas partes del material. En la

Figura 26, se presentan tanto los envases como las paletas etiquetadas.



(a) Envases etiquetados

(b) Paletas etiquetadas

Figura 26: Envases y paletas etiquetadas para la fabricación de probetas de Ecoflex 00-30

El siguiente paso, fue calcular la cantidad de Ecoflex 00-30 que iba a necesitarse para fabricar las probetas. Para ello, se calculó la suma del volumen total que ocupan todas las probetas, además de un actuador neumático blando, cuyo diseño se describe en su respectivo capítulo. Una vez calculado el volumen total, se multiplicó por el volumen específico del Ecoflex 00-30, el cual se encuentra en el Cuadro 1, obteniendo como resultado una cantidad mínima de 165.82 g de Ecoflex 00-30.

Smooth-On indica que el material debe mezclarse en una proporción de 1A:1B. En la Figura 27, se muestra como se pesaron 90 g de la parte A y 90 g de la parte B utilizando una balanza digital Nordika, la cual se taró previamente con los envases para no considerar la masa de estos.



(a) Pesaje de 90 g de la parte A de Ecoflex 00-30

(b) Pesaje de 90 g de la parte B de Ecoflex 00-30

Figura 27: Envases y paletas etiquetadas para la fabricación de probetas de Ecoflex 00-30

A continuación, se revolvió el contenido de ambos envases por 3 minutos con sus res-

pectivas paletas para evitar la contaminación cruzada. Posteriormente, ambas partes fueron transferidas al envase de mezcla, y se revolviaron durante otros 3 minutos para asegurar la homogeneización del compuesto.

En la Figura 28, se muestra el pesaje del material en el envase de mezcla, el cual tuvo un peso total de 174 g, lo que refleja una pérdida de aproximadamente un 3 % del material durante la transferencia. Esta pérdida puede atribuirse a factores como la adhesión del material a las paredes de los envases originales o a las paletas de mezcla, así como derrames accidentales o presencia de residuos no completamente vertidos.

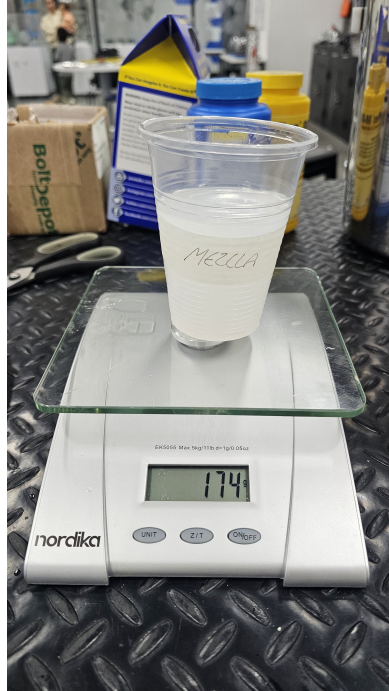


Figura 28: Pesaje de 174 g de la mezcla de ambas partes de Ecoflex 00-30

El siguiente paso consistió en remover las burbujas de aire que se encontraban en la mezcla. Para ello, se introdujo el envase de la mezcla en una cámara de vacío de 1 bar, la cual se encontraba disponible en el laboratorio aeroespacial de la Universidad del Valle de Guatemala.

Aunque Smooth-On recomienda ejercer una presión de vacío de 1 bar para este paso, en realidad solo pudo producirse una presión máxima de vacío de 0.78 bar, tal como se observa en la Figura 29, por las limitaciones de la cámara utilizada. A pesar de esto, se observó que la cámara fue capaz de remover la mayoría de las burbujas dentro de la mezcla.

Una vez removidas las burbujas de la mezcla, se procedió a verterla en todos los moldes de las probetas y del actuador neumático blando. En la Figura 30, se presentan los moldes utilizados en proceso de curación a temperatura ambiente, el cual tomó aproximadamente 4 horas.

El resultado final de las probetas tras el proceso de curación se presenta en la Figura 31.

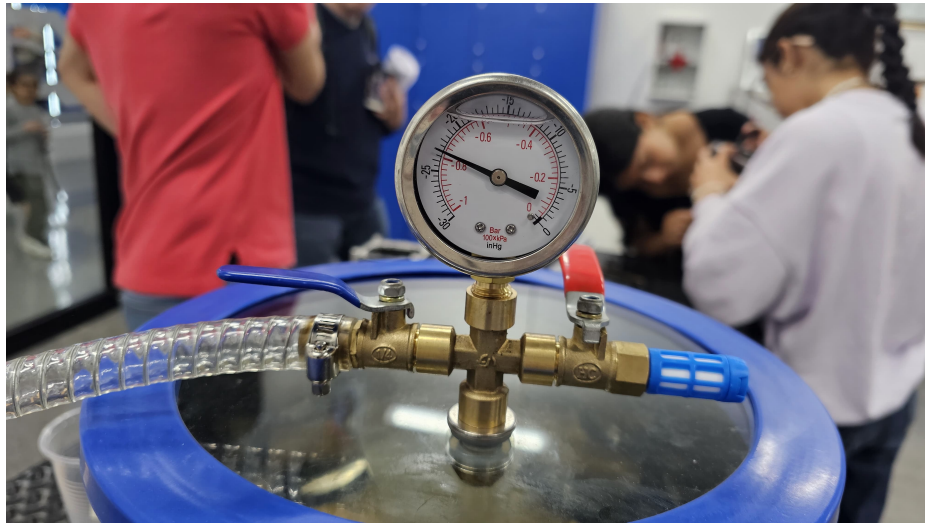
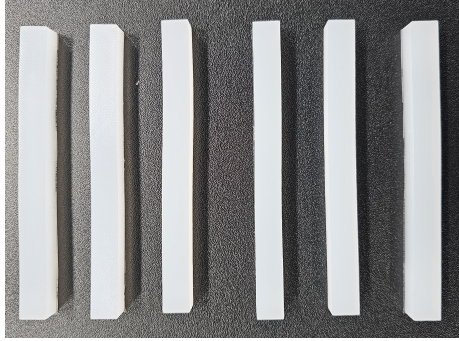


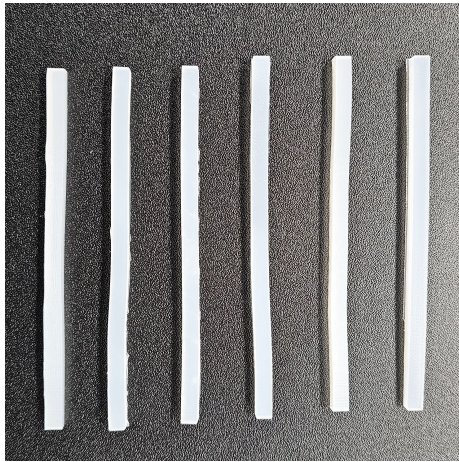
Figura 29: Presión de vacío máxima alcanzada



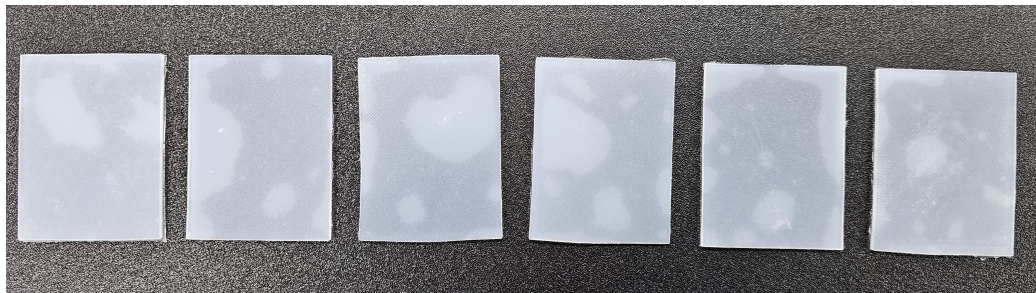
Figura 30: Probetas y actuador neumático blando en proceso de curación



(a) Probetas con relación de largo útil a ancho de 5:1 curadas, diseñadas para ensayos de tensión pura



(b) Probetas con relación de largo útil a ancho de 10:1 curadas, diseñadas para ensayos de tensión pura

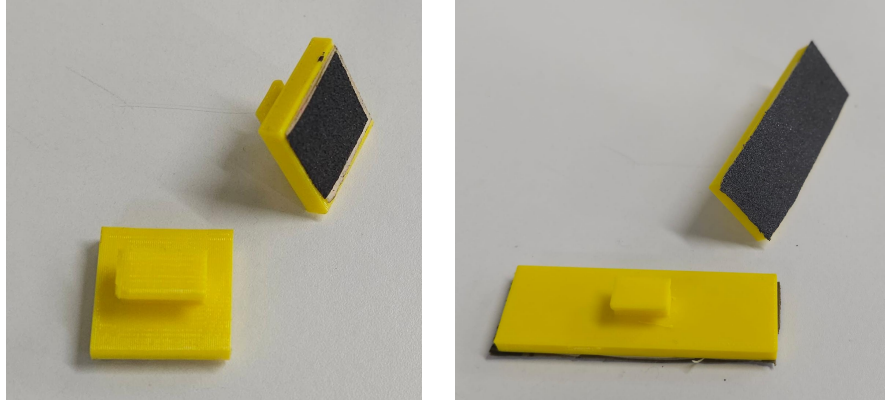


(c) Probetas con relación de ancho a largo útil de 10:1 curadas, diseñadas para ensayos de tensión planar

Figura 31: Resultado final de todas las probetas curadas

7.6. Ejecución y validación de ensayos a tensión

La máquina de ensayos cuenta con dos tipos de sujetadores de probetas para la ejecución de ensayos. El primer tipo de sujetadores se presenta en la Figura 32a, y fue utilizado para la realización de los ensayos a tensión pura. El segundo par se presenta en la Figura 32b, y fue utilizado para la realización de ensayos a tensión planar. Ambos tipos de sujetadores cuentan con una capa de lija de bajo gramaje utilizada para mejorar el agarre de cada sujetador.



(a) Sujetadores para la ejecución de ensayos de tensión pura

(b) Sujetadores para la ejecución de ensayos de tensión planar

Figura 32: Tipos de sujetadores disponibles para la realización de ensayos

El primer set de ensayos se realizó utilizando las probetas con relación de largo útil a ancho de 10:1, destinadas para la ejecución de ensayos a tensión pura.

Antes de comenzar, se llevó a cabo una recalibración de la máquina de ensayos, cuyo proceso se inició haciendo uso de la aplicación de control diseñada en Matlab. En este paso, se removieron los sujetadores de las pinzas de la máquina de ensayos, y cuando la aplicación indicó que debía colocarse una masa conocida sobre la pinza fija, se colocó un peso de calibración de 100 g, tal como se muestra en la Figura 33

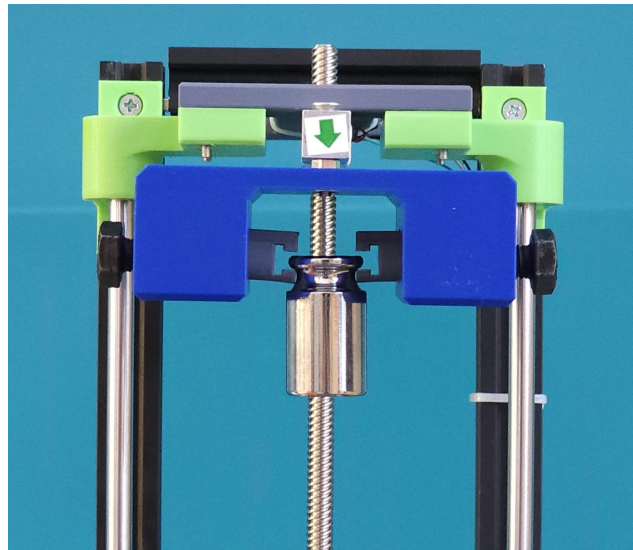


Figura 33: Peso de 100 g utilizado para la recalibración de la máquina de ensayos

Una vez recalibrada la máquina de ensayos, se marcó cada una de las probetas con una franja horizontal en cada uno de los extremos del largo útil, las cuales serían usadas como referencia para la medición de deformación durante el ensayo. Estas marcas se realizaron utilizando un marcador permanente de color azul.

A continuación, se instalaron los sujetadores de las pinzas de la Figura 32a, y se colocó

una de las probetas entre ellas, tal y como se observa en la Figura 34. Utilizando un vernier, se aseguró que el largo útil de la probeta tras la sujeción aun fuera el largo original.

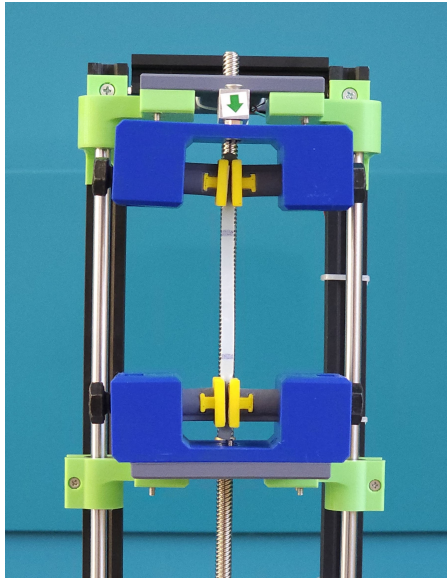


Figura 34: Sujeción de una probeta para ensayos de tensión pura entre las pinzas de la máquina de ensayos

Posteriormente, se posicionó una cámara frente a la máquina de ensayos para capturar en video la ejecución completa del ensayo. Se verificó que la cámara tuviera un campo de visión adecuado para registrar todo el recorrido de la máquina, y se configuró para grabar a una velocidad de 60 fotogramas por segundo.

Después, se introdujo el área transversal de la probeta en la aplicación de control, se estableció un período de muestreo de 100 ms y una velocidad de estiramiento de la probeta de 250 mm/s para la realización del ensayo. Posteriormente, se inició la grabación de video y se ejecutó el ensayo hasta completar todo el recorrido de la máquina de ensayos.

Al finalizar el ensayo, la aplicación de control guardó los datos de la fuerza y el esfuerzo producidos en la probeta cada 100 ms. Para obtener los datos correspondientes a la deformación, se cargó el video grabado del ensayo a la herramienta de análisis de video Tracker.

En la Figura 35, se muestra el análisis de video realizado en Tracker. El origen de los ejes coordenados del sistema se colocaron en la parte superior derecha de la marca de medición superior, con la dirección y positiva orientada hacia abajo, coincidiendo con la dirección de movimiento de la pinza móvil. También se utilizó una vara de calibración de 50 mm entre las franjas de medición de la probeta, cuya medida se verificó anteriormente.

A continuación, se definieron ambas franjas de la probeta como masas puntuales, y se rastreó su posición cada 6 fotogramas por segundo, lo que corresponde al periodo de muestreo de 100 ms utilizado en la aplicación de control de la máquina de ensayos. Estas masas puntuales pueden distinguirse en la Figura 35 con los colores rojo y azul.

El resultado de este análisis de video fue una tabla con los datos de la posición en el eje

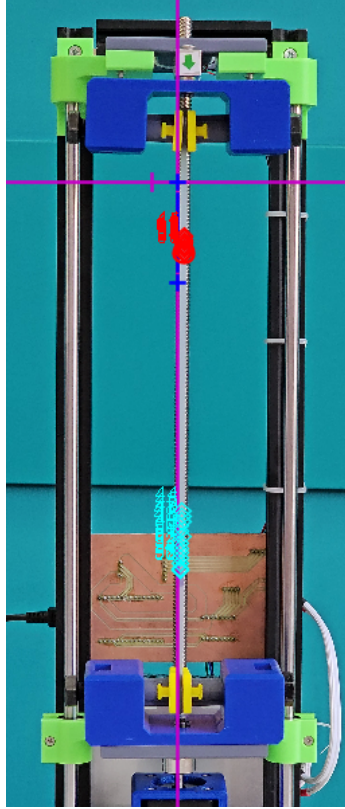


Figura 35: Sistema de análisis de un ensayo montado en Tracker, y rastreo de deformación de la probeta

y de ambas franjas, registrados cada 100 ms. Para determinar el largo de la probeta en cada instante, se restaron los valores de la posición en y de la franja de medición inferior de los correspondientes valores de la franja de medición superior. Estos datos se almacenaron en un archivo de Excel, que posteriormente se cargó en la aplicación de control de la máquina de ensayos, la cual los utilizó para calcular la deformación de la probeta en cada instante.

Habiendo reunido los datos del esfuerzo y la deformación producidas en la probeta durante el ensayo, fue posible graficar el diagrama esfuerzo - deformación del ensayo. Los pasos anteriormente descritos se repitieron para cada una de las 5 probetas, y los resultados de cada uno de los ensayos se promediaron tal y como indica el estándar ASTM D412, obteniendo como resultado el diagrama esfuerzo - deformación que se presenta en la Figura 36.

A continuación, se siguió la misma metodología descrita anteriormente para llevar a cabo el set de ensayos de tensión pura de las probetas con relación de largo útil a ancho de 5:1, con la única diferencia de que fue necesario modificar el área transversal de la probeta a ensayar en el apartado de configuración del ensayo, en la aplicación de control. En la Figura 37, se presenta el diagrama de esfuerzo - deformación obtenido al promediar los resultados de 5 ensayos utilizando estas probetas.

Al comparar ambos diagramas, se observó que el diagrama de la Figura 37 presenta mayores esfuerzos a menores deformaciones que el diagrama de la Figura 36.

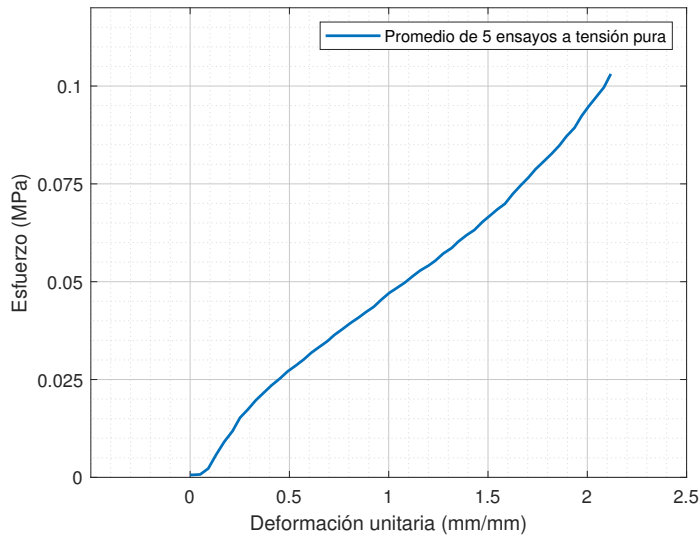


Figura 36: Diagrama de esfuerzo - deformación resultante del promedio de 5 ensayos utilizando las probetas con relación de largo útil a ancho de 10:1

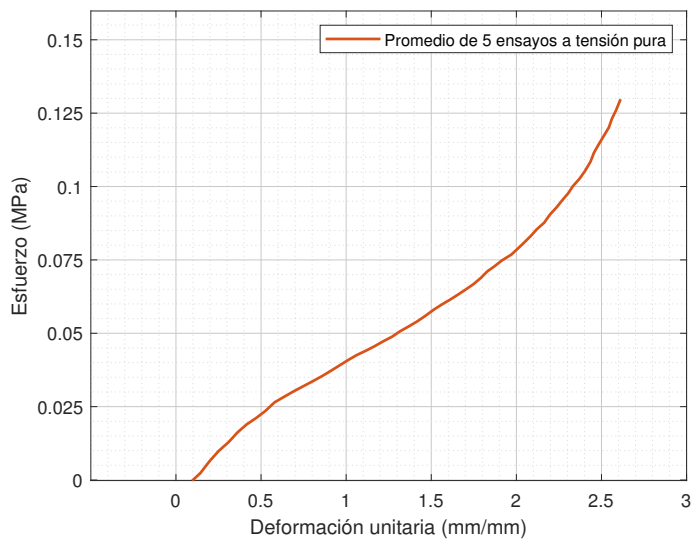


Figura 37: Diagrama de esfuerzo - deformación resultante del promedio de 5 ensayos utilizando las probetas con relación de largo útil a ancho de 5:1

Esto pudo deberse a que, si bien ambos ensayos fueron realizados bajo los mismos parámetros y las mismas condiciones ambientales, el cambio en el área transversal afectó significativamente la distribución de tensiones y el comportamiento del material bajo carga.

En las probetas con menor área transversal, pudo producirse una mayor concentración de esfuerzos debido a la menor cantidad de material disponible para distribuir la carga aplicada. En materiales hiperelásticos, esta mayor concentración de tensiones provoca que, dada una deformación unitaria, el material resista más (es decir, que se produzca un endurecimiento), generando un aumento de esfuerzo en etapas tempranas de la curva. Por el contrario, las

probetas con mayor área transversal contaron con más volumen para absorber y distribuir la carga.

Por otro lado, es posible que en las probetas de menor área transversal el efecto de la concentración de esfuerzos por los bordes de la probeta fueran aún más evidentes, lo que pudo producir que en estas probetas la carga no se distribuyera homogéneamente sobre su sección útil y, en consecuencia, se produjera una respuesta más rígida debido a una acumulación de esfuerzo.

En conclusión, aunque ambas probetas deberían mostrar una relación de esfuerzo - deformación similar, en la realidad los factores asociados a la disitribución de carga, el efecto de borde, el endurecimiento de las probetas , y en especial, el comportamiento no lineal del propio material ensayado, produjeron diferencias significativas en los resultados experimentales.

Al finalizar ambos sets de ensayos a tensión pura, se inició un set de ensayos a tensión planar. Para ello, se inició una recalibración de la máquina y se intercambiaron los sujetadores de las pinzas por los sujetadores presentados en la Figura 32b.

A continuación, se marcaron las probetas con franjas horizontales en cada uno de los extremos del largo útil, para ser utilizadas como marcas de medición, utilizando nuevamente un marcador permanente color azul. Una vez marcadas las probetas, se colocó una de ellas entre los sujetadores instalados anteriormente, y utilizando un vernier, se aseguró que el largo útil de la probeta tras la sujeción aun fuera el largo original.

En el caso de los ensayos a tensión planar, fue necesario reposicionar la cámara de video para capturar el lateral de la máquina de ensayos, tomando en cuenta que la cámara tuviera un campo de visión adecuado para registrar todo el recorrido de la máquina. Para estos ensayos, la cámara se configuró para grabar a una velocidad de 60 fotogramas por segundo. En la Figura 38, se presenta la sujeción de la probeta para ensayos a tensión planar desde la perspectiva que se utilizará para el análisis de video.

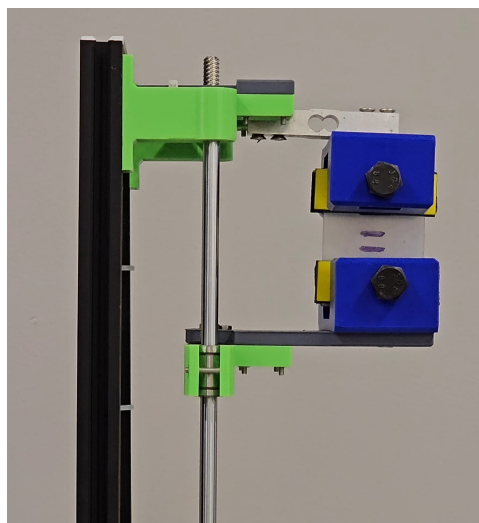


Figura 38: Sujeción de una probeta para ensayos de tensión planar entre las pinzas de la máquina de ensayos

Luego, se introdujo el área transversal de las probetas fabricadas para ensayos a tensión planar. El resto de configuraciones de ensayo se mantuvo igual que en los ensayos anteriores. Tras realizar pruebas preliminares, se determinó que detener el ensayo tras 3 segundos de ejecución iba a producir los mejores resultados, ya que las pinzas no eran capaces de mantener en posición las probetas transcurrido ese tiempo.

Bajo estos parámetros, se hicieron 5 ensayos de tensión planar con las probetas fabricadas. Al igual que antes, se analizaron las capturas de video de cada ensayo y se obtuvieron los respectivos datos de deformación de las probetas utilizando la herramienta de análisis de video Tracker.

Habiendo reunido todos los datos de esfuerzo y deformación producidas en las probetas, se cargaron los resultados de los 5 ensayos a la aplicación de control, y se obtuvo el resultado promedio de 5 ensayos, tal y como lo indica el estándar ASTM D412. Este resultado se presenta en la Figura 39.

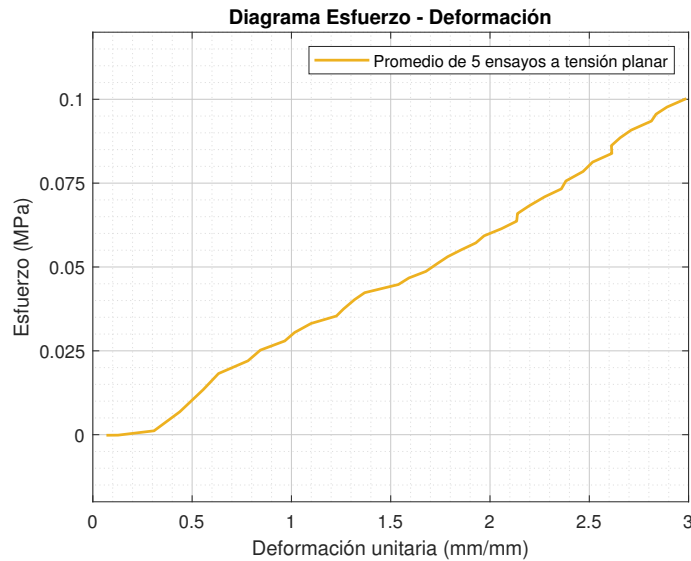


Figura 39: Diagrama de esfuerzo - deformación resultante del promedio de 5 ensayos utilizando las probetas con relación de ancho a largo útil de 10:1, destinadas a tensión planar

Se puede observar que la curva del diagrama de esfuerzo - deformación de la Figura 39 carece de la suavidad que presentan las curvas de las Figuras 37 y 36.

Esta falta de suavidad pudo deberse a diversos factores que afectaron la consistencia y precisión de los datos obtenidos. Es posible que durante los ensayos realizados, se haya producido un deslizamiento de la probeta, lo que haya ocasionado desviaciones entre las magnitudes medidas y lo que estaba sucediendo en realidad con la probeta.

Otro factor que pudo causar estas fluctuaciones en la curva de esfuerzo - deformación de la Figura 39 fue el método de medición de deformación utilizado durante los ensayos. Los supuestos bajo los que se rige un ensayo a tensión planar requieren que las mediciones de fuerza y deformación se hagan justo sobre el centro de la probeta, sin embargo, la herramienta de análisis de video utilizada no fue capaz de muestrear siempre estos mismos puntos sobre las marcas de medición, lo que pudo derivar en que los resultados obtenidos se escapen de

los supuestos planteados para este tipo de ensayos.

Los resultados de los tres sets de ensayos se validaron al compararlos con los obtenidos por Moseley, Florez, Sonar et al. en [5] en donde también se ensayaron probetas de Ecoflex 00-30. En dicho artículo, las probetas para ensayos de tensión pura tenían un área transversal de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ y un largo total de 120 mm, mientras que las probetas para ensayos de tensión planar tenían un área transversal de $5 \times 50 \text{ mm}^2$ y un largo total de 80 mm. La máquina de ensayos universal utilizada por los autores de este artículo científico fue una MTS Criterion Modelo 42, y sus ensayos se realizaron con una velocidad de estiramiento de la probeta de 10 mm/s. En la Figura 40, se presentan los resultados de estos ensayos.

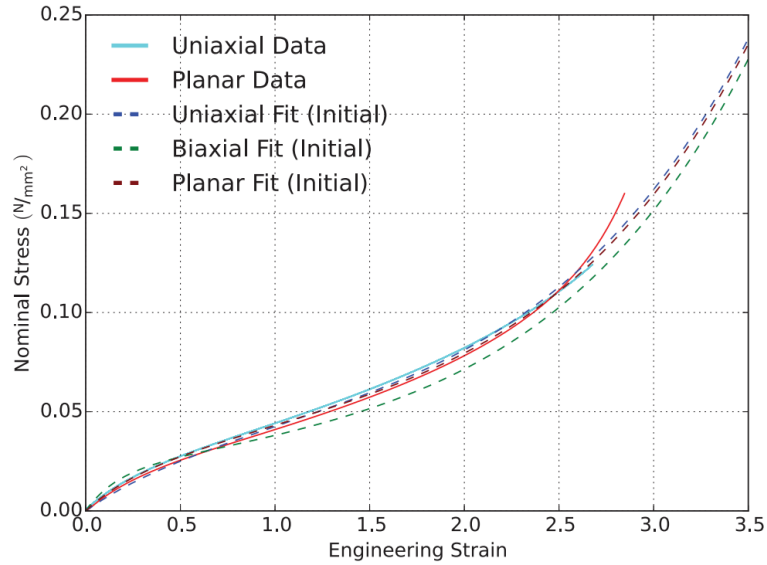


Figura 40: Diagrama de esfuerzo - deformación resultante de ensayos de tensión pura y tensión planar, con ajustes de curvas de un modelo hiperelástico [5]

En el Cuadro 4, se presenta una comparación punto a punto de los resultados de los ensayos a tensión pura utilizando las probetas con relación de largo a ancho de 5:1, obtenidos por la máquina de ensayos fabricada en la universidad, contra los resultados obtenidos en [5].

En el Cuadro 5, se presenta una comparación punto a punto de los resultados de los ensayos a tensión pura utilizando las probetas con relación de largo a ancho de 10:1, contra los resultados obtenidos en [5].

Al comparar los resultados del Cuadro 4 con los del Cuadro 5, se observó que los ensayos a tensión pura realizados utilizando las probetas con relación de largo útil a ancho de 10:1 produjeron valores más cercanos a los que pudieran obtenerse utilizando una máquina de ensayos universal de una marca establecida.

Esto concuerda con el análisis realizado anteriormente, y evidencia que para la realización de ensayos a tensión pura utilizando un material hiperelástico, es más recomendable utilizar probetas con una mayor área transversal, y que de preferencia posean una relación entre el largo útil y el ancho de 5:1 o menos.

Cuadro 4: Comparación de puntos de interés del diagrama de esfuerzo - deformación experimental obtenido utilizando las probetas con relación de largo a ancho de 5:1 contra el diagrama teórico, y sus respectivos porcentajes de error

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzo en las probetas con relación de largo útil a ancho de 10:1 (MPa)	Esfuerzo en los ensayos de [5] (MPa)	Porcentaje de error (%)
0.00	0.000	0.000	0.00
0.50	0.027	0.025	8.00
1.00	0.047	0.044	6.82
1.16	0.055	0.050	10.00
1.50	0.066	0.060	10.00
2.00	0.094	0.081	16.05

Cuadro 5: Comparación de puntos de interés del diagrama de esfuerzo - deformación experimental obtenido utilizando las probetas con relación de largo a ancho de 10:1 contra el diagrama teórico, y sus respectivos porcentajes de error

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzo en las probetas con relación de largo útil a ancho de 5:1 (MPa)	Esfuerzo en los ensayos de [5] (MPa)	Porcentaje de error (%)
0.00	0.000	0.000	0.00
0.50	0.023	0.025	8.00
1.00	0.040	0.044	9.09
1.16	0.050	0.050	0.00
1.50	0.060	0.060	0.00
2.00	0.075	0.070	7.14
2.30	0.095	0.100	5.00
2.50	0.115	0.110	4.55

Se consideró que la principal razón por la cual existe una diferencia entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos utilizados como teóricos es la precisión en la medición de la deformación de las probetas. Para mejorar la precisión en la medición de estos valores, se recomienda la construcción de una herramienta de análisis de video integrada a la máquina de ensayos, o la inclusión de un extensómetro especializado para el análisis de probetas hechas de materiales elastoméricos.

Otra razón por la cual existe una diferencia entre los datos experimentales y los teóricos es que las condiciones bajo las cuales se fabricó el Ecoflex 00-30 en la Universidad del Valle de Guatemala no fueron las mismas bajo las cuales se fabricó en [5]. Esto pudo producir variaciones importantes en las propiedades mecánicas del material.

Sin embargo, ya que el mayor porcentaje de error entre los datos comparados del Cuadro 5 fue menor al 10 %, se concluyó que los ensayos realizados con la máquina de ensayos fabricada en la universidad fueron lo suficientemente precisos como para capturar la respuesta no lineal del material, por lo que pueden ser utilizados en las consecuentes simulaciones utilizando

análisis de elementos finitos.

En el Cuadro 6, se presenta una comparación punto a punto de los resultados de los ensayos a tensión planar contra los resultados obtenidos en [5].

Cuadro 6: Comparación de puntos de interés del diagrama de esfuerzo - deformación experimental obtenido utilizando las probetas con relación de ancho a largo útil de 10:1 para ensayos de tensión planar contra el diagrama teórico, y sus respectivos porcentajes de error

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzo en las probetas con relación de ancho a largo útil de 10:1 (MPa)	Esfuerzo en los ensayos de [5] (MPa)	Porcentaje de error (%)
0.00	0.000	0.000	0.00
0.50	0.010	0.025	60.00
1.00	0.030	0.042	28.57
1.30	0.040	0.050	20.00
1.50	0.045	0.057	21.05
2.00	0.060	0.077	22.08
2.36	0.073	0.100	27.00
2.50	0.080	0.110	27.27

Los resultados del Cuadro 6 muestran porcentajes de error considerablemente altos, alcanzando un máximo de 60%. Esto sugiere que los ensayos de tensión planar no lograron replicar con precisión los valores de referencia obtenidos en [5], mostrando desviaciones sustanciales en cada punto de deformación.

Como se analizó previamente, esta disparidad pudo deberse a la complejidad de medir con precisión el punto central de la probeta durante el ensayo. Adicionalmente, las propiedades viscoelásticas del material pudieron haber introducido variaciones adicionales en las mediciones, haciendo que los datos obtenidos difieran significativamente de los esperados.

Simulación de un actuador neumático blando de canales rectos

En la robótica blanda, la simulación es un paso fundamental para predecir el comportamiento de los actuadores neumáticos blandos, antes de pasar a la fase de fabricación y pruebas experimentales. Los robots blandos, debido a su estructura flexible y su respuesta no lineal, presentan comportamientos complejos que no pueden ser descritos fácilmente mediante modelos tradicionales de la mecánica de sólidos rígidos. Por esta razón, la simulación en entornos virtuales permite analizar, de manera controlada y eficiente, la respuesta de estos actuadores a diferentes condiciones de carga, presiones y deformaciones.

Una de las principales ventajas de simular un actuador neumático blando radica en la posibilidad de explorar distintas configuraciones de diseño y materiales sin necesidad de construir prototipos físicos. Además, las simulaciones permiten realizar ajustes iterativos en aspectos como la geometría de los canales neumáticos, las propiedades del material y los parámetros de control, lo que facilita la optimización del diseño para diferentes aplicaciones.

8.1. Simulación utilizando Ansys

El primer paso de la simulación de un actuador neumático blando utilizando ansys fue la selección del tipo de análisis que se llevará a cabo. En este caso, se decidió realizar un análisis estructural estático, ya que solo se desea observar la respuesta del actuador al aplicarse una presión constante alcanzada bajo un proceso cuasi-estático.

A continuación, se definió el material que conforma el actuador neumático blando, el cual fue el Ecoflex 00-30, desde el apartado de "datos de ingeniería" del análisis estático. La densidad de este material se obtuvo de los datos provistos por el fabricante, los cuales se resumen en el Cuadro 1.

Luego, se seleccionó un modelo hiperelástico de Ogden de tercer orden para realizar un ajuste de curva de los datos experimentales obtenidos utilizando la máquina de ensayos implementada anteriormente. Se seleccionó este modelo debido a que es el que mejor capturó la curva obtenida experimentalmente del material de todos los modelos disponibles en Ansys.

Los datos experimentales usados para la simulación fueron los resultantes de los ensayos de tensión pura utilizando las probetas con relación de largo útil a ancho de 10:1. Como se discutió en su respectivo capítulo, se utilizaron estos datos ya que fueron los que mejor se apegaron a los resultados que pudieran obtenerse con una máquina de ensayos de una marca conocida. En este caso, no se utilizaron los resultados de los ensayos de tensión planar, ya que los porcentajes de error de dichos ensayos resultaron ser demasiado significativos. En la Figura 41, se presenta el ajuste de los datos experimentales a la curva del modelo hiperelástico seleccionado.

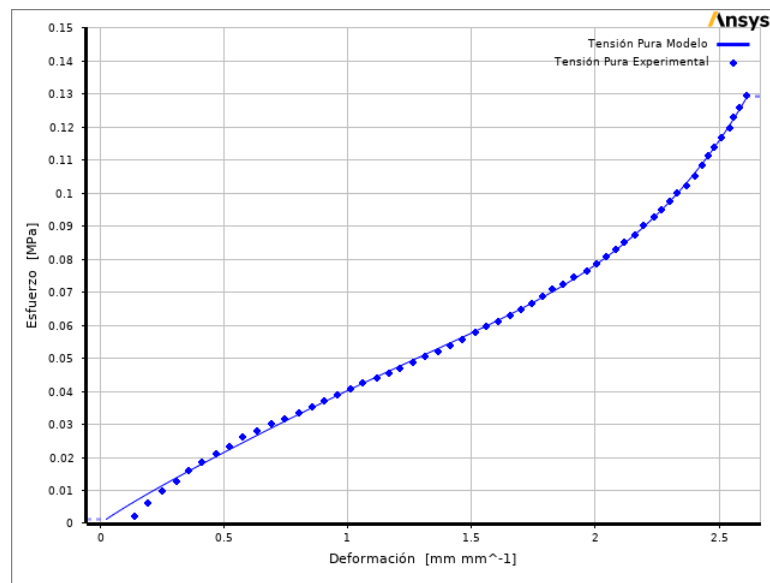


Figura 41: Ajuste de los datos obtenidos experimentalmente de los ensayos a tensión de Ecoflex 00-30 a la curva del modelo hiperelástico de Ogden de tercer orden

En el Cuadro 7, se resumen las constantes del modelo de Ogden de tercer orden obtenidas al realizar el ajuste de la curva de los datos experimentales.

Cuadro 7: Parámetros del modelo hiperelástico tras el ajuste de los datos experimentales

Constante del material	Magnitud
μ_1	-0.24 MPa
α_1	4.82
μ_2	0.08 MPa
α_2	5.05
μ_3	0.16 MPa
α_3	4.62
D_1	0.00 MPa ⁻¹
D_2	0.00 MPa ⁻¹
D_3	0.00 MPa ⁻¹

El siguiente paso consistió en la definición de la geometría del actuador neumático blando en el apartado de "geometría" del análisis estático. En la Figura 42, se muestra una vista seccionada del modelo utilizado, el cual es una versión simplificada del que se utilizará para la fabricación física del actuador. La razón por la cual se simplificó la geometría del actuador fue para que más adelante se pudiera obtener un mallado más regular, lo que disminuirá el poder computacional necesario para procesar los cálculos del análisis de elementos finitos.

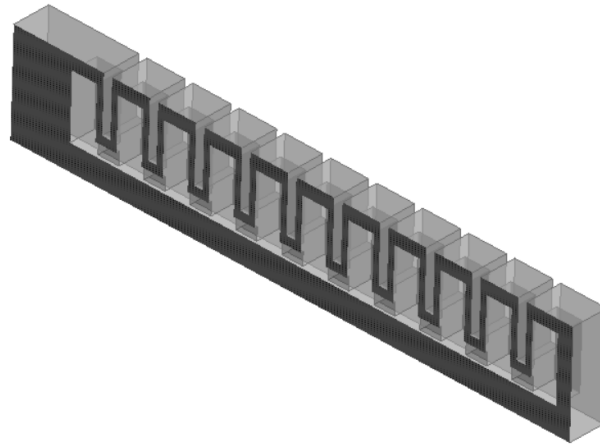
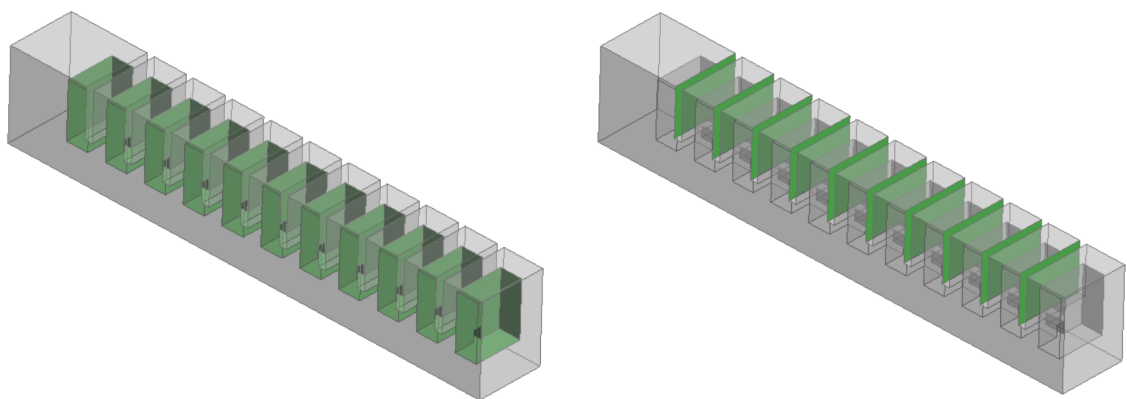


Figura 42: Geometría seccionada del actuador blando utilizado para la simulación en Ansys

La geometría utilizada fue importada a Ansys como un archivo .STEP exportado desde Autodesk Inventor.

A continuación, se definieron dos grupos de caras seleccionadas para facilitar la definición de restricciones en los siguientes pasos. El primer grupo fue el de las paredes interiores, en el cual se seleccionaron todas las caras internas del actuador que estarían en contacto directo con la entrada de presión. El segundo grupo fue el de las paredes exteriores, en el cual se seleccionaron todas las caras externas que potencialmente pudieran entrar en contacto durante la ejecución de la simulación. En la Figura 43, se presentan ambos grupos de caras seleccionadas.



(a) Grupo de caras de las paredes interiores del actuador blando

(b) Grupo de caras de las paredes exteriores del actuador blando

Figura 43: Grupos de caras seleccionados del actuador neumático blando

Posteriormente, se utilizó el grupo de paredes exteriores para definir una condición de contacto sin fricción con ella misma. Esto se realizó de esta forma ya que durante la simulación, se espera que estas caras entren en contacto consigo mismas, por lo que esta condición de contacto permitirá que la simulación converja a un resultado que se asemeje al comportamiento real del actuador.

Finalizada la edición de la geometría del actuador neumático blando, se definió la malla de este desde el apartado de "modelo" del análisis estático. Para ello, se decidió utilizar un mallado tetrahédrico, ya que este fue el que mejor se adaptó a la geometría del actuador neumático blando. El tamaño de los elementos de la malla se definió de 2.8 mm, con el cual se produjeron 17450 elementos y 30332 nodos. A pesar de que para este tipo de simulaciones se recomienda un tamaño de los elementos de malla más pequeño, se optó por un tamaño de 2.8 mm debido a que la versión educativa de Ansys solo admite hasta 32000 nodos para un análisis. En la Figura 44, se presenta el mallado realizado para el actuador blando.

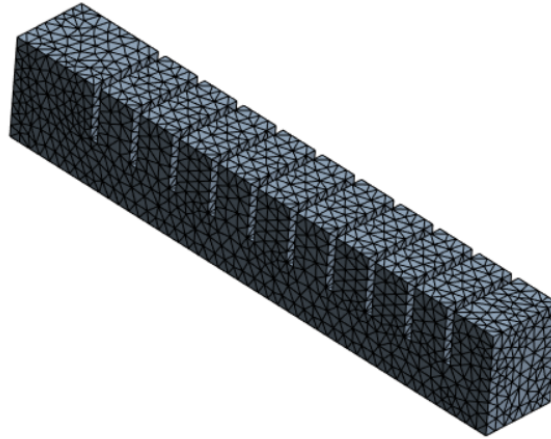


Figura 44: Mallado tetrahédrico realizado para la simulación del actuador neumático blando

A continuación, se verificaron dos métricas de evaluación de la calidad de la malla: la relación de aspecto y la oblicuidad de los elementos. En la Figura 45, se presenta un diagrama de barras que relaciona la cantidad de elementos del mallado con las relaciones de aspecto que estos poseen. Un buen mallado se caracteriza porque la mayoría de sus elementos poseen una relación de aspecto cercana a 1, y en este caso, la mayoría de los elementos del mallado poseen una relación de aspecto cercana a 1.18, lo que sirve como validación de la buena calidad de la malla realizada.

En la Figura 46, se presenta un diagrama de barras que relaciona la cantidad de elementos del mallado con la oblicuidad de cada elemento. En este caso, un buen mallado se caracteriza porque la mayoría de sus elementos tienen una oblicuidad entre 0 y 0.50, y como se observa en el diagrama, la mayoría de los elementos del mallado realizado poseen una oblicuidad de 0.25, con lo que se comprobó nuevamente que la malla se encuentra dentro de los rangos aceptables de calidad.

Después, se definió una condición de contacto del tipo sin fricción del grupo de caras seleccionadas de las paredes exteriores con este mismo grupo, ya que al accionarse el actuador, estas superficies entrarán en contacto, por lo que es necesario indicarle a Ansys el tipo de interacción que tendrán.

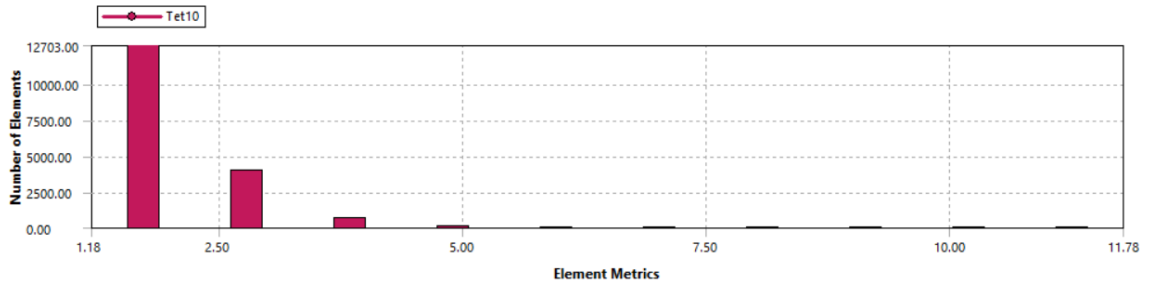


Figura 45: Diagrama de barras de número de elementos - relación de aspecto para el mallado del actuador neumático blando

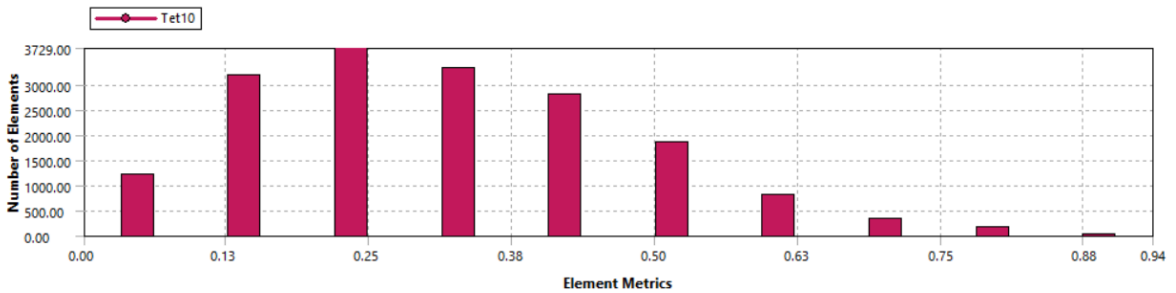


Figura 46: Diagrama de barras de número de elementos - oblicuidad para el mallado del actuador neumático blando

A continuación, en la configuración del análisis, se definió un soporte fijo en una de las caras del actuador que estará sujeto a la base de la plataforma de pruebas, y se aplicó una presión interna constante de 4.5 kPa sobre el grupo de caras interiores del actuador neumático blando. Inicialmente también se consideró el efecto de la gravedad sobre el actuador, pero tras una primera simulación de prueba, se observó que Ansys no fue capaz de converger a un resultado debido a la falta de espacio en la memoria RAM de la computadora utilizada.

Por último, en las condiciones del análisis se activó la opción de grandes deflexiones, debido a que se espera que el actuador neumático blando sufra deformaciones drásticas al variar su presión interna, y se activó el paso de tiempo automático para optimizar la convergencia a una solución del análisis.

Una vez finalizada la configuración de la simulación, se procedió a ejecutar la resolución del mismo. Transcurrieron 217 segundos (3.6 minutos) para que Ansys pudiera converger a un resultado.

En la Figura 47, se presenta la deformación total sufrida por el actuador al aplicarse la presión de entrada de 4.5 kPa durante la simulación. Como puede observarse, la máxima deformación para esta presión interna ocurrió en el extremo libre del actuador, con una magnitud de 173.96 mm, tal y como era esperado en un principio.

En la Figura 47, también puede observarse la respuesta general del actuador neumático blando al ser actuado. Esta respuesta se caracteriza por una curvatura cóncava en la dirección de la capa inextensible del actuador, como consecuencia del aumento de tamaño en las cámaras internas de este.

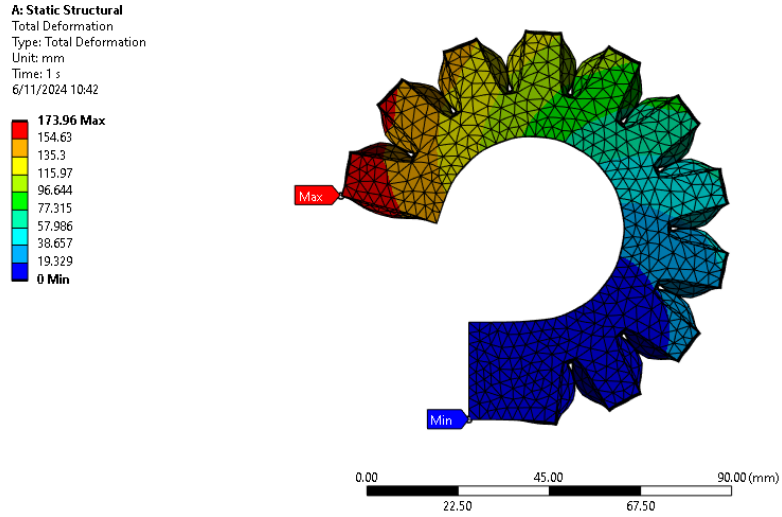


Figura 47: Simulación de deformación total del actuador neumático blando

En la Figura 48, se presenta un diagrama en el que puede visualizarse la deformación total máxima producida en el actuador, en el rango de presiones internas desde 0 hasta 0.045 MPa. En este diagrama puede observarse que, en realidad, la máxima deformación alcanzada fue de 177.78 mm.

La razón por la cual la máxima deformación disminuyó ligeramente fue debido a que a partir del instante en el que se alcanzó el valor de 177.798 mm, el extremo móvil del actuador neumático blando empezó a desplazarse nuevamente en dirección hacia abajo a la derecha. Esto acercó el punto de máxima deformación en el actuador nuevamente a su posición de origen, lo que en consecuencia disminuyó el valor final de la deformación máxima en el actuador.

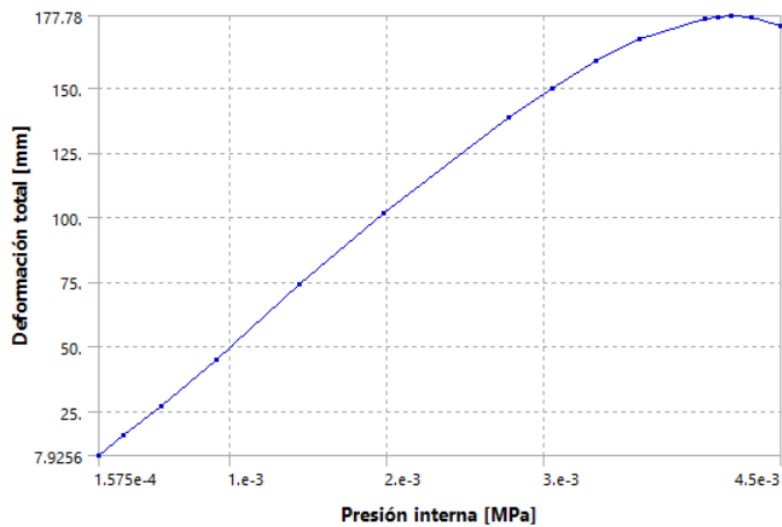


Figura 48: Diagrama de deformación total máxima - presión interna del actuador neumático blando

En la Figura 49, se presenta el esfuerzo total en el actuador neumático blando al terminar la simulación. En este caso, el esfuerzo máximo producido fue de 0.027099 MPa, el cual se concentró en el punto de contacto entre paredes exteriores del actuador. Ya que este esfuerzo es muy inferior al esfuerzo máximo al que se sometió el material durante los ensayos, se concluyó que la presión utilizada para accionar el actuador es segura, y que el actuador no llegará al fallo durante las pruebas físicas.

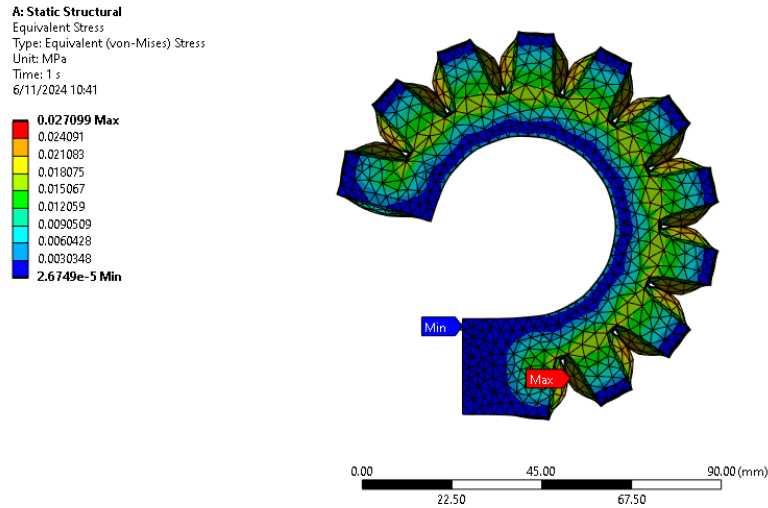


Figura 49: Simulación de los esfuerzos de Von Mises en el actuador neumático blando

En la Figura 50, se presenta un diagrama de la condición de esfuerzos equivalentes de Von Mises máxima en el actuador neumático blando para el rango de presiones de 0 a 0.045 MPa.

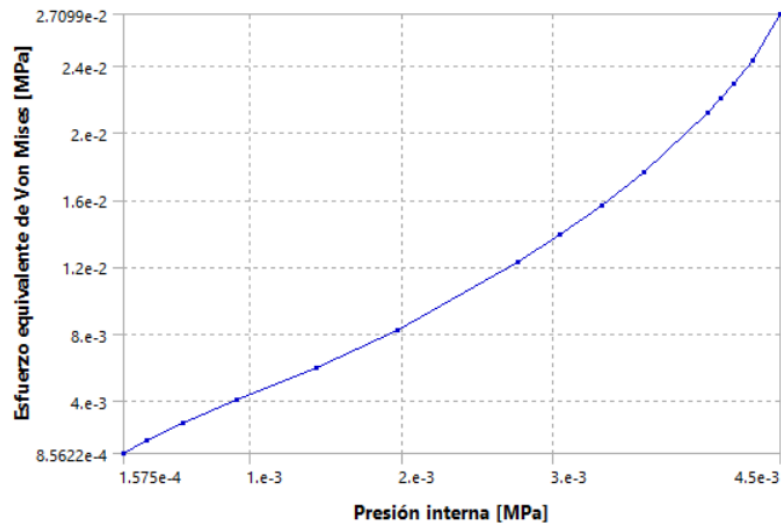


Figura 50: Diagrama de esfuerzo máximo de Von Mises - presión interna del actuador neumático blando

Aunque el comportamiento general del actuador neumático blando observado en los resultados de estas simulaciones es muy similar al esperado en la vida real, se esperan dife-

rencias significativas en la magnitud de la presión de entrada necesaria para poder replicar los resultados de las simulaciones. Esto es consecuencia directa de que en las simulaciones no se consideró el efecto de la gravedad sobre el actuador neumático blando, por las razones detalladas anteriormente. Además, la geometría utilizada para las simulaciones fue solo una versión simplificada de la geometría real del actuador neumático blando, en donde no se tomó en cuenta la adición de una capa de material inextensible (en este trabajo de investigación, esta capa correspondió a una pieza de papel, como se describe en el siguiente capítulo).

A pesar de esto, estos resultados son valiosos porque proporcionan una referencia inicial para comprender la respuesta del actuador ante distintos niveles de presión, permitiendo ajustar y optimizar parámetros de diseño en etapas tempranas sin necesidad de pruebas físicas. Además, brindan una base para identificar limitaciones y áreas de mejora en el diseño del actuador, especialmente en términos de materiales y geometría. Al analizar estos datos, es posible anticipar el comportamiento del actuador y realizar ajustes que minimicen errores y aumenten la precisión en experimentos futuros, lo cual resulta fundamental para el desarrollo de aplicaciones prácticas de actuadores neumáticos blandos en condiciones reales.

Para una investigación futura, se recomienda buscar métodos de optimización del análisis, para evitar que este no puedan completarse por falta de poder computacional, como ocurrió en el caso de la simulación en donde se intentó considerar el efecto de la gravedad. Además, para obtener resultados aun más precisos, se recomienda utilizar un modelo del actuador neumático blando en donde también se considere la adición de la capa inextensible del mismo.

Fabricación de un actuador neumático blando de canales rectos

9.1. Primera iteración

La primera iteración de la fabricación del actuador neumático blando de canales rectos se basó en su totalidad en la guía de diseño presentada en [16].

En esta guía, se describe el diseño de los diferentes moldes que serán utilizados para la fabricación del actuador blando. Los autores de la guía diseñaron los moldes considerando el uso de la silicona Elastosil M4601 para la fabricación del actuador neumático blando, mientras que en este trabajo de graduación se consideró el uso de la silicona Ecoflex 00-30. Durante esta primera iteración, se buscó evaluar si los moldes de la guía de diseño utilizada son adecuados para la fabricación de actuadores neumáticos blandos utilizando la silicona disponible localmente.

El actuador blando de [16] fue realizado utilizando la herramienta de diseño asistido por computadora Solidworks, mientras que el diseño realizado en el presente trabajo de graduación se adaptó utilizando Inventor, debido a que esta última herramienta es más accesible en la Universidad del Valle de Guatemala.

El actuador diseñado se compuso de dos partes: el cuerpo principal, el cual se expande al recibir una entrada de aire, y una capa inextensible, compuesta por una pieza de papel rodeada de material elastomérico.

En la guía de diseño, se decidió utilizar una morfología de un actuador con 11 cámaras, cada una de 8 mm de largo, 15 mm de ancho y 15 mm de alto. También se decidió que las paredes laterales de las cámaras tuvieran un grosor de 2 mm, y que las paredes entre cámaras tuvieran un grosor de 1 mm. Finalmente, en la guía de diseño se decidió que cada cámara tuviera un espaciado de 2 mm con la siguiente, y que el conducto de alimentación

de aire tuviera una sección transversal de $2 \times 2 \text{ mm}^2$.

En la Figura 51, se presenta el cuerpo principal del actuador neumático blando modelado en Inventor siguiendo la guía de diseño de [16].

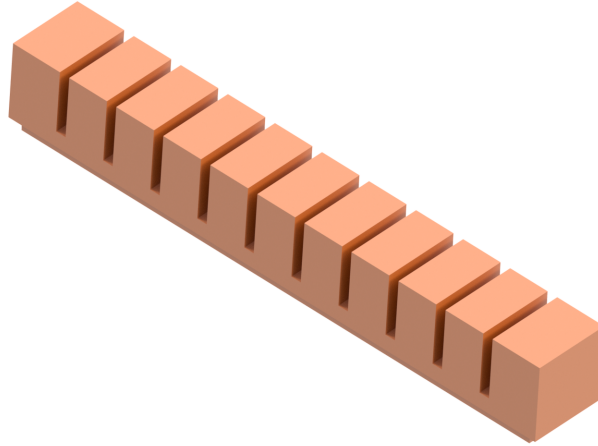


Figura 51: Vista isométrica del cuerpo principal del actuador neumático blando, primera iteración

En la Figura 52, también se presenta una vista isométrica del cuerpo principal del actuador blando, pero en este caso, enfocando la parte inferior del actuador. En esta figura, se puede visualizar el uso de protuberancias de 2 mm de alto entre cada cámara, cuya función es facilitar la posterior unión con la capa inextensible del actuador neumático blando.

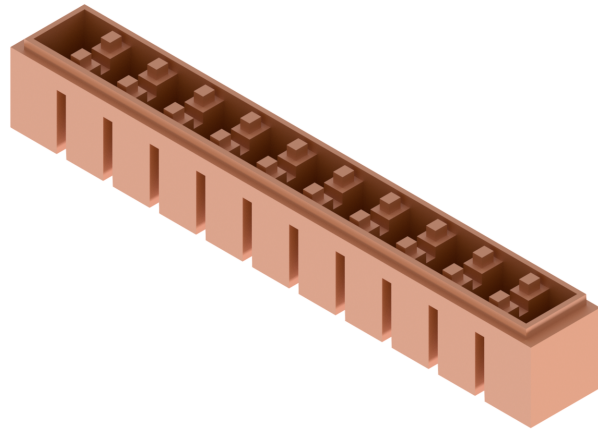


Figura 52: Vista isométrica inferior del cuerpo principal del actuador neumático blando, primera iteración

Una vez diseñado el cuerpo principal del actuador neumático blando, se empleó una estrategia de generación de cavidades para crear el molde que se utilizaría en su fabricación. En la Figura 53 se muestra el diseño final del molde, el cual fue concebido como un molde de dos piezas.

La razón por la cual se diseñó este molde como un molde de dos piezas fue porque de esta forma puede reproducirse con fidelidad la geometría compleja del cuerpo principal del actuador blando, evitando tener que romper el molde para retirar el componente moldeado.

Se colocaron aletas en las dos piezas que conforman este molde, para asistir al usuario en la separación de las piezas al intentar retirar el componente moldeado. En el centro de cada una de estas aletas se realizó un agujero de 3 mm de diámetro, el cual será utilizado para apretar las dos piezas con el uso de tornillos y tuercas M3, para evitar el filtrado de la mezcla de Ecoflex 00-30 en estado líquido.

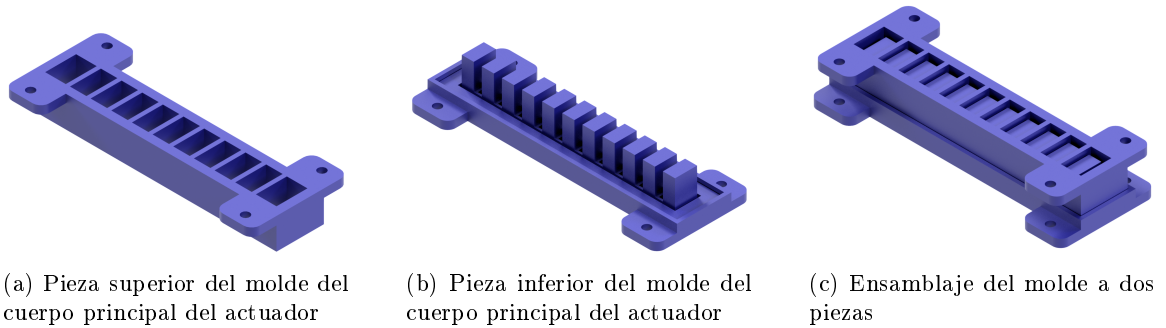


Figura 53: Molde del cuerpo principal del actuador neumático blando, primera iteración

A continuación, se diseñó la capa inextensible del actuador neumático blando, la cual se modeló como un prisma rectangular de 15 mm de ancho, 112 mm de largo y 4 mm de alto, el cual se presenta en la Figura 54.

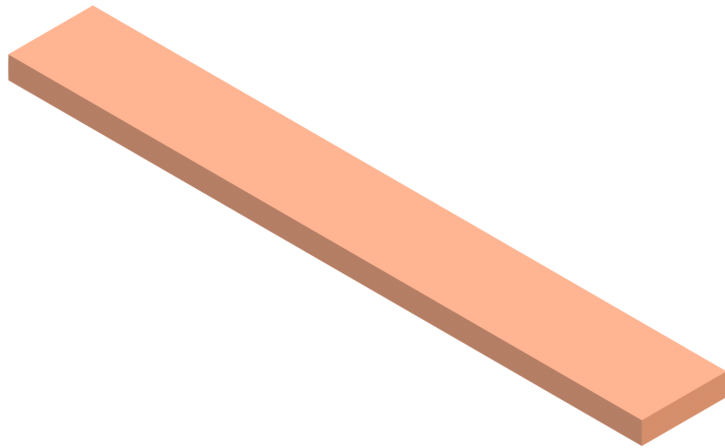


Figura 54: Vista isométrica de la capa inextensible del actuador neumático blando, primera iteración

Nuevamente, se utilizó esta pieza para obtener el molde de la capa inextensible del actuador neumático blando, el cual se presenta en la Figura 55.

Una vez finalizados los diseños de los moldes, fueron fabricados mediante impresión 3D. En la Figura 56a se presentan las piezas individuales que conforman los moldes, mientras que en la Figura 56b se presenta el molde ensamblado para el cuerpo principal del actuador neumático blando, y el molde para la capa inextensible del actuador.

Posteriormente, se utilizó Inventor para calcular el volumen total de este actuador blando, el cual fue de 19398 mm^3 . Utilizando el volumen específico del Ecoflex 00-30, dado en el Cuadro 1, se calculó que serían necesarios 22 g de Ecoflex 00-30 para poder fabricarlo.

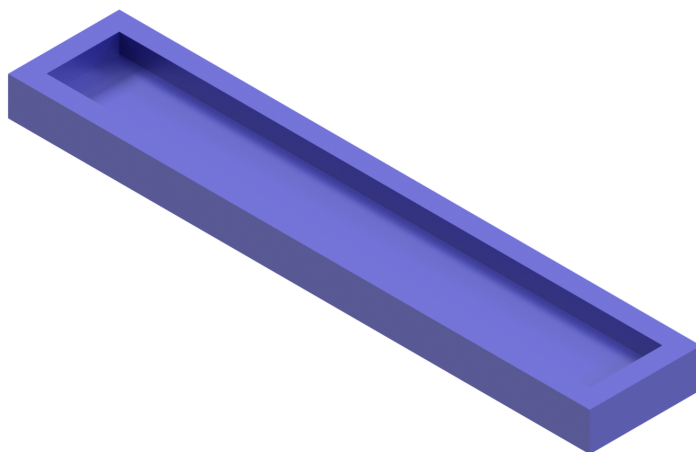
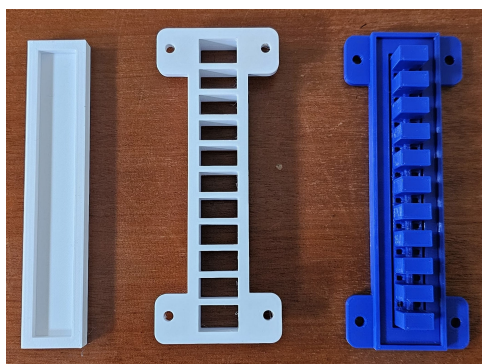
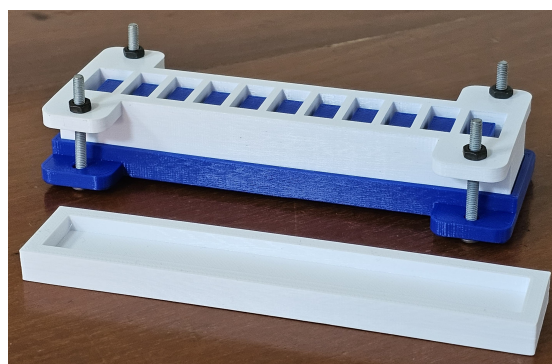


Figura 55: Vista isométrica del molde de la capa inextensible del actuador neumático blando, primera iteración



(a) Piezas que conforman el molde del actuador



(b) Molde ensamblado

Figura 56: Moldes para la fabricación del actuador neumático blando, primera iteración

Seguido de esto, se siguió la misma metodología para la fabricación de probetas descrita anteriormente para la preparación de la mezcla de Ecoflex 00-30, y una vez lista, se vertió en el molde del cuerpo principal del actuador blando hasta llenarlo en su totalidad. En el caso del molde de la capa inextensible del actuador, se vertió la mezcla de Ecoflex hasta abarcar la mitad del alto del molde, es decir, 1 mm.

El tiempo de curado de ambas partes del actuador fue de aproximadamente 4 horas. A continuación, se recortó una pieza de papel con un gramaje de 250 g/m^2 con el mismo largo y ancho del actuador blando, y se colocó cuidadosamente sobre la sección curada de la capa inextensible. Luego, se vertió el resto de la mezcla de Ecoflex 00-30 para cubrir la otra mitad del molde correspondiente a la capa inextensible. Finalmente, se retiró el cuerpo principal del actuador blando de su molde respectivo y se colocó sobre la mezcla aún sin curar en el molde de la capa inextensible, asegurando que ambas partes del actuador neumático blando se unieran sin generar fisuras, de forma continua y sin interrupciones.

En la Figura 57, se presenta el resultado final de esta iteración del actuador neumático blando.

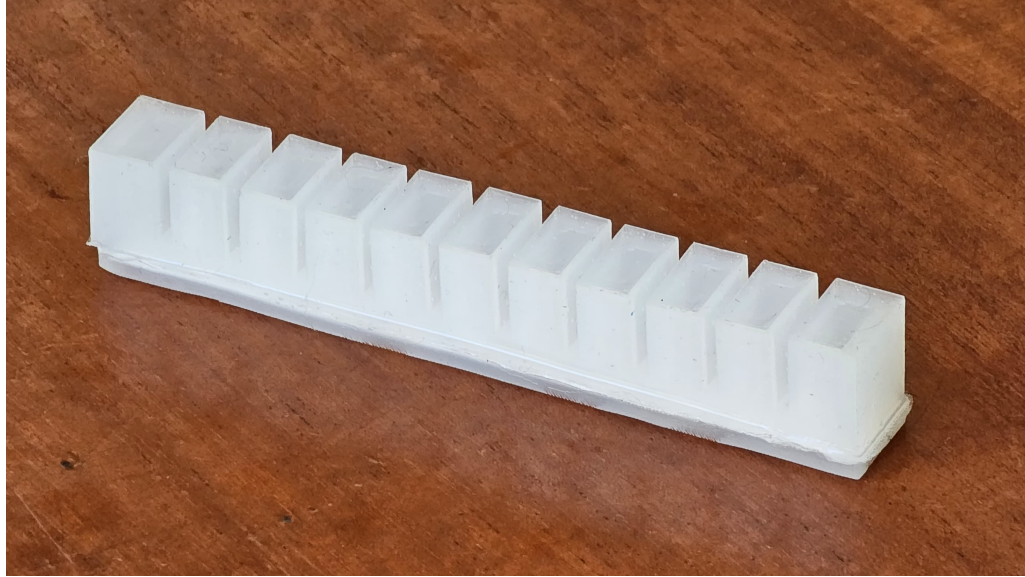


Figura 57: Actuador neumático blando resultante, primera iteración

El diseño de este actuador neumático blando implica punzar uno de los canales extremos del actuador para introducir una manguera, la cual será utilizada como la entrada de aire al actuador. La manguera seleccionada fue una manguera neumática Festo de 6 mm con presión máxima de operación de 1000 kPa, escogida debido a su disponibilidad local, tanto de la manguera, como de los diferentes accesorios de conexión para la misma.

Sin embargo, al intentar punzar el actuador, se observó que la misma elasticidad del Ecoflex 00-30 dificultaba llevar a cabo este paso con precisión, obteniendo como resultado un agujero demasiado grande que no permitía una sujeción adecuada de la manguera.

Además, al inspeccionar el actuador, se observó que se produjeron burbujas en distintos puntos alrededor del conducto de alimentación de aire, y en las paredes de las cámaras del actuador. Algunas de estas burbujas fueron lo suficientemente grandes para formar agujeros desde el interior hasta el exterior del actuador, lo que tuvo como consecuencia que al realizar pruebas preliminares de funcionamiento utilizando una jeringa de 50 ml, el actuador no presentara la respuesta esperada.

La razón por la cual se produjeron burbujas sobre estas superficies pudo deberse a que el espacio disponible en el interior del molde era demasiado confinado, por lo que el aire atrapado dentro de este no tenía forma de escapar hacia la superficie del molde. Para solucionarlo, se decidió aumentar el área superficial de estas superficies en la segunda iteración de los moldes.

Por otro lado, el haber colocado una pieza de papel del mismo ancho y largo del actuador neumático blando en la capa inextensible produjo fisuras en el actuador, las cuales fueron incrementando en tamaño hasta separar las secciones de la capa inextensible. Por ello, en la segunda iteración, se decidió disminuir el ancho y el largo de la pieza de papel utilizada para la capa inextensible.

Por último, se encontró que la cantidad de Ecoflex 00-30 utilizada para unir el cuer-

po principal del actuador con la capa inextensible no fue suficiente, ya que ambas partes también empezaron a separarse tras realizar más pruebas preliminares de accionamiento del actuador. En la segunda iteración, se decidió aumentar el alto de la capa inextensible y de las protuberancias de acople del cuerpo principal del actuador, para mejorar la unión de ambas piezas al existir una mayor área superficial de contacto entre ellas.

Como tal, se concluyó que el diseño original de los moldes para fabricar un actuador neumático blando dado en [16] no fue adecuado para ser utilizado con la silicona Ecoflex 00-30. Por ello, se llevó a cabo una revisión de este diseño, enfocada en resolver los problemas mencionados anteriormente, para adaptarlo a la silicona utilizada en el presente trabajo de graduación. A continuación, se describen a detalle los cambios realizados en el diseño, y el resultado final de la fabricación del actuador neumático blando.

9.2. Segunda iteración

Para la segunda iteración, se tomó como base la geometría del actuador neumático blando diseñada en [16], y se buscó adecuarla para su uso con la silicona Ecoflex 00-30.

Además, se planteó como objetivo de diseño que el archivo del molde fuera fácilmente modificable en Inventor, permitiendo su reutilización para realizar iteraciones rápidas cuando se requieran ajustes en la geometría del actuador neumático blando o cuando se desee cambiar el material empleado en su fabricación.

Para cumplir este objetivo de diseño, se aumentó la cantidad de operaciones 3D que fueron resultado de bosquejos 2D sencillos y completamente definidos. También se buscó hacer los bosquejos sobre los planos principales de trabajo siempre que fuera posible, evitando así referencias bosquejos sobre planos que pudieran borrarse al hacer cualquier tipo de edición.

En el cuerpo principal del actuador, se mantuvo el mismo número de cámaras que en la primera iteración, pero se aumentó el largo de la primera cámara con una pared de 14 mm de grosor, la cual será utilizada para montar un soporte de sujeción sobre el actuador al construir la plataforma de pruebas. En esta pared, se colocó desde un principio un agujero de 3 mm, para evitar tener que punzar el actuador blando, lo que permitió un mejor ajuste a presión con la manguera de entrada de aire.

En esta nueva iteración, cada una de las cámaras tuvo 9 mm de largo, 18 mm de ancho y 18 mm de largo. Se decidió que el grosor de las paredes laterales de las cámaras aumentara a 2.5 mm, y el grosor de las paredes entre cámaras aumentó a un grosor de 1.5 mm. El espaciado entre cámaras se mantuvo de 2 mm, y el área transversal del conducto de alimentación cambió a $2 \times 3 \text{ mm}^2$.

El aumento del grosor de las paredes tuvo como objetivo aumentar la resistencia del actuador neumático blando al ser accionado, y el aumento de las áreas superficiales de las cámaras y el conducto de alimentación de aire se realizó para disminuir la cantidad de burbujas que puedan formarse en estas secciones. En la Figura 58, se presenta una vista isométrica del cuerpo principal de la segunda iteración del actuador.

El último cambio realizado en el cuerpo principal del actuador fue un ligero cambio de

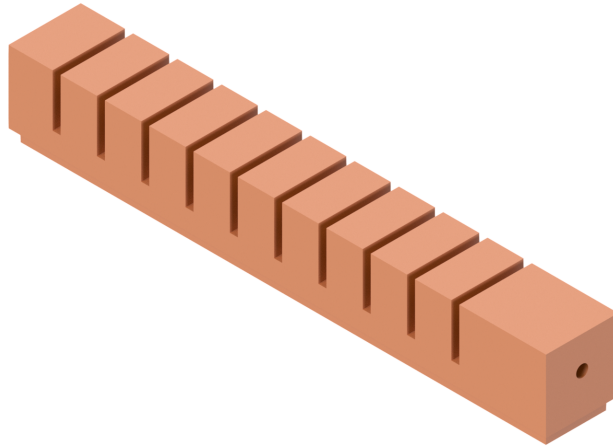
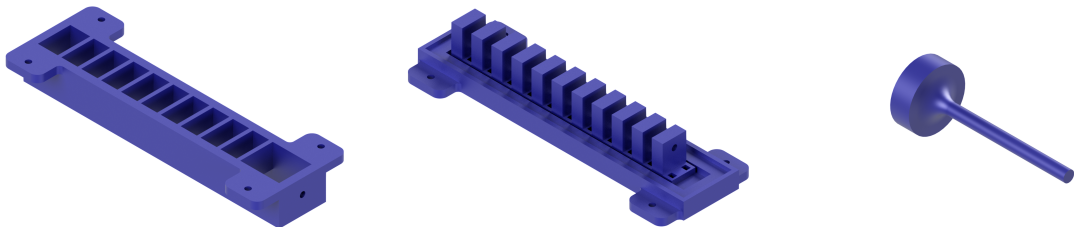


Figura 58: Vista isométrica del cuerpo principal del actuador neumático blando, segunda iteración

geometría en las protuberancias de agarre de la parte inferior, en donde se aumentó su alto a 3 mm, con el objetivo de mejorar la unión con la capa inextensible del actuador.

A continuación, se volvió a utilizar una estrategia de generación de cavidades para crear el molde que se utilizaría para fabricar el cuerpo principal del actuador. En esta ocasión, ya que se añadió con anticipación el agujero de alimentación de aire en el cuerpo principal del actuador, fue necesario diseñar un molde a tres piezas, las cuales se presentan en la Figura 59.



(a) Pieza superior del molde del cuerpo principal del actuador

(b) Pieza inferior del molde del cuerpo principal del actuador

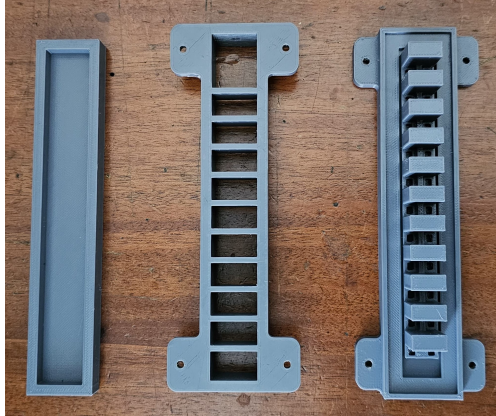
(c) pin del molde del cuerpo principal del actuador

Figura 59: Piezas que conforman el molde del cuerpo principal del actuador neumático blando, segunda iteración

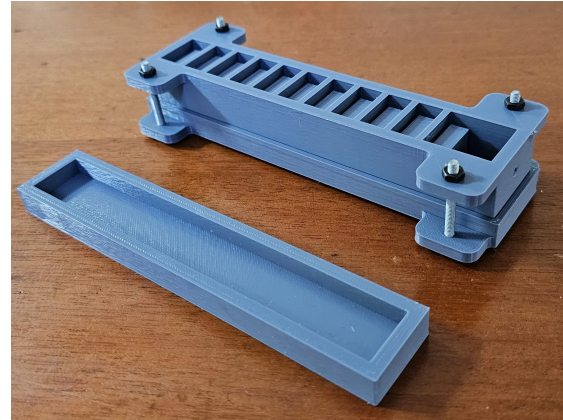
Una vez finalizados los diseños de los moldes, estos fueron fabricados mediante impresión 3D. En la Figura 60a se presentan las piezas individuales que conforman los moldes de la segunda iteración, mientras que en la Figura 60b se presenta el molde ensamblado para el cuerpo principal del actuador neumático blando, y el molde para la capa inextensible del actuador.

A continuación, se siguió la misma metodología descrita anteriormente para preparar la mezcla de Ecoflex 00-30. La fabricación del actuador neumático blando de esta segunda iteración se realizó en conjunto con la fabricación de las probetas para la máquina de ensayos, tal y como puede observarse en la Figura 30.

En esta iteración, también se recortó una pieza de papel con gramaje de 250 g/m²



(a) Piezas que conforman el molde del actuador



(b) Molde ensamblado

Figura 60: Moldes para la fabricación del actuador neumático blando, segunda iteración

para conformar la capa inextensible del actuador neumático blando, pero en esta ocasión se utilizó un ancho y un largo menores que los del actuador para mejorar la unión entre todas las partes.

En la Figura 61, se presenta el resultado final de esta iteración del actuador neumático blando.



Figura 61: Actuador neumático blando resultante, segunda iteración

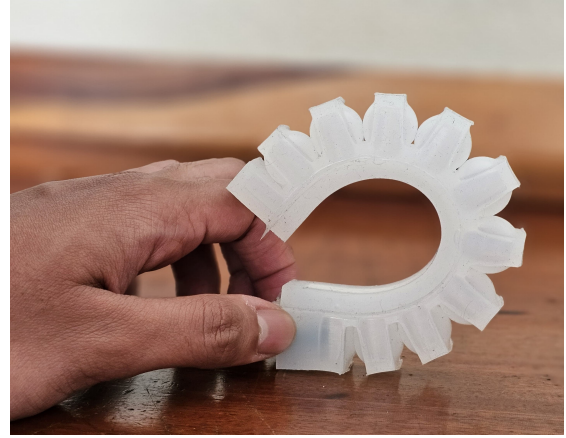
Al inspeccionar el actuador neumático blando resultante, se observó que la cantidad de burbujas que se produjeron en el mismo fue mínima, y con un tamaño insignificante en comparación con las que se produjeron en el actuador de la primera iteración. Con esto, se concluyó que el aumento del área superficial en las paredes del actuador y en el canal de alimentación de aire ayudó a disminuir la cantidad de burbujas producidas.

La incorporación del orificio para la manguera de entrada de aire durante la etapa de curado permitió un mejor ajuste a presión entre el actuador y la manguera, lo que resultó en un sellado más efectivo del actuador.

En general, se observó una mejor unión entre las partes que conforman el actuador neumático blando. En la Figura 62. se presenta el funcionamiento del actuador al realizarse pruebas preliminares utilizando una jeringa de 50 ml acoplada a una manguera para producir la entrada de aire. Estas pruebas preliminares tuvieron como objetivo verificar que no existieran filtraciones de aire en el actuador neumático blando.



(a) Accionamiento en el actuador con el émbolo de la jeringa en la marca de 20 ml



(b) Accionamiento en el actuador con el émbolo de la jeringa en la marca de 40 ml

Figura 62: Pruebas preliminares en el actuador neumático blando

Al verificar que el actuador neumático blando funcionó tal y como se esperaba, se concluyó que la geometría y las consideraciones de diseño planteadas para la segunda iteración del molde fueron adecuadas para una fabricación funcional del actuador utilizando la silicona Ecoflex 00-30.

En la Figura 62, se puede observar que la respuesta general del actuador neumático blando coincide con lo observado en la Figura 48 del capítulo anterior. Esto valida el resultado de dichas simulaciones.

En la Figura 63, se presentan pruebas preliminares del funcionamiento del actuador neumático blando, en este caso, funcionando como una pinza blanda. Estas pruebas tienen como objetivo demostrar una de las principales aplicaciones de los robots blandos, la cual es la manipulación de objetos frágiles o delicados sin causarles daño, ya que la flexibilidad y adaptabilidad del actuador permite que este se ajuste suavemente a la forma de los objetos, distribuyendo la presión de manera uniforme y disminuyendo el riesgo de daños.

Para una investigación futura, se recomienda utilizar el molde diseñado en el presente trabajo de graduación, y evaluar como modificaciones en su geometría (cantidad, tamaño y ángulo de las cámaras internas del actuador, por ejemplo) afectan la respuesta del actuador neumático blando resultante frente a una entrada de presión.

También se recomienda continuar la investigación evaluando como la fabricación de actuadores neumáticos blandos con siliconas de diferente dureza shore afectan su capacidad de desplazamiento total, la fuerza total que son capaces de producir, entre otras variables útiles para caracterizarlos.



Figura 63: Prueba preliminar del actuador neumático blando para la sujeción de un vaso

Diseño e implementación de una plataforma de pruebas para actuadores neumáticos blandos

Uno de los objetivos de la investigación en robótica blanda es encontrar aplicaciones prácticas en las cuales puedan integrarse los actuadores neumáticos blandos de manera efectiva. Para lograrlo, es necesario llevar a cabo una caracterización completa de la respuesta de dichos actuadores bajo diferentes condiciones de presión interna, para así entender y optimizar su comportamiento en función de las demandas específicas de cada aplicación. Además, esta caracterización permite comprender mejor cómo varía el comportamiento de los actuadores función de los parámetros de operación y facilita la optimización de su diseño para satisfacer las demandas específicas de cada caso de uso.

Por ello, en el presente trabajo de graduación se diseñó e implementó una plataforma de pruebas para actuadores neumáticos blandos, capaz de caracterizar propiedades como el desplazamiento máximo alcanzado y la fuerza generada en función de la presión interna aplicada. La plataforma incluye un marco que permite colocar una cuadrícula que facilite la medición precisa del desplazamiento total. Además, el módulo de medición de fuerza fue diseñado para colocarse y retirarse con facilidad, de modo que el usuario pueda alternar cómodamente entre pruebas de desplazamiento y de fuerza según sea necesario.

El desarrollo de esta plataforma de pruebas representa un paso fundamental hacia la comprensión y optimización de los acutadores nuemáticos blandos en aplicaciones prácticas. A su vez, los resultados que se obtendrán con esta plataforma no solo contribuirán a validar la funcionalidad de los actuadores en condiciones controladas, sino que también ofrecen una base sólida para futuras investigaciones, ampliando el potencial de integración de estos actuadores en aplicaciones del mundo real.

10.1. Diseño mecánico

La primera consideración del diseño mecánico de la plataforma de pruebas fue seleccionar la entrada de presión que sería utilizada para accionar el actuador neumático blando. Para ello, se optó por utilizar una jeringa de 60 ml, tal y como se recomienda en [16], debido a que las simulaciones realizadas anteriormente indicaron que no sería necesario alcanzar niveles de presión elevados, además de ser una solución sencilla y de bajo costo. Una vez decidido esto, se inició el proceso de diseño del módulo de entrada de presión de la plataforma de pruebas.

Para regular la presión, se decidió acoplar el émbolo de la jeringa a un motor paso a paso NEMA17 haciendo uso de una varilla roscada de 8 mm de diámetro. Se tomó esta decisión para aprovechar la alta precisión que ofrece un motor paso a paso. Además, al utilizar este sistema fue posible reutilizar algunas decisiones de diseño tomadas cuando se realizó la máquina de ensayos para elastómeros.

Este acople se diseñó utilizando técnicas de fabricación digital para luego ser impreso en 3D. Para mantener la orientación del acople, se decidió que este funcionara como un carrito móvil, utilizando ejes acerados como guías para el desplazamiento axial. Para unir el acople a los ejes acerados, se utilizaron cojinetes lineales LM8UU, los cuales son comúnmente utilizados para esta aplicación en el diseño de impresoras 3D, por ejemplo.

A continuación, utilizando técnicas de fabricación digital, se diseñó una base para la sujeción del motor paso a paso, y una base para la sujeción de la jeringa. Tanto la base de la jeringa como el acople del émbolo se diseñaron para mantener la jeringa en posición sujetándola a presión, lo que permite su fácil remoción en caso sea necesario cambiarla durante un mantenimiento. En la Figura 64, se presenta el resultado final del diseño del módulo de entrada de presión de la plataforma de pruebas.

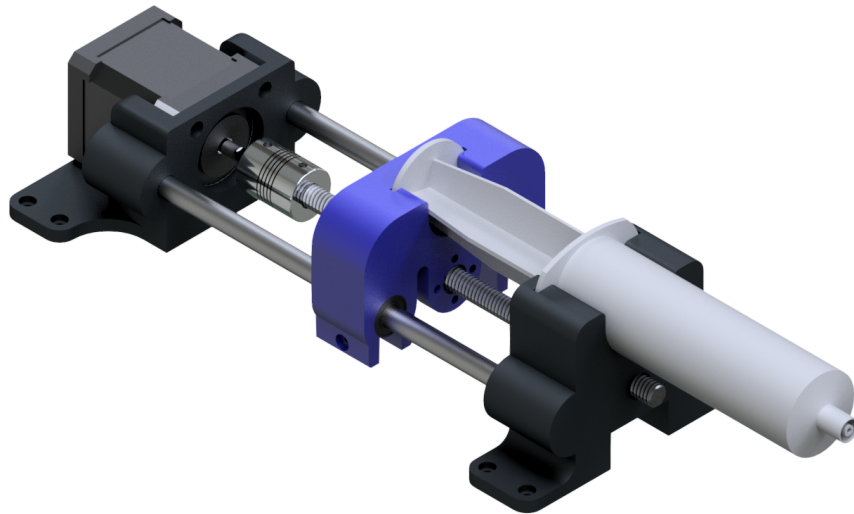


Figura 64: Módulo de entrada de presión de la plataforma de pruebas.

A continuación, se diseñó la base sobre la cual se montará el actuador neumático blando utilizando técnicas de fabricación digital. En este caso, se decidió diseñar una base que fuera funcional para el actuador neumático blando fabricado en el presente trabajo de graduación, pero que también pudiera utilizarse con las posibles variaciones del actuador neumático blando que puedan realizarse en investigaciones futuras.

En la sección de la superficie de la base donde se colocará el actuador neumático blando se colocaron ranuras transversales. Esto se realizó de esta forma para disminuir la cantidad de superficie que entra en contacto con el actuador cuando este no es accionado, con el objetivo de que la fricción que la base genera sobre el actuador se reduzca lo más posible. Esto será de utilidad para obtener resultados más precisos durante los análisis de desplazamiento total y fuerza máxima del actuador.

A continuación, se diseñó una pieza para la sujeción del actuador neumático blando. Esta pieza se une al actuador en el extremo en donde se colocó su entrada de aire, y tiene como objetivo restringir el movimiento de esta sección del actuador. La base del actuador se diseñó de tal forma que el sujetador del actuador pueda posicionarse en cualquier punto sobre la base, atornillándose y desatornillándose mediante tornillos tipo Allen M3. En la Figura 65, se presenta la base y el sujetador del actuador diseñados.

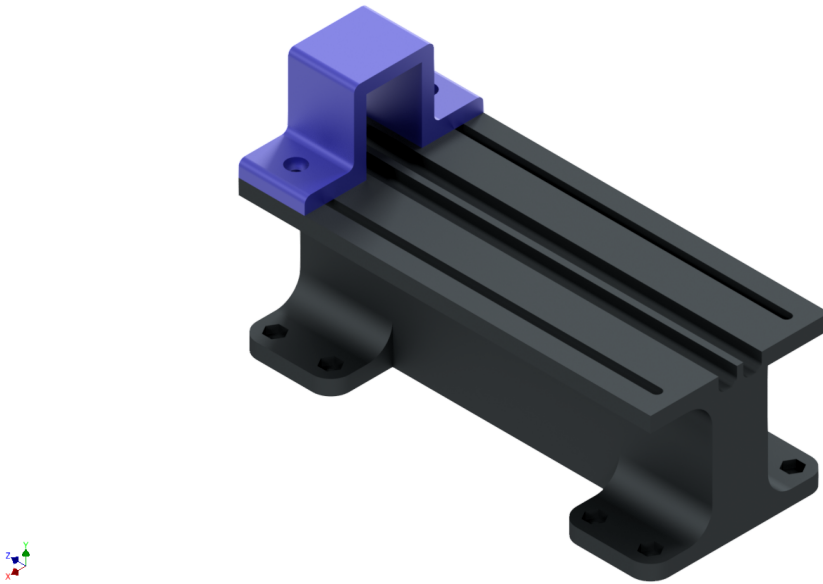


Figura 65: Base y sujetador del actuador neumático blando para la plataforma de pruebas

Luego, se diseñó el módulo de medición de fuerza de la plataforma de pruebas. Este módulo se diseñó de tal forma que pueda acoplarse y desacoplarse de la base del actuador neumático blando con facilidad mediante tornillos tipo Allen M3. Esto permite al usuario ejecutar análisis de desplazamiento total o de fuerza máxima del actuador con mayor comodidad.

Para la medición de fuerza, se decidió utilizar una celda de carga de 10 kg, lo que equivale a un rango de medición de hasta 98 N. La razón por la que se decidió utilizar una celda de carga fue por la experiencia adquirida en su uso tras implementar la máquina de ensayos a

tensión, por su alta precisión, y por ser un sensor de bajo costo disponible localmente en Guatemala.

De esta forma, un extremo de la celda de carga se fijó a un soporte diseñado utilizando técnicas de fabricación digital, y el otro se acopló a una pieza destinada a entrar en contacto con el actuador neumático blando para la medición de fuerza. En la Figura 66, se presenta el diseño final de este módulo de medición de fuerza.

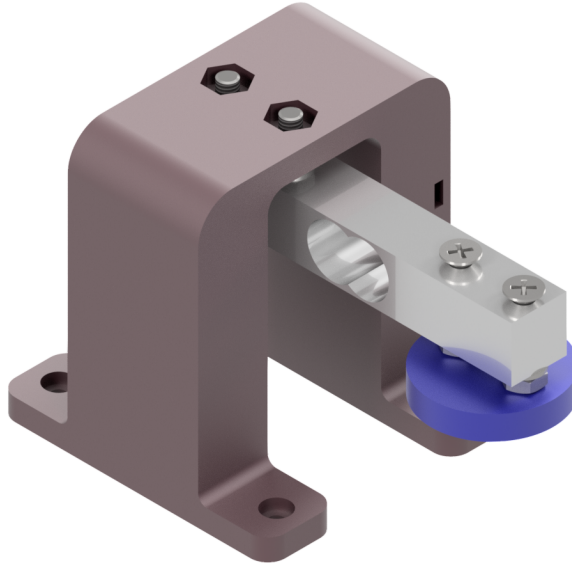


Figura 66: Módulo de medición de fuerza diseñado para la plataforma de pruebas

Por último, se diseñó la base de montaje de la plataforma de pruebas. Esta base se compone de tres secciones: La primera consiste en 4 ranuras que recorren toda la longitud transversal de la base, las cuales están destinadas a ser utilizadas para el montaje del módulo de entrada de presión y para la base del actuador neumático blando. La razón del uso de ranuras fue que estas permiten posicionar a conveniencia estos módulos sobre la plataforma de pruebas.

La segunda sección de la base de montaje consiste en dos ranuras que recorren la mitad de la sección transversal de la base, sobre las cuales está montado un marco. Este marco tiene la finalidad de sujetar una pieza de papel con un patrón cuadrícula, el cual servirá como un fondo durante los análisis de desplazamiento total del actuador.

La última sección de la base de montaje consiste en un patrón de agujeros de 3 mm de diámetro, el cual está destinado para la sujeción de la placa de circuito impreso de la plataforma de pruebas, y para sujetar cualquier otro componente que se añada en una investigación futura a la plataforma de pruebas.

Tanto la base de montaje como el marco de la cuadrícula se fabricaron utilizando la técnica de corte láser sobre una plancha de MDF de 6 mm de grosor. Se decidió utilizar la técnica de corte láser debido a que estas piezas no poseen perfiles tridimensionales, y se utilizó MDF debido a su disponibilidad en el laboratorio Makerlab de la Universidad del Valle de Guatemala. En la Figura 67 se presenta el resultado del diseño de la base de montaje y el marco de la plataforma de pruebas.

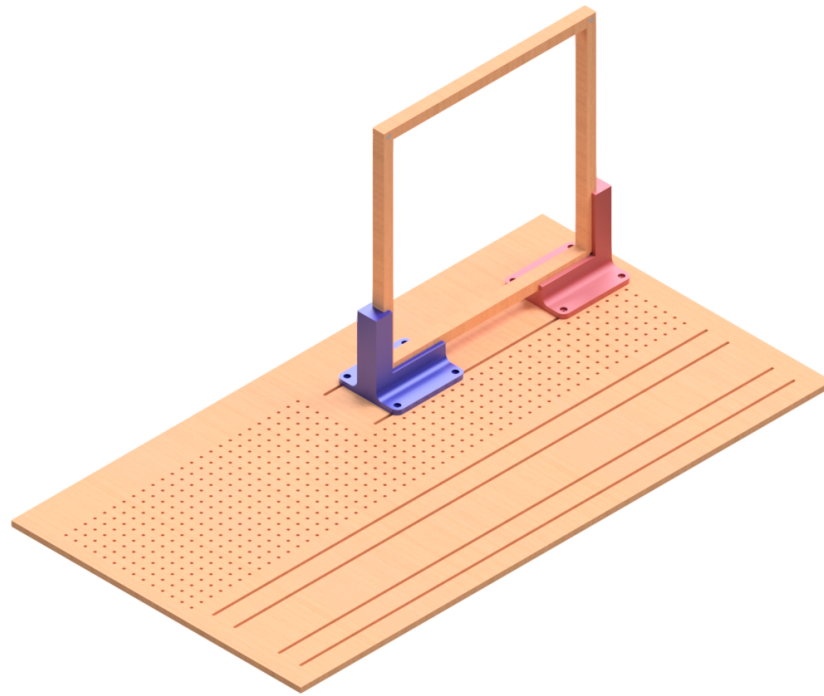


Figura 67: Base de montaje y marco de la plataforma de pruebas

En la Figura 68, se presenta el ensamblaje completo de todos los módulos y componentes de la plataforma de pruebas. En esta figura, el módulo de fuerza se encuentra acoplado a la base del actuador neumático blando, pero este está diseñado para removerse con facilidad.

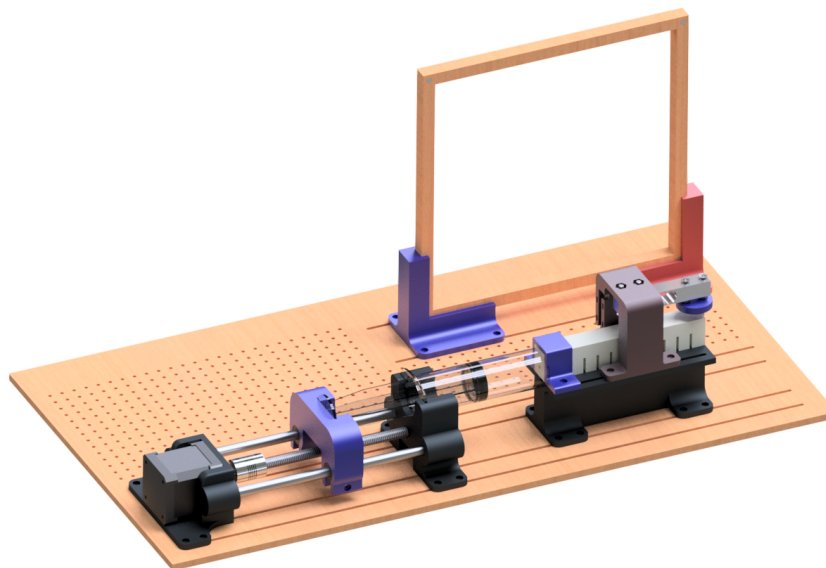


Figura 68: Ensamble general de la plataforma de pruebas

Una vez terminado el diseño de la plataforma de pruebas, se adquirieron los componentes que podían comprarse localmente y se manufacturaron las piezas destinadas a realizarse mediante impresión 3D en el laboratorio Makerlab de la Universidad del Valle de Guatemala. El resultado final del ensamblaje físico de la plataforma de pruebas puede observarse en la Figura 69.

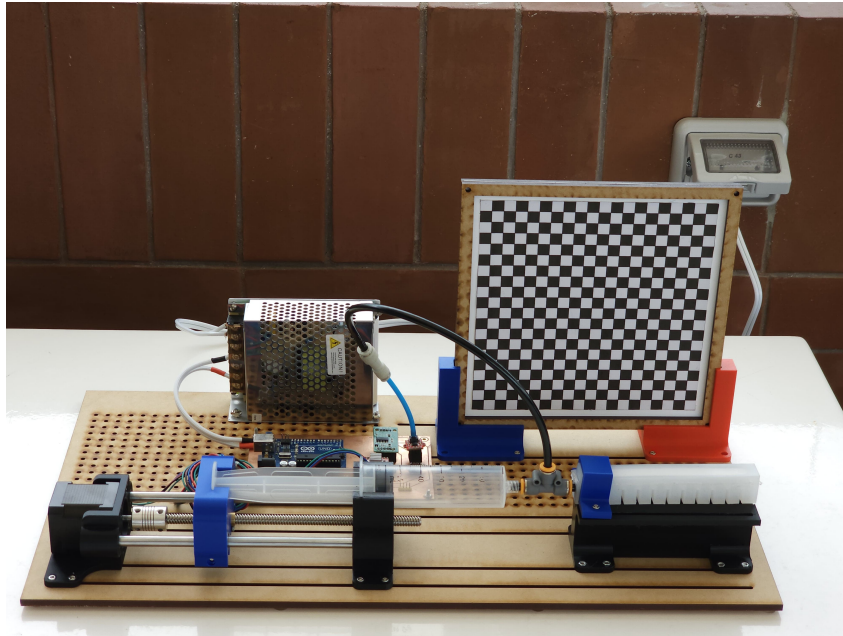


Figura 69: Ensamble físico de la plataforma de pruebas

10.2. Diseño electrónico

En la Figura 70, se presenta el diagrama electrónico utilizado para la plataforma de pruebas. Este circuito electrónico comparte similitudes con el realizado para la máquina de ensayos, el cual puede observarse en la Figura 18.

Por ejemplo, en este circuito también se utiliza un controlador HX711 para amplificar el voltaje recibido por el puente Whitestone de la celda de carga, y un controlador A4988 para operar el motor paso a paso. Nuevamente, este controlador es alimentado por una fuente de voltaje de 24 V, pero en esta ocasión se configuró para utilizar una resolución de micropasos de $1/4$, esto con el objetivo de regular con mayor precisión la entrada de presión de la plataforma de pruebas.

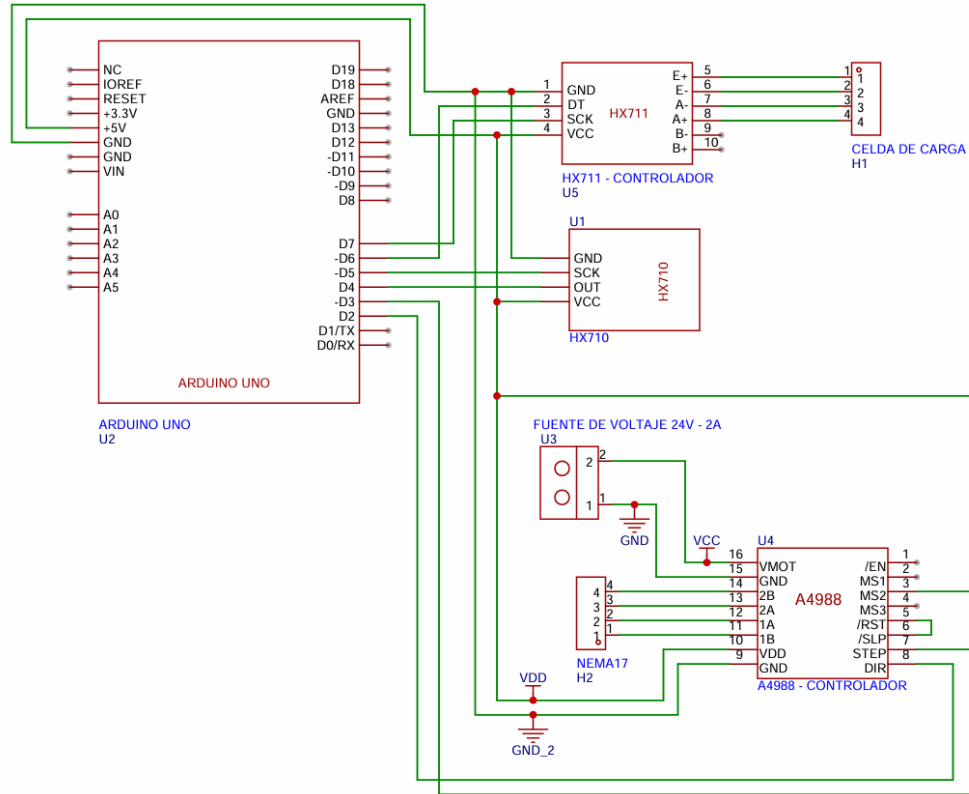


Figura 70: Diagrama electrónico de la plataforma de pruebas

Para el control de la presión interna del actuador en la plataforma de pruebas, se utilizó un sensor de presión diferencial con un módulo HX710, a través del cual puede medirse presión en un rango de aproximadamente -20 a 23 kPa con una resolución de 24 bits. Para esta aplicación, el rango de presión útil es de 0 a 20 kPa. Se decidió utilizar este sensor de presión ya que es el único disponible localmente en Guatemala con un precio reducido. Este sensor fue calibrado utilizando un sensor de presión Pasco, disponible en los laboratorios de física de la Universidad del Valle de Guatemala.

En el diagrama de la Figura 70, se utilizaron conectores de 4 pines para representar la conexión con el módulo de medición de fuerza, el cual puede desacoplarse de este circuito cuando está siendo utilizado. Además, se utilizó un conector de tornillo de 2 pines para representar la conexión con la fuente de voltaje de 24 V.

En esta ocasión, el microcontrolador utilizado para operar la plataforma de pruebas fue un Arduino UNO. Aunque la operación del circuito electrónico de la plataforma de pruebas es similar a la de la máquina de ensayos implementada anteriormente, y en el Cuadro 3 se consideró al ESP32 una mejor opción por encima del Arduino UNO, se escogió este último microcontrolador para la plataforma de pruebas debido a que en esta ocasión es necesario alimentar el controlador HX710 con un voltaje de 5 V, algo que el Arduino UNO es capaz de hacer nativamente, pero el ESP32 no.

A continuación, se desarrolló e implementó una placa de circuito impreso, cuya disposición de componentes se presenta en la Figura 71. Al igual que en el diseño de la placa de

circuito impreso de la máquina de ensayos, se utilizó el software de código abierto EasyEDA para el diseño de esta placa, la cual fue manufacturada en el laboratorio Makerlab de la Universidad del Valle de Guatemala.

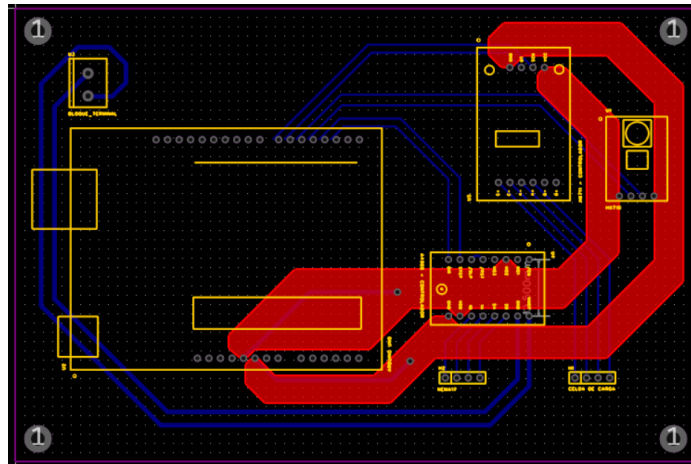


Figura 71: Disposición de componentes en la PCB de la plataforma de pruebas

El ancho de las pistas de esta placa de circuito impreso se calculó de acuerdo con la máxima corriente que podría circular en ellas, y se utilizaron polígonos para conectar el voltaje de alimentación y la puesta a tierra de cada uno de los controladores en la placa. El resultado de la implementación física se presenta en la Figura 72

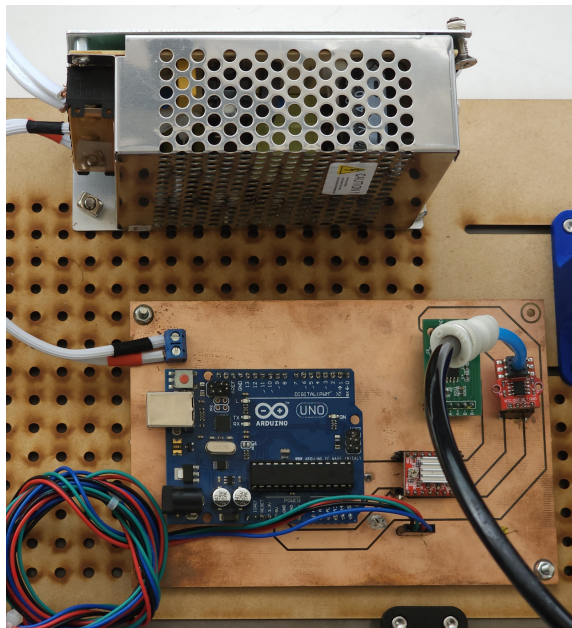


Figura 72: Placa de circuito impreso integrada en la plataforma de pruebas

10.3. Programación del microcontrolador y diseño de la aplicación de control de la plataforma de pruebas

Para controlar la plataforma de pruebas, se diseñó una aplicación utilizando la herramienta de creación de aplicaciones de MATLAB. En la Figura 73, se presenta la interfaz de usuario diseñada para la aplicación.

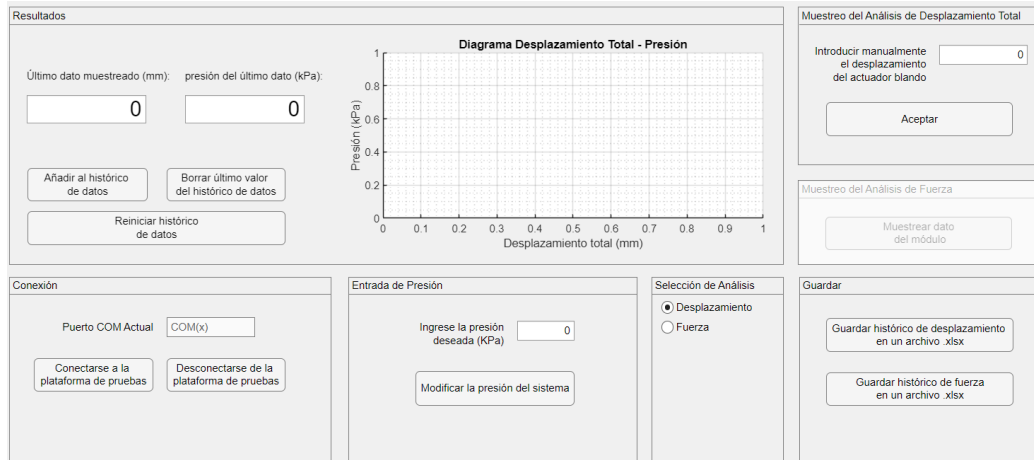


Figura 73: Interfaz de usuario de la aplicación de control de la plataforma de pruebas

Al igual que en la aplicación de control de la máquina de ensayos, esta aplicación envía los comandos recibidos por el usuario al microcontrolador de la plataforma de pruebas vía comunicación serial, utilizando el formato de texto JSON.

Esta aplicación se dividió en 7 paneles, o apartados, cada uno diseñado para representar uno de los a seguir para ejecutar un análisis. El primero de ellos, el apartado de conexión, permite la conexión y desconexión automática a la plataforma de pruebas, además de presentar el puerto COM al cual la plataforma de pruebas está conectada.

El apartado de entrada de presión permite al usuario modificar la presión interna dentro del actuador. Para que funcione adecuadamente, la plataforma debe estar conectada a un actuador para formar un circuito neumático cerrado. En el presente trabajo de graduación no se desarrolló un método para que la plataforma de pruebas identifique si el sistema neumático está abierto, por lo que se recomienda añadir este método en futuras iteraciones.

En el apartado de selección de análisis, el usuario puede alternar entre la ejecución de un análisis de desplazamiento o de fuerza. En el caso del análisis de fuerza, el módulo de medición de fuerza debe estar conectado a la plataforma de pruebas para poder llevarse a cabo. La aplicación detectará automáticamente si este módulo está o no está conectado.

En el apartado de muestreo del análisis de desplazamiento total, el usuario debe ingresar el desplazamiento producido por el actuador neumático blando luego de cambiar su presión interna. Esto debe realizarse de esta forma debido a que la plataforma de pruebas no posee un sistema de análisis de video propio, por lo que su inclusión se recomienda para futuras iteraciones del proyecto. En el apartado de muestreo del análisis de fuerza, la plataforma de

pruebas tomará una medición del módulo de fuerza de manera automática.

Una vez muestreados los datos del análisis, el usuario puede decidir si añadirlos al histórico de datos del análisis en el apartado de resultados. El usuario también puede borrar el último valor del histórico de datos o reiniciar el histórico. En este apartado, también puede visualizarse un histograma de desplazamiento total - presión interna, o un histograma de fuerza - presión interna, dependiendo del análisis seleccionado.

Por último, el apartado de guardar permite guardar los históricos de desplazamiento total o fuerza en un archivo .xlsx.

El código del microcontrolador fue desarrollado utilizando el entorno Arduino IDE, versión 2.0.0. Se emplearon diversas librerías, como HX711 para la lectura de la celda de carga, AccelStepper para el control del motor paso a paso Nema 17, y ArduinoJson para la gestión de la comunicación entre la máquina y la aplicación móvil. El código también incluye mecanismos para manejar errores en la deserialización de comandos JSON, garantizando la fiabilidad del sistema.

10.4. Ejecución y validación del análisis de desplazamiento total de un actuador neumático blando

Una vez implementada la plataforma de pruebas, se decidió evaluar su funcionamiento llevando a cabo un análisis de desplazamiento total utilizando el actuador neumático blando fabricado anteriormente. Para ello, se colocó el actuador sobre la base de la plataforma, tal y como se observa en la Figura 69. Después, se colocó una cámara frente a la plataforma de pruebas haciendo uso de un trípode, la cual fue utilizada para la captura del desplazamiento del extremo libre del actuador en el rango de presiones en el que se evaluó, el cual fue de 0 a 20 kPa.

A continuación, se encendió la plataforma de pruebas y, mediante la aplicación de control, se seleccionó la opción de análisis de desplazamiento. Una vez configurado el análisis, se registró manualmente el desplazamiento del actuador a medida que se incrementaba la presión interna en intervalos de 0.5 kPa, dentro del rango de presiones previamente establecido.

Para medir el desplazamiento del actuador, se aguardó hasta que este se estabilizara tras cada incremento de presión interna. Una vez estático, se capturó una fotografía, la cual fue importada a la herramienta de análisis de video Tracker para medir el desplazamiento total del extremo libre del actuador en ese momento. Los valores obtenidos se registraron en la aplicación de control, y el proceso se repitió hasta alcanzar una presión interna máxima de 20 kPa. En la Figura 74, se presenta la colocación del eje de coordenadas y la vara de calibración utilizada en tracker para la fotografía tomada en donde el actuador tenía una presión interna de 0 kPa.



Figura 74: Sistema utilizado en Tracker para la medición de desplazamiento del actuador neumático blando, en donde el actuador neumático blando tenía una presión interna de 0 kPa

En la Figura 75, se presenta el desplazamiento total del actuador neumático blando al alcanzar la presión de 20 Kpa. En esta figura, se observa que el comportamiento cinemático del actuador es similar a lo esperado según la simulación observada en la Figura 48, sin embargo, en el resultado experimental no se logró abarcar el mismo rango de movimiento que en la simulación, a pesar de que en esta se predijo que el actuador alcanzaría el rango de movimiento máximo a una presión interna de 5 kPa.

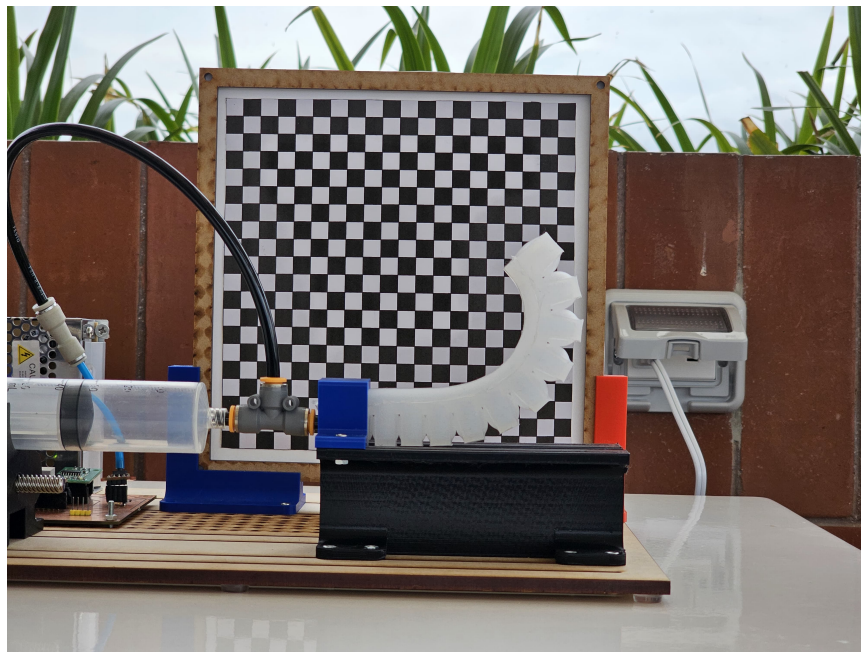


Figura 75: Desplazamiento total del actuador neumático blando con una presión interna de 20 kPa

La razón por la que no se logró alcanzar el rango de movimiento máximo en el resultado experimental del desplazamiento del actuador neumático blando fue debido a que el rango de presiones que el sensor utilizado para la plataforma de pruebas era capaz de medir fue

más bajo de lo que realmente se necesitaba, por lo que utilizando la plataforma de pruebas no fue posible seguir incrementando la presión interna en el actuador hasta abarcar todo su rango de movimiento, a diferencia de lo observado en las pruebas preliminares de la Figura 62. Es por ello que se recomienda para una futura interacción del diseño de la plataforma de pruebas, la implementación de un sensor de presión con un mayor rango de medición que el utilizado originalmente, con el objetivo de poder realizar un análisis de desplazamiento completo de los actuadores evaluados.

El hecho de que en el experimento físico el actuador requiriera más de 20 kPa para alcanzar su rango máximo de movimiento, mientras que en la simulación lo lograra con solo 5 kPa, evidencia que los supuestos utilizados en las simulaciones simplificaron excesivamente las condiciones reales de operación del actuador neumático blando. Por ello, como se indicó en el capítulo correspondiente, se recomienda que futuras iteraciones de esta investigación exploren métodos avanzados de optimización computacional que permitan incorporar todas las variables y condiciones relevantes que afectan la respuesta de estos actuadores.

En la Figura 76, se presenta el diagrama de desplazamiento total vs. presión interna obtenido tras la finalización del análisis de desplazamiento realizado.

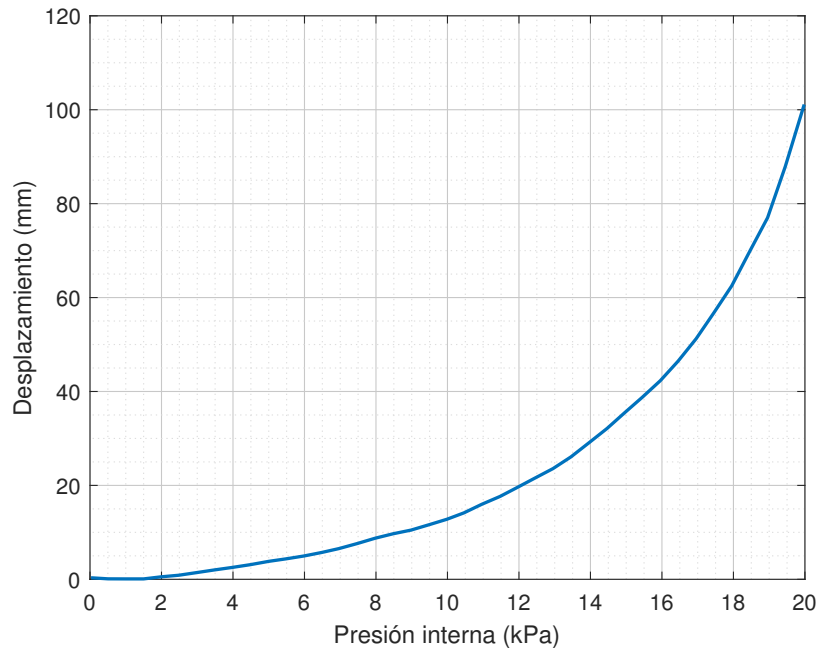


Figura 76: Diagrama de desplazamiento total vs. presión interna del extremo libre del actuador evaluado en un rango de presiones de 0 a 20 kPa

El comportamiento mostrado en la Figura 76 destaca una respuesta no lineal del actuador neumático blando frente a los incrementos de presión interna. Esta respuesta se debe principalmente a las propiedades intrínsecas del material y a la geometría del actuador.

En las primeras etapas del aumento de presión, la deformación es relativamente limitada debido a que las cámaras internas del actuador requieren superar la rigidez inicial del material

y las posibles restricciones geométricas impuestas por el diseño del canal. A medida que la presión aumenta, el material comienza a deformarse de manera más pronunciada, ya que el aumento de volumen en las cámaras genera esfuerzos internos que provocan una mayor expansión.

La no linealidad también puede atribuirse a factores como la interacción entre la capa expansible y la capa inextensible del actuador. La capa inextensible restringe parcialmente la expansión, dirigiendo la deformación hacia movimientos específicos, como la flexión.

Por último, es importante considerar que la no linealidad observada también está influenciada por la progresiva acumulación de energía interna en el material y por el diseño estructural del actuador, que puede favorecer una deformación más pronunciada a presiones mayores.

Con estos resultados, se concluyó que la plataforma de pruebas fue capaz de llevar a cabo un análisis de desplazamiento parcial del actuador neumático blando, debido a que el rango de presiones que la plataforma era capaz de medir no permitió abarcar por completo el rango de movimiento posible en el actuador. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron de utilidad para caracterizar la respuesta cinemática del actuador frente a un amplio rango de presiones internas.

A continuación, se deseó validar también el módulo de fuerza de la plataforma de pruebas llevando a cabo un análisis de fuerza sobre actuador neumático blando. Sin embargo, esto no pudo lograrse debido a que, con el rango de presiones que la plataforma de pruebas era capaz de producir, el actuador no podía producir una magnitud de fuerza lo suficientemente alta como para no considerarse despreciable. Por ello, para validar el análisis de fuerza de la plataforma de pruebas, se recomienda nuevamente cambiar el sensor de presión utilizado por uno con un mayor rango de medición en futuras iteraciones de esta investigación.

Redacción de manuales de uso para la máquina de ensayos y la plataforma de pruebas

En este capítulo, se presenta el desarrollo de los manuales de usuario para la máquina de ensayos y para la plataforma de pruebas, los cuales son esenciales para comprender el funcionamiento y la operación de estos equipos. Así, ambos manuales tienen como objetivo proveer instrucciones claras y precisas que faciliten el manejo adecuado de la máquina de ensayos y la plataforma de pruebas, asegurando de esta forma un óptimo desempeño, la seguridad de los usuarios y la durabilidad de los equipos.

La importancia de estos manuales radica en que permiten a los usuarios comprender la funcionalidad, el alcance y las limitaciones de cada componente de la máquina de ensayos y la plataforma de pruebas. Además, ayudan a estandarizar procedimientos y reducen la probabilidad de errores operativos, ofreciendo una referencia confiable ante cualquier duda en su uso.

La elaboración de los manuales también responde a la necesidad de documentar y transferir conocimiento técnico de manera accesible y estructurada, facilitando la incorporación de nuevos usuarios a la línea de investigación planteada en el presente trabajo de graduación.

A continuación, se describen los métodos seguidos para redactar ambos manuales de usuario.

11.1. Investigación preliminar para la redacción de los manuales

El primer paso para la redacción de ambos manuales fue una investigación previa de los manuales que usualmente acompañan algunos dispositivos usados en el día a día, como telé-

fonos, computadoras, o televisores. También se investigaron manuales técnicos, en específico, el manual de usuario del robot colaborativo DOBOT CR10 [30].

La razón por la cual se realizó esta investigación fue para identificar las secciones que normalmente componen estos manuales, para incluirlas también en la redacción de los manuales de la máquina de ensayos y la plataforma de pruebas. De esta forma, se aseguró que los manuales redactados en el presente trabajo de graduación fueran lo suficientemente descriptivos como para explicar al usuario toda la información relevante acerca de la máquina de ensayos y de la plataforma de pruebas

Así, se decidió incluir en ambos manuales una sección de introducción, una sección para empezar, una de partes del equipo, una de descripción del software de control, secciones de descripción paso a paso del uso de los equipos, de seguridad, de mantenimiento, una sección de soporte técnico, una de más información, y una de solución de problemas.

11.2. Redacción del contenido de los manuales

Para la redacción del contenido, se escogió utilizar el editor de texto Microsoft Word, debido a su facilidad de uso, y a su disponibilidad en el paquete de Microsoft ofrecido en la Universidad del Valle de Guatemala. A continuación, se decidió diseñar una plantilla que pudiera adaptarse al contenido de ambos manuales, para así mantener una concordancia estética y estructural entre ellos.

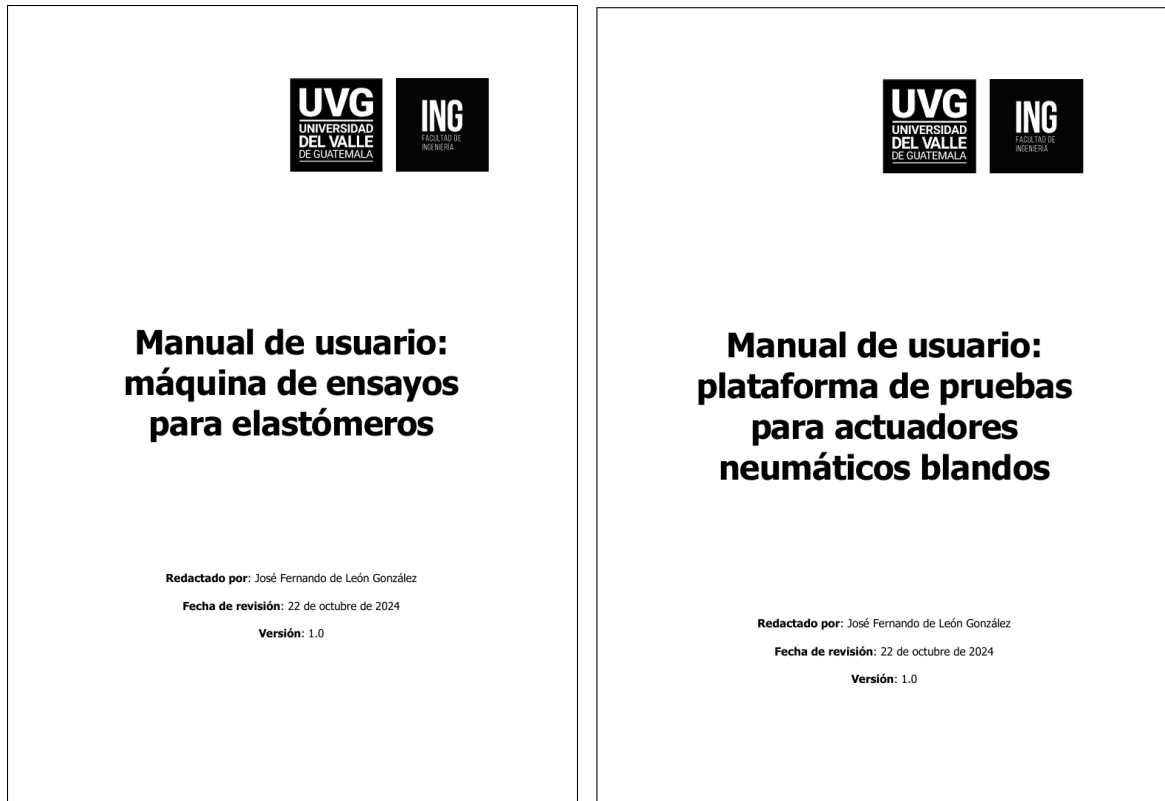
Ambos manuales fueron redactados uno a continuación del otro, empezando por la redacción del manual de la máquina de ensayos, y finalizando con la redacción del manual de la plataforma de pruebas.

En la Figura 77, se presentan las portadas de ambos manuales de usuario. La decisión de utilizar un diseño simple y monocromático se inspiró en la investigación preliminar realizada de manuales que acompañan algunos dispositivos comerciales.

En la sección de introducción de ambos manuales, se dio una breve descripción de qué hace cada uno de los equipos, el propósito de cada manual, su alcance, y en especial, la audiencia objetivo. Se decidió que para el manual de ambos equipos, la audiencia objetivo fueran estudiantes, catedráticos e investigadores de la Universidad del Valle de Guatemala, ya que se espera que estos sean los principales interesados en el uso de la máquina de ensayos y de la plataforma de pruebas. Por último, se incluyó una breve subsección en ambos manuales donde se especifica el historial de la documentación, es decir, la cantidad de versiones disponibles hasta la fecha.

En la sección para empezar de los manuales, se especificaron los requerimientos del sistema para descargar y usar ambas aplicaciones de control de los equipos, y se describió una breve guía de instalación de dichas aplicaciones. A continuación, se describió una guía de instalación del hardware de ambos equipos.

A continuación, en la sección de partes del equipo de cada manual, se enlistaron los componentes más importantes de dichos equipos. Únicamente se enlistaron los componentes que fueron mencionados más adelante en cada uno de los manuales, de forma que el usuario



(a) Portada del manual de la máquina de ensayos (b) Portada del manual de la plataforma de pruebas

Figura 77: Portadas de los manuales realizados

sepa explícitamente a qué componente se refieren en cada mención subsecuente.

Luego, se añadió una sección en ambos manuales sobre la descripción y el uso de las aplicaciones de control de los equipos. En esta sección, se describió cada uno de los apartados que componen a las aplicaciones, y en los casos donde fue necesario, se incluyó una guía sobre como realizar procesos correctamente (como en el apartado de recalibrar, de la máquina de ensayos). En estas guías, se incluyeron ecuaciones e imágenes a color para facilitar la comprensión de las instrucciones al usuario. En la Figura 78, se presenta un fragmento de esta sección, extraída del manual de la máquina de ensayos.

Después, en el caso del manual para la máquina de ensayos, se incluyó una sección sobre cómo llevar a cabo un ensayo, y una sección sobre cómo obtener los datos de elongación de la probeta luego de un ensayo utilizando la herramienta de análisis de video Tracker. En el caso del manual de la plataforma de pruebas, se incluyó una sección de cómo se debe preparar la plataforma de pruebas para realizar un análisis, y una sección de cómo obtener los datos de desplazamiento de un análisis utilizando Tracker. Estas secciones tienen como objetivo asistir al usuario sobre el correcto uso de ambos equipos.

Posteriormente, se añadió una sección con recomendaciones de seguridad en ambos manuales, de manera que se reduzcan los riesgos durante el uso de ambos equipos, tanto para el usuario como para la máquina de ensayos y la plataforma de pruebas.



Figura 78: Fragmento del apartado de descripción y uso de la aplicación de control de la máquina de ensayos

A continuación, se añadió una sección de instrucciones para el mantenimiento correctivo y preventivo en ambos manuales, seguida de una sección de soporte técnico, en donde se incluyó información de contacto en caso de cualquier duda por parte del usuario.

En la sección de más información de ambos manuales, se presenta una breve lista de los componentes de cada equipo, en conjunto con una tienda o distribuidor local que posee el componente en el momento de la entrega del presente trabajo de graduación, y un hipervínculo de compra para volver a adquirir el repuesto.

En la Figura 79, se presenta la sección de soporte técnico y un fragmento de la sección de más información del manual de la máquina de ensayos.

Por último, ambos manuales terminan con una sección de solución de problemas, en donde se plantean los problemas más frecuentes que el usuario pueda encontrar durante el uso de los equipos, seguidos de una recomendación de cómo solucionarlos.

Una vez finalizados los manuales, se pusieron a prueba al pedirle a estudiantes de Ingeniería

9. Soporte técnico

La máquina de ensayos fue construida por José Fernando de León González, como parte del proyecto de graduación para la carrera de ingeniería mecatrónica. Puede contactarlo a través del correo electrónico josefernandodeleon14@gmail.com

El laboratorio Makerlab de la Universidad del Valle de Guatemala ofrece servicios especializados en corte láser, impresión 3D y fabricación de PCB. Puede obtener más información de este laboratorio accediendo al siguiente enlace: <https://sites.google.com/view/makerlabuvg/home>

10. Más información

Cuadro 1. Lista de componentes de la máquina de ensayos

Descripción	Tienda/ distribuidor	Link de compra
Motor paso a paso NEMA17	Electrónica DIY	Motor Stepper Nema 17 84onz.in - Electrónica DIY Guatemala (electronicadiv.com)
Driver A4988	Electrónica DIY	Driver A4988 (CNC o Impresora 3D) - Electrónica DIY Guatemala (electronicadiv.com)
Varilla roscada T8 de 400 mm con tuerca trapezoidal	La Electrónica	Varilla roscada con tuerca trapezoidal T8 de 400mm x 8mm - Guatemala (laelectronica.com.gt)
Acople flexible 5x8 mm	TETSA	ACOPLE FLEXIBLE 5X8MM PRINT 3D Tetsa - Tienda
Celda de carga de 20 kg y módulo HX711	TETSA	SENSOR DE PESO HX711 CON CELDA DE 20KG Tetsa - Tienda
Eje Acerado 500 x 8 mm	La Electrónica	Eje acerado liso de 500mm x 8mm - Guatemala (laelectronica.com.gt)
Cojinete lineal 8 mm LM8UU	La Electrónica	Cojinete lineal LM8UU de 8mm - Guatemala (laelectronica.com.gt)
Tornillo hexagonal M10x25	Novex	Tornillo hexagonal metrico m10 x 25 negro - Rosca milimetrica hierro negro (novex.com.gt)

Figura 79: Apartado de soporte técnico y fragmento del apartado de más información del manual de la máquina de ensayos

Mecatrónica que los leyeran, y que intentasen seguir las guías descritas para llevar a cabo un ensayo de tensión, en el caso del manual para la máquina de ensayos, y un análisis de fuerza y de desplazamiento, en el caso de la plataforma de pruebas. En estas pruebas, la mayoría de los estudiantes fue capaz de completar los ensayos y los análisis, requiriendo poca ayuda adicional de la que se encuentra disponible en los manuales.

A continuación, se pidió a los estudiantes retroalimentación sobre qué cambios podrían realizarse en los manuales para mejorar su claridad, y se iteró sobre estos hasta que fueran lo más detallados posible.

Con los resultados de estas pruebas, se validó la efectividad de los manuales para permitir a nuevos usuarios el uso de la máquina de ensayos y la plataforma de pruebas. Aun así, se recomienda mantenerlos actualizados si se realizan cambios en estos equipos en futuros trabajos relacionados a la línea de investigación iniciada en el presente trabajo de graduación.

- La implementación de la máquina de ensayos a tensión para elastómeros permitió caracterizar el comportamiento mecánico de la silicona Ecoflex 00-30, demostrando ser capaz de realizar mediciones precisas en ensayos a tensión pura con un porcentaje de error inferior al 10 %.
- Se simuló un actuador neumático blando al ajustar los datos experimentales de un ensayo a tensión al modelo de hiperelasticidad Ogden de tercer grado, donde se observó que el actuador diseñado fue capaz de alcanzar un desplazamiento máximo de 173.96 mm y soportar un esfuerzo de Von Mises máximo de 27 kPa.
- Se diseñó e implementó un molde para la fabricación de actuadores neumáticos blandos de canales rectos, con el cual se logró obtener un actuador funcional hecho de Ecoflex 00-30.
- La implementación de la plataforma de pruebas permitió realizar un análisis de desplazamiento parcial del actuador neumático blando, con el cual se caracterizó la respuesta cinemática del actuador en el rango de presiones de 0 a 20 kPa.
- Los manuales de usuario redactados demostraron facilitar el uso de las herramientas implementadas, tras validarlos con estudiantes de ingeniería mecatrónica, quienes pudieron utilizar los equipos de manera efectiva sin necesitar capacitación adicional.

- Para mejorar el funcionamiento de la máquina de ensayos, se recomienda integrar una herramienta de análisis de video especializada para la medición automática de la deformación de la probeta durante el ensayo.
- Se recomienda implementar métodos de optimización que mejoren la eficiencia computacional de los análisis de elementos finitos aplicados a materiales hiperelásticos, con el objetivo de realizar simulaciones que representen de manera más fiel el comportamiento físico de los actuadores neumáticos blandos bajo condiciones reales de operación.
- Para impulsar la búsqueda de aplicaciones de los actuadores neumáticos blandos, se recomienda investigar como cambios en la geometría o en los materiales que componen un actuador blando afectan su respuesta frente a una entrada de presión.
- Se recomienda desarrollar una herramienta de diseño parametrizado que permita generar automáticamente moldes para actuadores neumáticos blandos, eliminando la necesidad de modificar directamente un archivo CAD.
- Para poder realizar un análisis de desplazamiento completo de un actuador neumático blando y validar el funcionamiento del módulo de fuerza, se recomienda mejorar el sensor de presión de la plataforma de pruebas por uno que tenga un mayor rango de medición.
- Se recomienda mantener actualizados los manuales de la máquina de ensayos y de la plataforma de pruebas tras la realización de cambios en estos equipos.

-
- [1] F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, X. Chen y G. M. Whitesides, «Soft Robotics for Chemists,» *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 50, n.º 8, págs. 1890-1895, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201006464>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/anie.201006464>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201006464>.
- [2] A. D. Marchese, R. K. Katzschmann y D. Rus, «A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots,» *Soft Robotics*, vol. 2, n.º 1, págs. 7-25, 2015, PMID: 27625913. DOI: 10.1089/soro.2014.0022. eprint: <https://doi.org/10.1089/soro.2014.0022>. dirección: <https://doi.org/10.1089/soro.2014.0022>.
- [3] D. P. Holland, E. J. Park, P. Polygerinos, G. J. Bennett y C. J. Walsh, «The Soft Robotics Toolkit: Shared Resources for Research and Design,» *Soft Robotics*, vol. 1, n.º 3, págs. 224-230, 2014. DOI: 10.1089/soro.2014.0010. eprint: <https://doi.org/10.1089/soro.2014.0010>. dirección: <https://doi.org/10.1089/soro.2014.0010>.
- [4] J. C. Case, E. L. White y R. K. Kramer, «Soft Material Characterization for Robotic Applications,» *Soft Robotics*, vol. 2, n.º 2, págs. 80-87, 2015. DOI: 10.1089/soro.2015.0002. eprint: <https://doi.org/10.1089/soro.2015.0002>. dirección: <https://doi.org/10.1089/soro.2015.0002>.
- [5] P. Moseley, J. M. Florez, H. A. Sonar, G. Agarwal, W. Curtin y J. Paik, «Modeling, Design, and Development of Soft Pneumatic Actuators with Finite Element Method,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 18, n.º 6, págs. 978-988, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201500503>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adem.201500503>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.201500503>.
- [6] Y. Yao, L. He y P. Maiolino, «SPADA: A Toolbox of Designing Soft Pneumatic Actuators for Shape Matching Based on Surrogate Modeling,» *Robotics Reports*, vol. 2, n.º 1, págs. 1-14, 2024. DOI: 10.1089/rorep.2023.0029. eprint: <https://doi.org/10.1089/rorep.2023.0029>. dirección: <https://doi.org/10.1089/rorep.2023.0029>.

- [7] H. Zhang, W. Liu, M. Yu e Y. Hou, «Design, Fabrication, and Performance Test of a New Type of Soft-Robotic Gripper for Grasping,» *Sensors*, vol. 22, n.º 14, 2022, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22145221. dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/14/5221>.
- [8] K. C. Galloway, K. P. Becker, B. Phillips et al., «Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs,» *Soft Robotics*, vol. 3, n.º 1, págs. 23-33, 2016, PMID: 27625917. DOI: 10.1089/soro.2015.0019. eprint: <https://doi.org/10.1089/soro.2015.0019>. dirección: <https://doi.org/10.1089/soro.2015.0019>.
- [9] R. M. McKenzie, T. W. Barraclough y A. A. Stokes, «Integrating Soft Robotics with the Robot Operating System: A Hybrid Pick and Place Arm,» *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 4, 2017, ISSN: 2296-9144. DOI: 10.3389/frobt.2017.00039. dirección: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2017.00039>.
- [10] T. G. M. E. Cinti, C. D y M. Fioravanti, «[Attention, repetitive works, fatigue and stress],» *Annali di igiene: medicina preventiva e di comunità*, vol. 18, págs. 417-429, sep. de 2006.
- [11] B. Trimmer, «Soft robots,» *Current Biology*, vol. 23, n.º 15, R639-R641, 2013.
- [12] G. Bao, H. Fang, L. Chen et al., «Soft Robotics: Academic Insights and Perspectives Through Bibliometric Analysis,» *Soft Robotics*, vol. 5, n.º 3, págs. 229-241, 2018, PMID: 29782219. DOI: 10.1089/soro.2017.0135. eprint: <https://doi.org/10.1089/soro.2017.0135>. dirección: <https://doi.org/10.1089/soro.2017.0135>.
- [13] K. Suzumori, K. Fukuda, R. Niiyama y K. Nakajima, *The science of soft robots design, materials and Information Processing*, 1.ª ed. Springer Nature Singapore, 2023.
- [14] B. Siciliano y O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, 2.ª ed. Springer, 2016.
- [15] M. E. M. Salem, Q. Wang, R. Wen y M. Xiang, «Design and Characterization of Soft Pneumatic Actuator for Universal Robot Gripper,» en *2018 International Conference on Control and Robots (ICCR)*, 2018, págs. 6-10. DOI: 10.1109/ICCR.2018.8534483.
- [16] P. Polygerinos, B. Mosadegh y A. Campo, «PneuNets bending actuators,» *Soft Robotics Toolkit*, Accesado: 12 de mayo de 2024. dirección: <https://softroboticstoolkit.com/book/pneunets-bending-actuator>.
- [17] B. Mosadegh, P. Polygerinos, C. Keplinger et al., «Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly,» *Advanced Functional Materials*, vol. 24, n.º 15, págs. 2163-2170, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201303288>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adfm.201303288>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adfm.201303288>.
- [18] P. Polygerinos, S. Lyne, Z. Wang et al., «Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation,» en *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, págs. 1512-1517. DOI: 10.1109/IR0S.2013.6696549.
- [19] T. Wang, L. Ge y G. Gu, «Programmable design of soft pneu-net actuators with oblique chambers can generate coupled bending and twisting motions,» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 271, págs. 131-138, 2018, ISSN: 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.018>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717316977>.

- [20] E. Shahabi, B. Kamare, F. Visentin, A. Mondini y B. Mazzolai, «Design of Soft Pneumatic Actuator with Two Oblique Chambers for Coupled Bending and Twisting Movements,» *Actuators*, vol. 12, n.º 12, 2023, ISSN: 2076-0825. DOI: 10.3390/act12120446. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-0825/12/12/446>.
- [21] «Ecoflex 00-30,» *Smooth-On*, Accesado: 12 de mayo de 2024. dirección: <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>.
- [22] B. Sista, S. Kadam, J. Doyle y Z. Wenlong, «Hiperelasticity Course,» *Ansys Innovation Space*, Accesado: 12 de mayo de 2024. dirección: <https://innovationspace.ansys.com/product/hyperelasticity/>.
- [23] J. Whiteley, *Finite Element Methods A Practical Guide*, 1.ª ed. Springer, 2017.
- [24] J. Davis, *Tensile Testing*, 2.ª ed. ASM, 2004.
- [25] R. Budynas y K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Higher Education - VST E+p, 2014, ISBN: 9781259986246.
- [26] «Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers - Tension,» Amerinca Society for Testing y Materials (ASTM), Estados Unidos, Estándar, 2016.
- [27] J. Prusa, «The Original Prusa MK4S is Here! Powerful 360° Cooling, High-Flow Nozzle, Prusa App, Hackerboard and More!» *Prusa Research*, Accesado: 24 de agosto de 2024. dirección: https://blog.prusa3d.com/the-original-prusa-mk4s-is-here_100605/?utm_campaign=shareaholic&utm_medium=copy_link&utm_source=bookmark.
- [28] «Nema 17 Bipolar 59Ncm(83.55oz.in) 2A 42x42x48mm 4 Hilos con 1m de Cable y Conector,» *StepperOnline*, Accesado: 25 de agosto de 2024. dirección: <https://www.omc-stepperonline.com/es/nema-17-bipolar-59ncm-84oz-in-2a-42x48mm-4-hilos-con-1m-de-cable-y-conector-17hs19-2004s1>.
- [29] K. Miller, «Testing Elastomers for Hyperelastic Material Models in Finite Element Analysis,» *Testing and Analysis*, S.F.
- [30] «Dobot CR Series User Guide,» *Dobot Robots*, 2023.