



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE UN MECANISMO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE CON LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN PATRÓN DE PIEL KIRIGAMI QUE PERMITA LA
REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LA LOCOMOCIÓN ONDULATORIA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Summy Naomi Chong Díaz
Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez
TUTOR: Ing. David Mateo Cortez Saravia, MSc

Guayaquil - Ecuador
2023

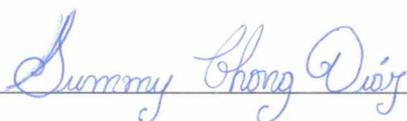
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotras, **Summy Naomi Chong Díaz** con documento de identificación N° **0927106534** y **Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez** con documento de identificación N° **0952578664**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 8 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Summy Naomi Chong Díaz
0927106534



Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez
0952578664

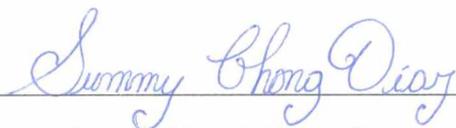
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Summy Naomi Chong Díaz** con documento de identificación N° **0927106534** y **Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez** con documento de identificación N° **0952578664**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN MECANISMO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PATRÓN DE PIEL KIRIGAMI QUE PERMITA LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LA LOCOMOCIÓN ONDULATORIA**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo a final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Guayaquil, 8 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Summy Naomi Chong Díaz
0706389178



Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez
0952578664

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **David Mateo Cortez Saravia**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN MECANISMO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PATRÓN DE PIEL KIRIGAMI QUE PERMITA LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LA LOCOMOCIÓN ONDULATORIA**, realizado por **Summy Naomi Chong Díaz** con documento de identificación N° **0927106534** y por **Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez** con documento de identificación N° **0952578664**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 8 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Ing. David Mateo Cortez Saravia, MSc.
0963020193

DEDICATORIA

Hoy quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, familia y seres queridos por todo el apoyo y aliento que me han brindado a lo largo de mi camino universitario. Ha sido un viaje lleno de desafíos, pero gracias a su constante respaldo y motivación he logrado culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, les agradezco de corazón por su inquebrantable fe en mí y por ser mi mayor inspiración. Su infinito amor y sacrificio han sido la fuerza detrás de mi perseverancia y resiliencia. Han sido mi roca en los momentos difíciles, siempre brindándome sus consejos sabios y motivación para seguir adelante.

A mi familia, quiero expresarles mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional durante mi travesía universitaria. A mis mejores amigas, les agradezco por celebrar mis logros y brindarme apoyo en momentos de desafío. A todas las personas que conocí, les doy las gracias por las valiosas enseñanzas y el impacto positivo en mi vida. A aquellos que ya no están físicamente, les agradezco por las enseñanzas que dejaron. Su amor y aliento han sido fundamentales para culminar esta etapa de mi vida.

En este momento de culminación, quiero dedicar todos mis logros a aquellos que han creído en mí, que me han apoyado incondicionalmente y que han sido un pilar fundamental en mi desarrollo académico y personal, pero sobre todo quiero reconocer mi esfuerzo y dedicación en cada tramo de este camino. De todo corazón, quiero expresarles mi más profundo agradecimiento por estar a mi lado a lo largo de este viaje que ahora llega a su fin.

Summy Naomi Chong Díaz

Dedico este proyecto con profundo respeto y gratitud a todos aquellos que me han brindado su apoyo incondicional y han sido faros de sabiduría durante este arduo camino. A mis padres, cuya guía amorosa y sacrificio han sido el motor de mi dedicación, y a mi querido Toby, cuya memoria ilumina cada paso que doy.

Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a cada una de las personas que participaron y contribuyeron en la realización de este proyecto de tesis. Su apoyo y colaboración fueron fundamentales para su éxito. Su contribución, ya sea por su participación en la investigación o sus consejos fue de suma importancia y de gran valor para el éxito de este proyecto.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi compañera de tesis, Nicolle, por su apoyo incondicional, compromiso y esfuerzo constante a lo largo de esta travesía. Su dedicación y trabajo en equipo fueron fundamentales para superar los desafíos que encontramos a lo largo del camino en nuestra vida académica. Gracias a ello, logramos alcanzar los objetivos que compartimos de manera exitosa.

Finalmente, deseo expresar mi sincero agradecimiento al departamento de DTAI-Laboratorios por brindarme la oportunidad de utilizar sus instalaciones de laboratorio y maquinaria, que han sido fundamentales para la realización de mi trabajo de tesis. Su generosa colaboración ha sido esencial para el éxito de mi investigación académica.

Summy Naomi Chong Díaz

Agradezco a todas las personas que han sido parte fundamental en la realización de este trabajo de tesis.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi compañera de tesis, Summy, por su colaboración, apoyo y amistad a lo largo de este viaje académico. Juntas enfrentamos los obstáculos y celebramos los logros, compartiendo conocimientos y experiencias que enriquecieron nuestro trabajo. Su dedicación y entusiasmo contribuyeron significativamente al éxito de este proyecto, y siempre valoraré las horas de estudio y las discusiones constructivas que compartimos.

Finalmente deseo expresar mi sincero agradecimiento al departamento de DTAI-Laboratorios por brindarme la oportunidad de utilizar sus instalaciones de laboratorio y maquinaria, que han sido fundamentales para la realización de mi trabajo de tesis. Su generosa colaboración ha sido esencial para el éxito de mi investigación académica.

Nicolle Dennise Peñafiel Jiménez

RESUMEN

En la presente propuesta se puede observar como la robótica blanda ha surgido como un gran campo que busca superar ciertas limitaciones de los robots rígidos tradicionales, permitiéndoles interactuar con objetos delicados y en entornos no estructurados. Este documento cuenta con una gran cantidad de información acerca de robótica blanda la cual involucra patrones Kirigami en el diseño además de un circuito neumático que se integra a dicho robot blando.

Kirigami es una antigua forma de arte que combina las técnicas de origami y el corte, lo cual ofrece un enfoque versátil y escalable para crear estructuras mecánicas complejas y controlables. Esta tesis presenta un estudio exhaustivo sobre la utilización de patrones de Kirigami para mejorar las capacidades de los robots blandos. El objetivo principal es explorar los principios de diseño, las técnicas de modelado y la implementación de actuadores suaves, así como las aplicaciones potenciales de la robótica suave inspirada en Kirigami. Este documento también incluye una revisión a fondo del estado del arte en robótica blanda y la técnica Kirigami, destacando sus ventajas y desafíos respectivos.

Posteriormente, la investigación se sumerge en la metodología de diseño que integra patrones Kirigami en sistemas robóticos flexibles. Se describe la creación y el diseño del robot blando, resaltando la utilización de diversos patrones tanto en el hilo de kevlar que rodea el robot como en el propio patrón Kirigami. Adicionalmente, la tesis abarca el modelado matemático de las estructuras Kirigami en el contexto de la robótica blanda, permitiendo anticipar y optimizar su desempeño.

Para validar la efectividad de estos patrones de Kirigami así como también su versatilidad en robótica blanda, se desarrollan varios prototipos experimentales, los cuales demuestran funcionalidades novedosas como son: la transformación de formas, la autoadaptación y la locomoción mejorada, todo ello es posible gracias a las propiedades únicas que se encuentran en las estructuras Kirigami.

La parte final de la tesis investiga posibles aplicaciones de la robótica suave inspirada en Kirigami en varios dominios. Los ejemplos incluyen aplicaciones biomédicas como herramientas quirúrgicas y prótesis, monitoreo ambiental a través de robots blandos capaces de navegar por terrenos complejos. Al incluir estos principios de la robótica blanda y el Kirigami, esta tesis tiene como objetivo la contribución de avances de los sistemas robóticos que poseen una mayor destreza, adaptabilidad y versatilidad.

Los resultados presentados en este documento proporcionan una base para futuras investigaciones e inspiran el desarrollo de diseños robóticos blandos innovadores para una amplia gama de aplicaciones.

Palabras claves: máquinas bioinspiradas, pieles Kirigami, superficies elásticas, actuador suave, inestabilidades mecánicas, locomoción, propiedades de fricción anisotrópicas.

ABSTRACT

In the present proposal, it can be observed how soft robotics has emerged as a great field that seeks to overcome certain limitations of traditional rigid robots, allowing them to interact with delicate objects and in unstructured environments. This document contains a wealth of information about soft robotics, which involves Kirigami patterns in the design, as well as a pneumatic circuit that integrates into the aforementioned soft robot.

Kirigami is an ancient form of art that combines the techniques of origami and cutting, offering a versatile and scalable approach to creating complex and controllable mechanical structures. This thesis presents a comprehensive study on the use of Kirigami patterns to enhance the capabilities of soft robots. The main objective is to explore design principles, modeling techniques, and the implementation of soft actuators, as well as the potential applications of soft robotics inspired by Kirigami. This document also includes an in-depth review of the state of the art in soft robotics and the Kirigami technique, highlighting their respective advantages and challenges.

Then, the research delves into the design methodology to incorporate Kirigami patterns in soft robotic systems as well as the creation and design of the soft robot, specifying various occupied patterns as well as in the kevlar thread that is around said robot as well as also in Kirigami pattern. In addition, the thesis addresses the mathematical modeling of Kirigami structures in the context of soft robotics, which allows predicting and optimizing their performance.

To validate the effectiveness of these Kirigami patterns as well as their versatility in soft robotics, several experimental prototypes are developed, which demonstrate novel functionalities such as: shape transformation, self-adaptation and improved locomotion, all of which is possible thanks to the unique properties found in Kirigami structures.

The final part of the thesis investigates possible applications of Kirigami-inspired soft robotics in various domains. Examples include biomedical applications such as surgical tools and prosthetics, environmental monitoring through soft robots capable of navigating complex terrain. By including these principles of soft robotics and Kirigami, this thesis aims to contribute to advances in robotic systems that possess greater dexterity, adaptability, and versatility.

The results presented in this paper provide a foundation for further research and inspire the development of innovative soft robotic designs for a wide range of applications.

Keywords: bioinspired machines, Kirigami skins, elastic surfaces, soft actuator, mechanical instabilities, locomotion, anisotropic friction properties.

Índice

I	Introducción	1
II	Problema de Estudio	2
III	Objetivos	3
III-A	Objetivo General	3
III-B	Objetivos específicos	3
IV	Marco Teórico Referencial	4
IV-A	Antecedentes históricos	4
IV-A1	La robótica	4
IV-A2	Robots móviles	5
IV-B	Robótica Blanda	6
IV-B1	Definición	6
IV-B2	Inspiración Biótica	9
IV-B3	Tecnología tras los Robots Blandos	10
IV-B4	Sistema y Aplicaciones	12
IV-C	Actuadores	14
IV-C1	Actuadores neumáticos	14
IV-C2	Actuadores neumáticos blandos	15
IV-C3	Actuadores de flexión PneuNets	15
IV-C4	Actuadores reforzados con fibra	17
IV-C5	Músculos artificiales neumáticos	17
IV-D	Materiales	18
IV-D1	Elastómeros	18
IV-D2	Siliconas	18
IV-D3	Serie Ecoflex: Cauchos de silicona supersuaves de curado adicional	18
IV-D4	Kevlar	20
IV-D5	Fibras de Kevlar-Variacion de movimientos	21
IV-E	Kirigami	23
IV-E1	Introducción: Kirigami	24
IV-E2	Propiedades Anisotrópicas	25
IV-E3	Anisotropía por fricción	26
IV-E4	Aplicaciones del Kirigami	26
IV-F	Etapas del Circuito de Control	29
IV-F1	Comunicación entre el dispositivo de control y el actuador	29
IV-F2	Actuación	30
IV-F3	Fuente de alimentación	30
IV-G	Programas utilizados para el desarrollo y simulación del actuador suave	31
IV-G1	AUTOCAD	31
V	Marco Metodológico	32
V-A	Diseño de Moldes para Actuador Triangular	32
V-A1	Primera prueba de simulación	32
V-B	Rediseño de segundo molde de prueba	36
V-C	Tercer molde de prueba- Primera Impresión	41
V-D	Cuarto molde de prueba- Segunda Impresión	47
V-E	Molde final para segunda capa de recubrimiento	49

V-F	Impresión 3D de Moldes	52
V-G	Procedimiento de la impresión en 3D	52
V-H	Procedimiento para moldes de silicon	53
V-H1	Secado del material	53
V-H2	Medición y mezcla	53
V-H3	Vertido, curado y desempeño del molde	53
V-H4	Curado/Poscurado	53
V-H5	Kevlar: Ángulo	54
V-I	Lista de materiales	56
V-J	Actuadores	59
V-K	Diseño de Patrones de Piel Kirigami: celdas, probetas y piel de recubrimiento	64
V-K1	Patrón Lineal	64
V-K2	Patrón Triangular	72
V-K3	Patrón Trapezoidal	79
V-L	Simulación de Elementos Finitos	89
V-L1	Procedimiento para la obtención de datos técnicos del material	89
V-L2	Procedimiento de Simulación de Celdas y Probetas en FEM	96
V-M	Máquina de corte laser	98
V-N	Montaje de la piel Kirigami	101
V-Ñ	Procedimiento del circuito	102
V-Ñ1	Diseño de circuito	103
VI	Resultados	108
VI-A	Impresión de Piezas finales	108
VI-B	Actuadores suaves finales	111
VI-C	Corte y Diseño de Patrones Finales	113
VI-C1	Probetas de Una Celda	113
VI-C2	Probetas de Tres Celda	117
VI-C3	Piel de Recubrimiento para actuadores:	120
VI-D	Resultados del revestimiento de la piel Kirigami en actuadores	123
VI-E	Circuito Final	125
VI-F	Rediseño de Circuito Final	127
VI-G	Registro de tiempo de desplazamiento del actuador	129
VI-H	Resultados de Simulación de FEM	131
VI-H1	Resultados de Simulación de FEM-Patrón Sin Corte	131
VI-H2	Resultados de Simulación de FEM Una Celda-Patrón Lineal	133
VI-H3	Resultados de Simulación de FEM Tres Celdas-Patrón Lineal	135
VI-H4	Comparación de resultados de FEM - Patrón Lineal: Una Celda y Tres Celdas	137
VI-H5	Resultados de Simulación de FEM Una Celda - Patrón Triangular	139
VI-H6	Resultados de Simulación de FEM Tres Celdas - Patrón Triangular	141
VI-H7	Comparación de resultados de FEM - Patrón Triangular: Una Celda y Tres Celdas	143
VI-H8	Resultados de Simulación de FEM Una Celda - Patrón Trapezoidal	145
VI-H9	Resultados de Simulación de FEM Tres Celdas - Patrón Trapezoidal	147
VI-H10	Comparación de resultados de FEM - Patrón Trapezoidal: Una Celda y Tres Celdas	150
VI-I	Resultados de ensayos de tracción	152
VII	Cronograma	182
VIII	Presupuesto	184

IX	Conclusiones	185
X	Recomendaciones	187
XI	Anexos	192
XI-A	Descripciones técnicas y funcionales	192
XI-B	Pruebas de tracción	194

Índice de figuras

1	Robot móvil para la investigación en entornos de interiores y exteriores [3].	5
2	Estructura de un robot móvil y un ser vivo [4].	6
3	Escala de módulo elástico de varios materiales [6].	7
4	Evolución de manipuladores de enlace rígido [9].	7
5	Ejemplos de robots intrínsecamente suaves: (a) Ejemplo de un tentáculo de pulpo blando bioinspirado, basado en una red polimérica trenzada que se puede contraer mediante actuadores SMA [11]. (b) Robot blando multipaso [12]. (c) Gripper Universal [13]. (d) Asistente de manipulación biónica de FESTO [14]. (e) GoQBot [15].	8
6	Ejemplos de animales que sirven para los dispositivos de bioinspiración (a) Medusa [19]. (b) Pulpo [20]. (c) Orugas [21]. (d) Serpientes [22]. (e) Pez [23]. (f) Estrella de mar [24].	9
7	Componentes presentes en un actuador SMA [28].	10
8	Robots blandos comunes: (a) Actuadores de aleación con memoria de forma (SMA). (b) Actuadores de músculos artificial neumático (PAM). (c) Actuadores de elastómero fluídico (FEA). (c) FEA reforzados con fibra [33].	11
9	Manipulador continuo representativo OctArm [37].	13
10	Biología y bioinspiración de la robótica blanda [38]	14
11	Actuadores PneuNets: Vista de sección transversal, los PneuNets conectados por el canal de aire [39].	15
12	Molde de los actuadores PneuNets [40].	16
13	Movimiento del actuador [40].	16
14	Movimiento de los actuadores reforzados con fibra [41]	17
15	Músculos artificiales neumáticos [42]	18
16	Kevlar [45].	21
17	Doble helicoidal: Posee una capa limitante y un doble helicoidal [46].	21
18	Doble helicoidal: Posee un doble helicoidal pero no contiene capa limitante [46].	22
19	Núcleo del elastómero: Movimiento de torsión en dirección opuesta a la del hilo de kevlar. [46].	22
20	Helicoidal simple: Posee una capa limitante y helicoidal simple [46].	22
21	Helicoidal simple: Posee un helicoidal simple pero sin capa limitante [46].	23
22	Múltiples helicoidales: Posee varios tipo de helicoidal con o sin capa limitante [46]	23
23	Algunas características sobresalientes que pueden ser conferidas a una variedad de materiales mediante la aplicación de cortes de diseño inspirados en el kirigami [47].	24
24	(a) Se consideró un actuador suave elastomérico reforzado con fibra que se extiende axialmente al inflarse. (b) Se fabricó una piel de kirigami incrustando una serie de cortes en una fina lámina de plástico [49].	25
25	Escamas de serpiente durante su arrastre [50].	25
26	Representación gráfica de los materiales (a) Isótropo (b) Anisótropo [52].	26
27	Fabricación de diferentes diseños de kirigami [54].	27
28	Estructuras kirigami 3D accionadas térmicamente programables [48].	28
29	Resultados de simulación FEM sobre la actuación térmica de celdas de kirigami [48].	29
30	(a) Arduino modelo ATMEGA328. (b) Módulo HC-05.	29
31	(a) Bomba Micro Neumática. (b) Controlador de Motor LM2596. (c) Válvulas solenoide 2 posiciones 3 vías.	30
32	(a) LIPO TATTU 3S. (b) MOSFET IRF540. (c) TIP122.	31
33	Celdas de Corte Kirigami: (a) Trapezoidal (b) Triangular (a) Lineal	31
34	(a) Orientación de Vista Frontal pieza “Base”. (b) Vista Isométrica de pieza “Base”. (c) Cotas de pieza “Base” [58].	32
35	(a) Vista Isométrica de pieza “Lateral Fino”. (b) Cotas de pieza “Lateral Fino” [58].	33
36	(a) Vista Isométrica de pieza “Lateral Grueso”. (b) Cotas de pieza “Lateral Grueso” [58]	34
37	(a) Vista Isométrica de pieza “Tapa Superior”. (b) Cotas de pieza “Tapa Superior” [58].	34

38	Vista Isométrica y cotas de pieza “Varilla” [58].	35
39	(a) Vista Isométrica de “Tapa de Vertido”. (b) Cotas de pieza “Tapa de Vertido” [58].	35
40	(a) Ensamble de pieza base, lateral fino y varilla triangular. (b) Ensamble de pieza lateral grueso. (c) Vista Frontal del ensamble. (d) Vista Isométrica del ensamble [58].	36
41	(a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Base” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza “Base” [58].	36
42	(a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Lateral Fino” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza "Lateral Fino"[58].	37
43	(a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Lateral Grueso” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza "Lateral Grueso"[58].	38
44	(a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Tapa Superior” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza "Tapa Superior"[58].	38
45	(a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Varilla” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza “Varilla” [58].	39
46	(a) Vista Isométrica de pieza “Tapa de Vertido”. (b) Cotas de pieza “Tapa de Vertido” [58].	39
47	(a) Ensamble de pieza base y lateral fino. (b) Ensamble de pieza lateral grueso al molde. (c) Vista Isométrica del ensamble con tapa superior [58].	40
48	(a) Vista Isométrica del ensamble con varilla triangular. (b) Vista Isométrica del ensamble explosionado [58].	40
49	Vista Isométrica del actuador con sus respectivas cotas [58].	41
50	Vista Isométrica del actuador con redondeo [58].	41
51	Vista de planos en medio del actuador [58].	42
52	Vista de patrón triangulares por medio de matrices [58].	42
53	Vista de cortes triangulares por medio de matrices [58].	42
54	Actuador Triangular [58].	43
55	Ensamble de piezas como base y lateral fino [58].	43
56	Vista del ensamble con el actuador triangular [58].	43
57	Vista del plano de extrusión [58].	44
58	Escala de la extrusión [58].	44
59	Vista de las extrusiones en el molde lateral fino [58].	44
60	(a) Ensamble de piezas como base, lateral grueso y actuador triangular. (b) Se pueden observar las extrusiones de acuerdo con el patrón del actuador [58].	45
61	Varilla Triangular [58].	45
62	(a) Ensamble de pieza base y lateral fino. (b) Ensamble de pieza lateral grueso al molde. (c) Vista Isométrica del ensamble con tapa superior y tapa de vertido. (d) Ensamble de varilla triangular en el molde de vertido [58].	46
63	Vista Isométrica del ensamble explosionado [58].	46
64	(a) Vista Isométrica de la pieza Base con cotas. (b) Cotas de pieza “Base” [58].	47
65	(a) Vista Isométrica del “Lateral Grueso”. (b) Cotas del “Lateral Grueso” [58].	48
66	(a) Se muestran los errores en el ensamble de las piezas. (b) Ensamble de pieza base y lateral grueso [58].	48
67	(a) Vista Isométrica de la pieza “Base”. (b) Cotas de pieza “Base” [58].	49
68	(a) Vista Isométrica de la pieza “Lateral Grueso” [58].	50
69	(a) Vista Isométrica de la pieza “Lateral Fino” [58].	50
70	(a) Vista Isométrica de la pieza “Tapa Superior” [58].	51
71	(a) Impresora 3D. (b) Material utilizado: TPU [59].	52
72	Material TPU de color azul y negro [59].	52
73	Patron helicoidal del hilo de kevlar[59].	54
74	Ángulo del hilo de kevlar [60].	55
75	Hilo de kevlar [61].	56

76	Spray Universal Mold Release [61].	56
77	(a) Ecoflex 00-30 “Parte A y Parte B”. (b) Ecoflex 00-33 AF “Parte A y Parte B” [61].	57
78	Sil poxy/pegamento para silicona [61].	57
79	(a) Moldes impresos en 3D. (b) Moldes impresos en 3D correcciones por fuga de material [61].	58
80	Simulación del ensamble del molde de secado [62].	59
81	Uso del Spray Mold Release [62]	59
82	Vertido de silicona en el interior de los moldes [62].	60
83	Sellado de molde [62].	60
84	Se retira la cobertura del primer molde [62].	61
85	Atadura del hilo de kevlar [62].	61
86	Segundo vertido [62].	61
87	(a) Segunda cobertura con hilo de kevlar. (b) Se retira la varilla. (c) Ingreso de triángulos fabricados del mismo material, pegados con pegamento de silicon [62].	62
88	Se inserta la manguera dentro del actuador [62].	62
89	(a) Tornillo hueco y tuerca. (b) Arandela triangular [62].	63
90	(a) Triángulo de silicona. (b) Sellado completo e ingreso de manguera. [62].	63
91	Patrón Lineal [66].	64
92	Probeta de Deformación Lineal [67].	65
93	Muesca del Patrón Lineal [68].	65
94	Desarrollo de celdas de patrones lineales, triangular, trapezoidal [69].	65
95	(a)Parámetros de celda Lineal,(b) Ciclo patrón Lineal, (c) Probeta Lineal [70].	66
96	Valores de celda lineal [70].	67
97	Configuración de matriz rectangular para Probeta Lineal: Una Celda [70].	68
98	Probeta lineal medidas finales: Una Celda [70].	68
99	Configuración de matriz rectangular para Probeta Lineal: Dos Celdas [70].	69
100	Probeta lineal medidas finales: Dos Celdas [70].	69
101	Configuración de matriz rectangular para Probeta Lineal: Tres Celdas [70]	69
102	Probeta lineal medidas finales: Tres Celdas [70].	70
103	Configuración de matriz rectangular para Piel de recubrimiento Lineal [70].	71
104	Piel de Recubrimiento Lineal [70].	71
105	Medidas de Piel de Recubrimiento Lineal [70].	72
106	Parámetros de Celda Triangular [72]	73
107	Valor del ángulo de la Celda Triangular [72].	73
108	Valores de Celda Triangular [72].	74
109	Configuración de matriz rectangular para Probeta Triangular: Una Celda [72].	75
110	Probeta triangular medidas finales: Una Celda [72].	75
111	Configuración de matriz rectangular para Probeta Triangular: Dos Celdas [72].	76
112	Probeta triangular medidas finales: Dos Celdas [72].	76
113	Configuración de matriz rectangular para Probeta Triangular: Tres Celda [72]	77
114	Probeta triangular medidas finales: Tres Celdas [72].	77
115	Configuración de matriz rectangular para Piel de recubrimiento Triangular [72].	78
116	Piel de Recubrimiento Triangular [72].	78
117	Medidas de Piel de Recubrimiento Triangular [72].	79
118	Parámetros de Celda Trapezoidal [73].	80
119	Celda Trapezodial, Vectores a_1, a_2 [73].	81
120	Celda Trapezodial Punto#1 [74].	82
121	Celda Trapezodial Punto#2 [74].	82
122	Celda Trapezodial Punto#3 [74].	83
123	Celda Trapezodial Punto#4 [74].	83
124	Configuración de matriz rectangular para Probeta Trapezoidal: Una Celda [58].	84

125	Probeta trapezoidal medidas finales: Una Celda [58].	84
126	Configuración de matriz rectangular para Probeta Trapezoidal: Dos Celdas [58].	85
127	Probeta trapezoidal medidas finales: Dos Celdas. [58]	85
128	Configuración de matriz rectangular para Probeta Trapezoidal: Tres Celda [58].	86
129	Probeta triangular medidas finales: Tres Celdas [58].	86
130	Configuración de matriz rectangular para Piel de recubrimiento Trapezoidal [58].	87
131	Piel de Recubrimiento Trapezoidal [58].	87
132	Medidas de Piel de Recubrimiento Trapezoidal [58].	88
133	Probeta Sin Cortes SOLIDWORKS [75].	89
134	Probeta Sin Cortes [75].	89
135	Dimensiones de Probetas de Norma ISO 527-3[76].	90
136	Se adecua la máquina de ensayo [77].	90
137	Se colocan las probetas entre las mordazas y se ajusta la celda de carga [77].	91
138	Tabla de Prueba de Tracción para probeta sin cortes[78].	92
139	Gráfica Tabla de Prueba de Tracción para probeta sin cortes [78].	93
140	Se ingresan las características para definir el material [79].	94
141	Módulo Elástico del Material[79].	94
142	Tabla de Prueba de Tracción para probeta sin cortes [78].	95
143	Gráfica de Prueba de Tracción para probeta sin cortes [78].	95
144	Ingreso de características del material en SOLIDWORKS[79].	96
145	Proceso de nuevo Estudio de Simulación [79].	96
146	Configuración: Sujeciones, se ejerce la fuerza externa en las caras de la probeta [79].	97
147	(a) Configuración de aplicación de Fuerzas. (b) Diseño de malla. (c) Ejecución de la simulación [79].	97
148	Máquina de corte laser R500 [80].	98
149	Potencia de 60W [80].	98
150	Selección de documento [80].	99
151	(a) Selección de líneas. (b) Lámina de grosor de 0.05mm [80].	99
152	Corte de patrón triangular primeras celdas [80].	99
153	Corte de patrón lineal [80].	100
154	Corte de patrón Trapezoidal [80].	100
155	Recubrimiento de piel Kirigami [81]	101
156	Circuito con pulsadores [82].	103
157	Comprobación de vías [82].	104
158	Circuito en el programa Proteus[83].	105
159	Primer diseño de inflado y desinflado [83].	105
160	Circuito en el programa Fritzing [83].	106
161	Circuito con el modulo bluetooth [83].	107
162	(a) Impresión del lateral grueso. (b) Varilla final. [84].	108
163	Lateral grueso y base final [84].	109
164	Piezas finales [84].	109
165	Piezas de recubrimiento finales [84].	110
166	Tornillo, arandela y tuerca final [84].	110
167	(a) Actuador suave y varilla. (b) Actuador suave#1 y manguera. [85].	111
168	Actuador suave #2 [85].	111
169	Actuador suave #1 y #2 con tornillo y arandela triangular [85].	112
170	(a) Vista detalle A probeta simulada. (b) Vista detalle B probeta de corte [86].	114
171	(a) Vista detalle C probeta simulada. (b) Vista detalle D probeta de corte [87].	115
172	(a) Vista detalle E probeta simulada. (b) Vista detalle F probeta de corte [88].	116
173	(a) Vista detalle G probeta simulada. (b) Vista detalle H probeta de corte [89].	117
174	(a) Vista detalle I probeta simulada. (b) Vista detalle J probeta de corte [90].	118

175	(a) Vista detalle K probeta simulada. (b) Vista detalle L probeta de corte [91].	119
176	Revestimiento de piel Kirigami con un patrón trapezoidal [92].	123
177	Revestimiento de la piel Kirigami con un patrón triangular y trapezoidal [92].	124
178	Revestimiento de la piel Kirigami con un patrón triangular, trapezoidal y lineal [92].	124
179	(a) Válvula solenoide colocada en una posición favorable. (b) Circuito final [93].	125
180	Actuador con piel Kirigami de patrón trapezoidal, lineal y triangular con la implementación del circuito [93].	126
181	Actuador con piel Kirigami de patrón trapezoidal con la implementación del circuito [93].	126
182	(a) Base del carro. (b) Ensamblaje del Modelo #1. (c) Vista Lateral del ensamblaje [94].	127
183	(a) Circuito final montado en la nueva base. (b) Cortes necesarios para el monitoreo del circuito [94].	127
184	(a) Circuito final montado en la nueva base. (b) Cortes necesarios para el monitoreo del circuito [94].	128
185	(a) Circuito final montado en la nueva base. (b) Cortes necesarios para el monitoreo del circuito [95].	128
186	Circuito Final diseño final [95].	128
187	Actuador cubierto con una superficie kirigami que presenta un patrón lineal[95].	129
188	Actuador cubierto con una superficie kirigami que presenta un patrón triangular[95].	130
189	Actuador cubierto con una superficie kirigami que presenta un patrón trapezoidal[95].	130
190	Análisis Estático - Tensiones [96].	131
191	Análisis Estático - Desplazamiento [96].	132
192	Análisis Estático - Deformaciones Unitarias [96].	133
193	Registro FEM Una Celda de Patrón Lineal [97].	133
194	Análisis Estático Una Celda Lineal - Tensiones [97].	134
195	Análisis Estático Una Celda Lineal - Desplazamiento [97].	134
196	Análisis Estático Una Celda Lineal - Deformaciones Unitarias [97].	135
197	Registro FEM Tres Celdas de Patrón Lineal [98].	135
198	Análisis Estático Tres Celdas Lineal - Tensiones [98].	136
199	Análisis Estático Tres Celdas Lineal - Desplazamiento [98].	136
200	Análisis Estático Tres Celdas Lineal - Deformaciones Unitarias [98].	137
201	Registro FEM Una Celda de Patrón Triangular [99].	139
202	Análisis Estático Una Celda Triangular - Tensiones [99].	139
203	Análisis Estático Una Celda Triangular - Desplazamiento [99].	140
204	Análisis Estático Una Celda Triangular - Deformaciones Unitarias [99].	141
205	Registro FEM Tres Celdas de Patrón Triangular [100].	141
206	Análisis Estático Tres Celdas Triangular - Tensiones [100].	142
207	Análisis Estático Tres Celdas Triangular - Desplazamiento [100].	142
208	Análisis Estático Tres Celdas Triangular - Deformaciones Unitarias [100].	143
209	Registro FEM Una Celda de Patrón Trapezoidal [101].	145
210	Análisis Estático Una Celda Trapezoidal - Tensiones [101].	145
211	Análisis Estático Una Celda Trapezoidal - Desplazamiento [101].	146
212	Análisis Estático Una Celda Trapezoidal - Deformaciones Unitarias [101].	147
213	Registro FEM Tres Celdas de Patrón Trapezoidal [102].	147
214	Análisis Estático Tres Celdas Trapezoidal - Tensiones [102].	148
215	Análisis Estático Tres Celdas Trapezoidal - Desplazamiento [102].	148
216	Análisis Estático Tres Celdas Trapezoidal - Deformaciones Unitarias [102].	149
217	Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#1[103]	153
218	Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#2[103]	154
219	Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#3[103]	155
220	Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#4[103]	156
221	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón lineal de 2 celdas [103] . . .	158
222	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón lineal de 2 celdas[103]	159
223	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón lineal de 2 celdas[103]	160

224	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón lineal de 6 celdas[103]	161
225	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón lineal de 6 celdas [103]	162
226	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón lineal de 6 celdas[103]	163
227	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#4 con un patrón lineal de 6 celdas[103]	164
228	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón trapezoidal de 1 celda [103]	165
229	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón trapezoidal de 1 celda[103]	166
230	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón trapezoidal de 1 celda[103]	167
231	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón trapezoidal de 3 celdas[103]	169
232	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón trapezoidal de 3 celdas[103]	170
233	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón trapezoidal de 3 celdas[103]	171
234	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#4 con un patrón trapezoidal de 3 celdas [103]	172
235	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón triangular de 1 celda[103]	173
236	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón triangular de 1 celda[103]	174
237	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón triangular de 3 celdas[103]	175
238	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón triangular de 3 celdas[103]	176
239	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón triangular de 3 celdas[103]	177
240	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#4 con un patrón triangular de 3 celdas[103]	178
241	Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#5 con un patrón triangular de 3 celdas[103]	179
242	(a) TB6612FNG Driver Dual Puente H Pololu. (b) Datasheet. [106]	192
243	(a) Sensor De Presión Mps20n0040d-d. (b) Datasheet de Sensor Mps20n0040d-d [106]	193
244	Prueba de sensor de presión[106]	193
245	Silicona 00-33AF Parte A y B. [106]	194
246	Patrón lineal prueba#1 y #2[106]	194
247	Patrón triangular prueba#1 [106]	195
248	Patrón trapezoidal prueba #1 y #2 [106]	195
249	Prueba de actuador [106]	196
250	Tapa de acrílico [106].	196

Índice de tablas

I	Autómatas famosos[2]	4
II	Propiedades de las siliconas [44]	20
III	Tabla de medidas de pieza: base #1	33
IV	Tabla de medidas de pieza lateral: fino #1	33
V	Tabla de medidas de pieza: lateral grueso #1	34
VI	Tabla de medidas de pieza:tapa superior #1	34
VII	Tabla de medidas de pieza: varilla triangular #1	35
VIII	Tabla de medidas de pieza: tapa de vertido #1	35
IX	Tabla de medidas de pieza: base #2	37
X	Tabla de medidas de pieza: Lateral Fino #2	37
XI	Tabla de medidas de pieza: Lateral Grueso #2	38
XII	Tabla de medidas de pieza: Tapa Superior #2	38
XIII	Tabla de medidas de pieza: Varilla #2	39
XIV	Tabla de medidas de pieza: Tapa de Vertido #2	39
XV	Tabla de especificaciones de matriz lineal- patrón triangular	42
XVI	Tabla de especificaciones de matriz triangular en el actuador	43
XVII	Tabla de medidas de pieza: base #3	47
XVIII	Tabla de medidas de pieza: lateral grueso #3	48
XIX	Tabla de medidas de pieza: base	49

XX	Tabla de medidas de pieza: Lateral grueso	50
XXI	Tabla de medidas de pieza: Lateral fino	51
XXII	Tabla de medidas de pieza: Tapa superior	51
XXIII	Comparación entre Ecoflex 00-30 y Ecoflex 00-33 AF	57
XXIV	Tabla de Parámetros: Celda Lineal	66
XXV	Tabla de parámetros y valores de celda lineal	67
XXVI	Tabla de parámetros y valores del patrón lineal: Una Celda	68
XXVII	Tabla de parámetros y valores del patrón lineal: Dos Celda	68
XXVIII	Tabla de parámetros y valores del patrón lineal: Tres Celda	70
XXIX	Tabla de parámetros, símbolos y unidades de Celda Triangular	73
XXX	Tabla de parámetros y valores de celda Triangular	74
XXXI	Valores de los parámetros de celda triangular	74
XXXII	Tabla de parámetros y valores del patrón triangular: Una Celda.	75
XXXIII	Tabla de parámetros y valores del patrón triangular: Una Celda	75
XXXIV	Tabla de parámetros y valores del patrón triangular: Dos Celdas	76
XXXV	Tabla de parámetros y valores del patrón triangular: Tres Celdas	77
XXXVI	Tabla de parámetros, símbolos y unidades de Celda Trapezoidal	80
XXXVII	Tabla de parámetros y valores de celda Trapezoidal	80
XXXVIII	Tabla de parámetros y valores del Patrón Trapezoidal : Una Celda	84
XXXIX	Tabla de parámetros y valores del patrón Trapezoidal: Una Celda	84
XL	Tabla de parámetros y valores del patrón trapezoidal: Dos Celdas	85
XLI	Tabla de parámetros y valores del patrón trapezoidal: Tres Celdas	86
XLII	Parámetros de Prueba de Tracción	92
XLIII	Comparación de Probeta simulada y Probeta Real: Patrón Lineal	113
XLIV	Comparación de Probeta simulada y Probeta Real: Patrón Triangular	114
XLV	Comparación de Probeta simulada y Probeta Real: Patrón Trapezoidal	116
XLVI	Piel de Recubrimiento Lineal	120
XLVII	Comparación: Piel de Recubrimiento Lineal	120
XLVIII	Piel de Recubrimiento Triangular	121
XLIX	Comparación: Piel de Recubrimiento Triangular	121
L	Piel de Recubrimiento Trapezoidal	122
LI	Comparación: Piel de Recubrimiento Trapezoidal	122
LII	Patrón Lineal - Tiempos de Locomoción	129
LIII	Patrón Triangular - Tiempos de Locomoción	129
LIV	Patrón Trapezoidal - Tiempos de Locomoción	130
LV	Tensión mínima de von Mises en diferentes configuraciones	137
LVI	Tensión máxima de von Mises en diferentes configuraciones	137
LVII	Desplazamientos Máximos	138
LVIII	Desplazamientos Mínimos	138
LIX	Deformaciones Máximas	138
LX	Deformaciones Mínimas	139
LXI	Tensión mínima de von Mises en diferentes configuraciones	143
LXII	Tensión Máxima de von Mises en diferentes configuraciones	144
LXIII	Desplazamientos Mínimos	144
LXIV	Desplazamientos Máximos	144
LXV	Deformaciones Mínimas	144
LXVI	Deformaciones Máximas	145
LXVII	Tensión mínima de von Mises en diferentes configuraciones	150
LXVIII	Tensión Máxima de von Mises en diferentes configuraciones	150
LXIX	Desplazamientos Mínimos	150

LXX	Desplazamientos Máximos	150
LXXI	Deformaciones Mínimas	151
LXXII	Deformaciones Máximas	151
LXXIII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#1 sin cortes	153
LXXIV	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#2 sin cortes	154
LXXV	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#3 sin cortes	155
LXXVI	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#4 sin cortes	156
LXXVII	Modulo elástico de probetas	157
LXXVIII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#1 con un patrón lineal	158
LXXIX	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#2 con un patrón lineal	159
LXXX	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#3 con un patrón lineal	160
LXXXI	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#1 con un patron lineal	161
LXXXII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#2 con un patron lineal	162
LXXXIII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#3 con un patron lineal	163
LXXXIV	Tabla de especificaciones de una prueba de tracción en base a un patrón lineal	164
LXXXV	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#1 con un patrón trapezoidal	165
LXXXVI	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#2 con un patrón trapezoidal	166
LXXXVII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#3 con un patron trapezoidal	167
LXXXVIII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#1 con un patrón trapezoidal	169
LXXXIX	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#2 con un patrón trapezoidal	170
XC	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#3 con un patrón trapezoidal	171
XCI	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#4 con un patrón trapezoidal	172
XCII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#1 con un patrón triangular	173
XCIII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#2 con un patrón triangular	174
XCIV	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#1 con un patrón triangular	175
XCV	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#2 con un patrón triangular	176
XCVI	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#3 con un patrón triangular	177
XCVII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#4con un patrón triangular	178
XCVIII	Valores obtenidos del ensayo de torsión- Probeta#5 con un patrón triangular	179
XCIX	Evaluación final entre todos los patrones.[104]	180
C	Cronograma de actividades detallado. [104]	182
CI	Cronograma de actividades detallado. [104]	183
CII	Presupuesto detallado [104]	184

I. INTRODUCCIÓN

En un mundo en constante evolución tecnológica, la robótica blanda emerge como una respuesta ingeniosa a las limitaciones de los robots rígidos tradicionales. Estos últimos, aunque eficientes en ambientes estructurados, enfrentan dificultades al interactuar con objetos delicados y al operar en entornos no convencionales. En esta perspectiva, la presente propuesta de investigación se sumerge en las profundidades de la robótica blanda, una disciplina en auge que busca superar estas barreras y expandir las posibilidades de la automatización.

En el núcleo de esta investigación se encuentra la incorporación de patrones kirigami en el diseño de robots blandos. El kirigami, un arte ancestral que combina la destreza del origami con técnicas de corte, aporta un enfoque innovador para la creación de estructuras mecánicas complejas y adaptables. La técnica de Kirigami ha revolucionado el diseño y la fabricación de objetos y sistemas, especialmente en el campo de la robótica. Al aplicar esta técnica en el diseño de superficies y estructuras que interactúan en entornos desafiantes. La transformación de las láminas planas en una estructura con textura 3D imita la piel escamada de serpientes, lo que permite que el dispositivo se mueva eficientemente a través de diferentes entornos.

A medida que se avanza en este trabajo, se explora a fondo los principios fundamentales que rigen la robótica blanda y la técnica kirigami. Una revisión exhaustiva del estado del arte proporciona una panorámica de los avances y las limitaciones en ambos campos, al mismo tiempo que revela las conexiones y sinergias posibles entre ellos. Con esta base sólida, se puede acercarse al corazón del estudio: La implementación de patrones kirigami en la ingeniería de robots blandos.

El análisis que se presenta en este trabajo abarca el estado actual de la robótica blanda y el kirigami, resaltando sus virtudes y desafíos. A partir de esta base, se avanza en la delineación de una metodología de diseño que fusiona de manera coherente los patrones kirigami en el tejido de robots blandos, permitiendo una mayor diversidad de formas y movimientos.

El objetivo principal es descifrar los mecanismos y procesos que permiten la integración exitosa de estos patrones en la estructura de los robots. Exploramos el diseño de circuitos neumáticos que se entrelazan con estas estructuras, permitiendo una mayor adaptabilidad y versatilidad en el movimiento. Mediante el uso de herramientas de modelado y simulación, se busca optimizar y prever el rendimiento de estas creaciones híbridas.

En resumen, esta investigación se adentra en un territorio innovador, donde la unión entre la robótica blanda y el kirigami crea un espacio fértil para el desarrollo de soluciones robóticas más adaptables y eficientes. A través del análisis, el diseño y la implementación, se espera que contribuya al crecimiento de un campo que promete revolucionar la forma en que las personas interactúan con la tecnología y abordan desafíos complejos en el mundo contemporáneo.

En última instancia, los resultados presentados en estas páginas abren puertas hacia futuras investigaciones y despiertan la imaginación para el diseño de robots blandos innovadores, capaces de impactar múltiples aplicaciones en la sociedad actual.

II. PROBLEMA DE ESTUDIO

Los robots en la actualidad ayudan en las distintas áreas de trabajo industrial, así como en una serie de actividades donde el ser humano requiere de su ayuda para lograr una mayor eficiencia, ya sea por problemas de accesibilidad, flexibilidad, búsqueda de precisión o control de los distintos procesos, así como la seguridad de los trabajadores. Por ello existen diversos modelos de automatización cuya ventaja es eliminar cualquier tipo de error humano y aumentar la fiabilidad en los procesos, cabe recalcar que existen diversos robots que se inspiran de los movimientos característicos de las personas al igual que de distintos animales con y sin extremidades para lograr su objetivo.

En distintas empresas existe algo llamado “diseño de la red de tuberías” lo cual es un factor muy importante al momento de instalar la planta, ya que se requiere de una serie de elementos esenciales, como lo son: el tipo de material, la ubicación, su normativa y el tipo de trabajo a realizarse. Las tareas que se realizan en el interior de las tuberías han evolucionado de acuerdo con la implementación de los distintos equipos los cuales son desarrollados para el cumplimiento de las distintas actividades: inspección, sonorización y las acciones realizadas sobre otros dispositivos que permiten el control eficiente de la planta disminuyendo el número de fallas.

Se utilizan distintas herramientas como cámaras de inspección y diversas tipologías:

- Robot tipo con ruedas.
- Robot tipo presión de pared.
- Robot tipo tornillo.
- Robot tipo volador.
- Robot tipo caminante.
- Robot tipo oruga.

Los robots diseñados para el control y diagnóstico en el interior de tuberías son en su mayoría mecanismos ineficientes en relación con la vida útil de los componentes presentes en el diseño mecánico, los cuales permiten efectuar el desplazamiento. En cuanto a su capacidad de adaptabilidad se requiere conocer las delimitaciones en su área de trabajo, además de ser muy escasos en su totalidad. Los problemas presentes al momento de visualizar el interior de una tubería, es que esta depende del direccionamiento, es decir, de la accesibilidad y la dificultad para recorrer la tubería de acuerdo con las limitaciones del interior, así como los problemas presentes cuando se dan recorridos con bifurcaciones.

El problema que presenta una de las opciones más rentables del mercado “robots tipo ruedas” a pesar del sistema a control remoto implementado para su monitoreo, es que este no es capaz de sortear los obstáculos presentes en el recorrido, este tipo de mecanismo ha sido implementado en Quito “ROVVER” [1]. Entre los problemas más comunes: se produce un desgaste en los neumáticos debido al entorno de trabajo, al estar en contacto directo con fluidos su locomoción se ve afectada. Su limitación más relevante es que se diseñan y fabrican en base al tamaño de las tuberías donde se pretende realizar el trabajo por ende su costo de compra y mantenimiento es elevado.

El prototipo con ruedas debido a sus restricciones en cuanto a la adaptabilidad del entorno y su rendimiento en el desplazamiento, no son los más adecuados para este tipo de actividades. Los expertos recomiendan el uso de actuadores neumáticos blandos como una de las herramientas de diseño más utilizadas debido a su capacidad de adaptabilidad del material y su mejora en el rendimiento del mecanismo a medida que se desplaza. La robótica suave nos permite desarrollar diversos prototipos respetando la flexibilidad del diseño, la confiabilidad y robustez dentro del campo de aplicación, pero sobre todo brinda seguridad al operario durante el trabajo.

Aun así, estos actuadores blandos no son suficientes para garantizar un desplazamiento adecuado, debido al problema de expansión volumétrica que presenta el material y la falta de control de sus propiedades mecánicas durante su movimiento. Por ello uno de los grandes avances en relación con esta técnica es la implementación de una serie de patrones de piel kirigami.

Esta técnica pretende mejorar el rendimiento del mecanismo aumentando la tracción con su entorno. Una vez el actuador es revestido con el patrón seleccionado, su globo interno se infla por medio de un circuito, su expansión volumétrica viaja a través de las cámaras de aire sin restricción alguna. Ocasionando que el actuador neumático tenga limitaciones en sus movimientos de torsión y extensión axial, así como el rendimiento en su desplazamiento.

III. OBJETIVOS

III-A. Objetivo General

Desarrollar un mecanismo basado en robótica suave que permita el desplazamiento autónomo en el interior de una tubería horizontal, equipado con un patrón kirigami para la reducción del tiempo de locomoción.

III-B. Objetivos específicos

- Diseñar diferentes patrones de kirigami para la verificación de su eficiencia en el desplazamiento dentro de una tubería horizontal.
- Implementar un circuito neumático con un sistema de alimentación que permita el desplazamiento independiente del mecanismo.
- Comparar el desplazamiento del prototipo con la implementación de distintos patrones de piel kirigami para la selección del diseño que tenga el mejor desempeño.

IV. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

IV-A. Antecedentes históricos

A lo largo de la historia, la humanidad ha creado máquinas que imitan funciones y movimientos de seres vivos. Los griegos acuñaron una palabra para estas máquinas, que se traduce como "máquina que imita". Utilizaron sistemas hidráulicos, poleas y palancas para crear mecanismos recreativos y asombrar a los adoradores de los templos. La cultura árabe difundió estos conocimientos y desarrolló mecanismos para el entretenimiento y la vida cotidiana, como dispensadores automáticos de agua. Uno de los primeros autómatas conocidos es el gallo de Estrasburgo (1352). En los siglos XV y XVI, Leonardo da Vinci y otros crearon muñecos mecánicos que compartían similitudes con los robots. Durante los siglos XVII y XVIII, se diseñaron ingenios mecánicos para el entretenimiento de la corte, como el pato de Vaucanson y los muñecos de la familia Droz. En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que podía dibujar utilizando levas. A finales del siglo XVIII y principios del XIX, se introdujeron dispositivos automáticos en la industria textil, marcando el comienzo de la automatización industrial.

Tabla I
AUTÓMATAS FAMOSOS[2]

Año	Autor	Autómata
1352	Desconocido	Gallo de la catedral de Estrasburgo.
1499	L. Da Vinci	León mecánico.
1525	J. Turriano	Hombre de palo.
1738	J de Vaucanson	Flautista, tamborilero, pato, muñecas de tamaño humano.
1769	W. Von Kempelen	Jugador de ajedrez.
1770	Familia Droz	Escriba, organista, dibujante.
1805	H. Maillardert	Muñeca mecánica capaz de dibujar.

La palabra robot se empleó por primera vez en 1921 en una obra de teatro llamada "R.U.R" estrenada por el escritor checo Karel Capek (1890-1938). Su origen es la palabra eslava robota la cual se refiere al trabajo realizado de manera forzada. Los robots de dicha obra eran máquinas androides los cuales deben su creación a una fórmula que obtuvo el científico llamado Rossum. Los robots de la obra realizaban actividades que requerían de un alto consumo de energía pero finalmente se rebelan contra sus creadores propietarios y acaban con la vida humana, a excepción de su creador, ellos deseaban saber el cómo reproducirse al igual que los humanos.

Pero sin duda alguna fue el escritor americano de origen ruso Isaac Asimov (1920-1992) quien impulsó el término "robot". En octubre de 1945 publicó por primera vez en la revista GALAXY SCIENCE FICTION las tres leyes de la robótica.

1. Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot ha de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley[2].

Cabe recalcar que en la novela Robots e Imperio publicada en 1985 se habla de una cuarta ley que incorpora Asimov, conocida como ley cero la cual dice que "un robot no puede lastimar a la humanidad o, por falta de acción, permitir que la humanidad sufra daño.

IV-A1. La robótica :

La primera patente de un dispositivo robótico fue solicitada en marzo de 1954 por el inventor británico C.W. Kenward. Sin embargo, fue el ingeniero norteamericano George Devol el que estableció las bases del robot industrial moderno. Devol concibió la idea de un dispositivo encargado a la transferencia de artículos programada la cual se patentó en 1961 no obstante es el director de ingeniería de la división aeroespacial Joseph F. Engelberger que en

1956 pone esta idea en conocimiento y comienza a trabajar en la utilización industrial de sus máquinas. Pero es la empresa AMF la que emprende la construcción de estos mecanismos que más tarde por razones comerciales se las denomina por primera vez con el término “robot” a pesar de no contar con una apariencia humana [2].

La robótica es la ciencia encargada de describir todas las tecnologías relacionadas con el termino robot. Estudia el diseño y construcción de máquinas que son capaces de imitar tareas que por lo general realiza el ser humano o que requieren el uso de algún tipo de esfuerzo o inteligencia.

La robótica ha creado una serie de cambios tecnológicos en la actualidad y nos da una idea sobre el trabajo en un futuro próximo. McKerrow (1986) en su libro “Introducción a la robótica” nos dice que la robótica es una disciplina que involucra:

- El diseño, fabricación, control y programación de robots.
- El uso de robots para resolver problemas.
- El estudio de los procesos de control, sensores y algoritmos usados en humanos, animales y máquinas.
- Aplicación de procesos de control y algoritmos al diseño de control.

La evolución de los autómatas apunta a que la automatización de estos tipos de robots puede servir para lograr un aumento de movilidad, destreza y autonomía en sus acciones.

La robótica en la actualidad posee un gran número de robots que no solo son utilizados para aplicaciones industriales, sino que también se pueden encontrar en diversas áreas con distintas funciones a cumplir dependiendo el campo en donde se encuentren tal es el caso de los robots espaciales, robots militares y robots móviles. Sus aplicaciones también varían y podemos encontrar desde aplicaciones médicas hasta aplicaciones agrícolas.

IV-A2. Robots móviles:

A partir de la década de los setenta, las investigaciones que se realizaban a estos tipos de robots incrementaron de manera que el profesor Nilsson en el SRI desarrolló un robot llamado Shakey y se convirtió en el primer mecanismo capaz de utilizar inteligencia artificial para controlar sus movimientos. Otros robots que destacan son el Newt desarrollado por Hollis y Hilare desarrollado en el LAAS en Francia.

Un robot móvil se define como un sistema electromecánico que es capaz de desplazarse de manera autónoma, es decir que no se encuentra sujeto físicamente a un punto específico. Normalmente su control es en lazo cerrado y su desplazamiento es adecuado a la locomoción dada.



Figura 1. Robot móvil para la investigación en entornos de interiores y exteriores [3].

Estos robots se clasifican por el tipo de locomoción que ejercen y sus medios de movimientos más implementados son: por ruedas, por patas y por orugas. Las aplicaciones de estos robots son muy amplias de manera que se los puede ocupar para exploración minera, exploración planetaria y misiones de búsqueda y rescate.

Los robots móviles por lo general fueron diseñados para imitar comportamientos similares a los que observan en su entorno tanto a personas como animales, la estructura del robot móvil es muy similar a la estructura que poseen los seres vivos. Teniendo diferentes subestructuras, tales como:

- **Estructura mecánica:** se pueden encontrar con ruedas, patas y orugas.
- **Actuadores:** motores, luces, brazos, ruedas y cualquier elemento que permita al robot interactuar con el entorno.
- **Sensores:** sonar, láser, cámaras y cualquier elemento que proporcione información del entorno.
- **Inteligencia:** métodos, algoritmos, etc. Estos van a permitir que, a partir de la información de dichos sensores, estos van a interactuar con el entorno [4].

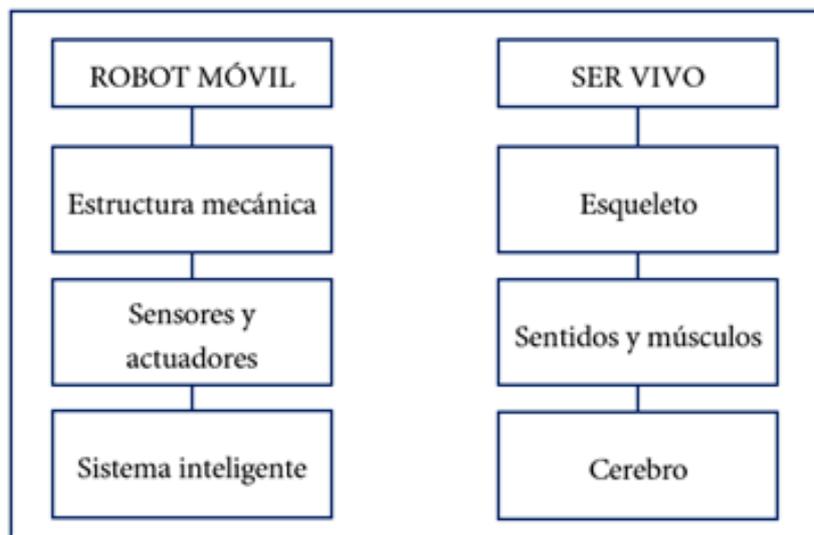


Figura 2. Estructura de un robot móvil y un ser vivo [4].

IV-B. Robótica Blanda

IV-B1. Definición:

La mayoría de los robots presentes en nuestra vida cotidiana y aquellos que desarrollan trabajos específicos en las industrias, contribuyen al progreso de la humanidad. Estos están contruidos con materiales rígidos, por este motivo presentan dificultad para operar en entornos no estructurados y altamente congestionados. Las diferencias del módulo elástico de los componentes robóticos y tejido de organismos vivos que interviene en los procesos provocan problemas de seguridad.

Debido al auge de la tecnología y las diferentes aplicaciones de la robótica en los distintos campos de la industria, existe un interés creciente en el desarrollo de controladores y dispositivos que permitan crear robots blandos autónomos que puedan interactuar de forma inteligente y adaptarse a entornos sin necesidad de controles externos[5]. La robótica blanda se centra en el diseño y desarrollo de robots flexibles y deformables, hecho de materiales como silicona, caucho y otros elastómeros.

Una medida referente a la rigidez del material es el módulo de elasticidad o módulo de Young, es una cantidad que se escala con la proporción del tejido entre el porcentaje de elongación y fuerza. Este parámetro se define para

barras prismáticas que están sujetas a cargas axiales y pequeñas deformaciones, por lo tanto, tiene una relevancia limitada para robots blandos. Sin embargo, es una medida útil para comparar la rigidez de los materiales que están presentes en el robot blando.

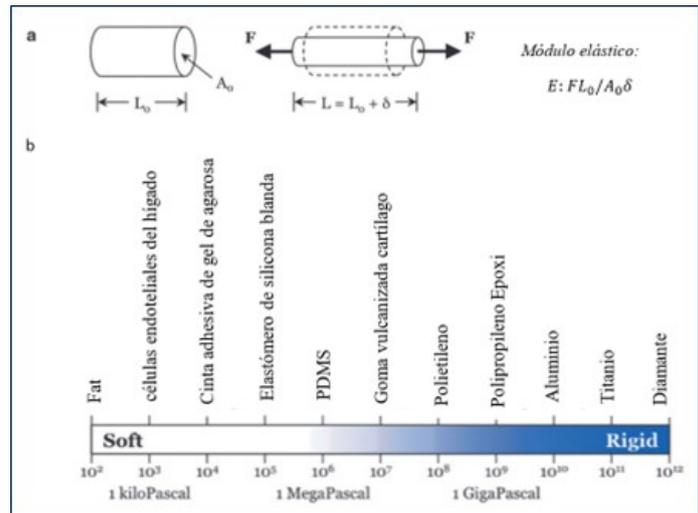


Figura 3. Escala de módulo elástico de varios materiales [6].

Como se muestra en la figura la mayoría de los robots convencionales están compuestos de materiales como plásticos y metales por ende tienen un módulo superior a 10^9 Pa.

Por el contrario de la mayoría de los materiales de los organismos naturales como tejido muscular y piel el módulo es de $10^2 - 10^6$ Pa, es decir son tres a diez ordenes de magnitud menos rígidos que los robots convencionales [6].

Aunque el campo de manipuladores robóticos se fundó en la década de 1960, la primera investigación formal sobre el diseño y el control se da en la década de 1990. Uno de los primeros artículos sobre las definiciones de la robótica suave [7], hace referencia al deseo de robots compatibles y seguros. Se busca que la adaptabilidad y la interacción segura aumente de los robots rígidos a los blandos, sin embargo, la velocidad, la precisión y la capacidad de carga disminuyen.

Estos sistemas son una respuesta a la evolución del diseño de mecanismo sin eslabones rígidos, con estructuras elásticas dado que sus cuerpos son altamente deformables [8]. Poseen un alto grado de libertad, permitiendo realizar con flexibilidad las tareas irregulares de una manera menos complicada que los robots tradicionales. Además, pueden interactuar de manera cómoda y segura con humanos, locomoción en ambientes no estructurados y el agarre robusto y eficaz de los objetos.

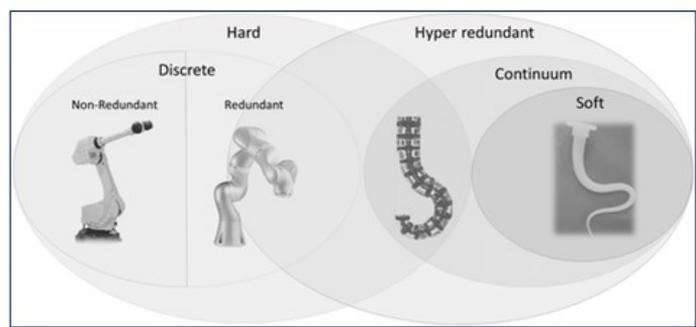


Figura 4. Evolución de manipuladores de enlace rígido [9].

En cuanto a su finalidad en las industrias esta puede soportar cargas útiles blandas y frágiles sin causar daño, debido al material blando compatible con cualquier entorno. Tienen una ventaja dentro del campo de trabajo, es que genera poca resistencia a las fuerzas de compresión, por lo tanto, puede adaptarse a los obstáculos. Un ejemplo por ver en las industrias alimentarias [10], permiten adecuarlos como robots de servicio ya sea en espacio reducidos o entornos no estructurados.

La funcionalidad de la robótica blanda se relaciona con la presión, este se considera un actuador que tiene un comportamiento de adaptabilidad con los materiales, combinando el transporte de fluidos y la presión que se genera para provocar cambios de forma y presión deseados. De acuerdo con las distintas definiciones acerca [10], muchos robots que se definen como blandos aun poseen partes rígidas ya sea en su estructura interna o en la parte de su actuación.

El comportamiento de materiales blandos es complejo de manejar y controlar, estos materiales son vulnerables a agresiones externas. Su estructura es continua por ende el contacto con el entorno juega un papel importante en la movilidad. Para ello es necesario integrar un conjunto de sensores y actuadores en el sistema. Estos parámetros presentan desafíos adicionales porque sus dispositivos de detección y actuación por lo general son integrados dentro del cuerpo del robot y toda su funcionalidad.

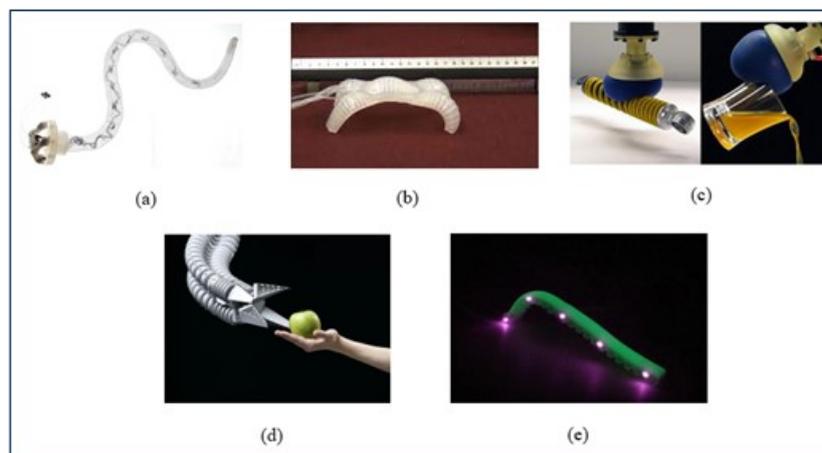


Figura 5. Ejemplos de robots intrínsecamente suaves: (a) Ejemplo de un tentáculo de pulpo blando bioinspirado, basado en una red polimérica trenzada que se puede contraer mediante actuadores SMA [11]. (b) Robot blando multipaso [12]. (c) Gripper Universal [13]. (d) Asistente de manipulación biónica de FESTO [14]. (e) GoQBot [15].

La investigación de elastómeros y la fabricación aditiva ayuda a mejorar la integración de materiales blandos y rígidos en la misma estructura, debido a este interés se analizan nuevos materiales que son maleables y flexibles y que de acuerdo con sus propiedades de reparación, es posible luego de haber sido desgarrados, perforado o dañado recuperar su estado inicial. Se visualiza que la robótica se encuentra en su etapa de desarrollo tecnológico debido al trabajo en conjunto de máquinas y humanos, surge la robótica blanda como una solución en camino para las nuevas necesidades que presenta la industria en los distintos campos.

Algunas de sus aplicaciones incluyen tecnologías de rehabilitación y asistencia, dispositivos médicos, tecnologías portátiles y automatización industrial. Los robots blandos también se pueden diseñar para imitar los movimientos y comportamientos de los organismos vivos, lo que los hace útiles para la investigación en campos como la biomecánica y la ingeniería bioinspirada.

IV-B2. Inspiración Biótica:

Inspirados en organismos vivos, los ingenieros han comenzado a explorar el control y el diseño de robots de cuerpos blandos compuestos de materiales intrínsecamente compatibles, lo que les permite imitar el movimiento continuo de animales y plantas [16]. El interés creciente en morfologías no convencionales en sistemas robóticos de acuerdo con sus propiedades mecánicas como sus formas corporales, elasticidad, viscosidad, suavidad, densidad son temas de investigación que nos permite comprender el funcionamiento de los cuerpos incorporados.

Las investigaciones acerca de las interacciones entre el sistema físico y el medio ambiente son importantes para el desarrollo de tecnologías que se centran en comportamientos adaptativos emergentes. Estos sistemas biológicos utilizan materiales blandos, elásticos y flexibles para sobrevivir entornos no estructurados complejos. Las diferentes especies adaptan su estructura y forma al medio donde viven para lograr moverse, alimentarse y protegerse de los depredadores.

La flexibilidad y la estructura de estos cuerpos, el diseño de sus garras y patas, diseño de alas y su capacidad de desplazamiento en superficies irregulares o completamente planas, así como su posibilidad para volar en condiciones complejas son algunas de las características que sirven de inspiración para que desarrolladores que buscan replicar las ventajas de las estructuras física y anatómicas de un gran número de especies [17].

Esqueletos hidrostáticos y musculares hidrostáticos

Los animales como los gusanos y las anémonas de mar carecen de rigidez en sus esqueletos, estos animales de cuerpos blandos dependen de “un esqueleto hidrostático” [18], estas cavidades cilíndricas están llenas de líquido o fluido que resiste un cambio significativo de volumen.

Las fibras de tejido conectivo de la pared muscular reforzada que tienen estos animales permiten a la musculatura disponer de sus dimensiones de tal forma que pueden ser activamente controlados, generando una gama diversa de movimientos y cambios de forma. Por lo tanto, se estudia que la transmisión de fuerza no se da por medio de enlaces rígidos, sino por la presión generada por el fluido encerrado.

Este principio simple sirve como base de apoyo y movimiento a un grupo diverso de animales de cuerpo blando. Una fuente popular de inspiración es el pulpo, que tiene tentáculos largos y flexibles que pueden agarrar y manipular objetos con gran destreza. Los investigadores han desarrollado robots blandos con apéndices similares a tentáculos que pueden usarse para tareas como agarrar objetos delicados o realizar cirugías mínimamente invasivas.

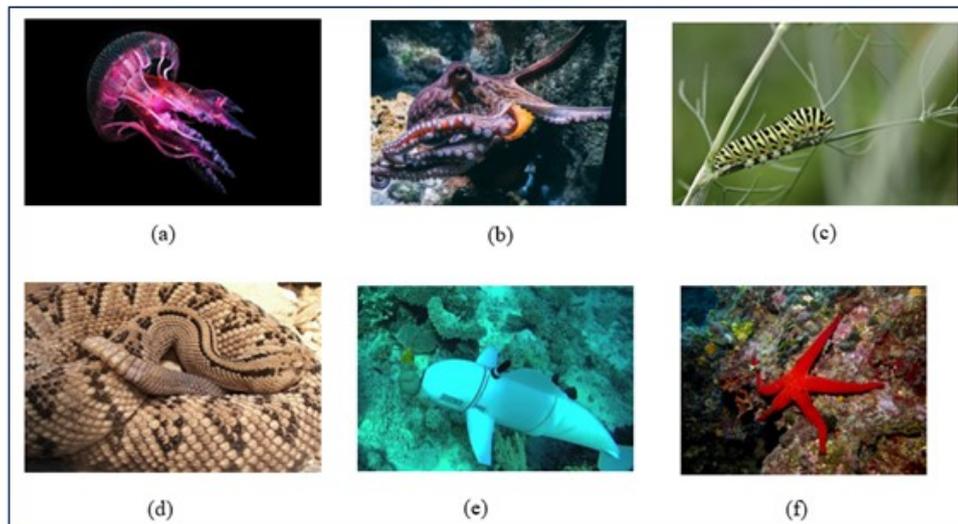


Figura 6. Ejemplos de animales que sirven para los dispositivos de bioinspiración (a) Medusa [19]. (b) Pulpo [20]. (c) Orugas [21]. (d) Serpientes [22]. (e) Pez [23]. (f) Estrella de mar [24].

Otros sistemas biológicos que han inspirado la investigación de la robótica blanda incluyen:

- Medusas: Se han desarrollado robots que puedan moverse por el agua con movimientos ondulantes similares.
- Orugas: Para realizar movimientos similares a los de una oruga, utilizan una serie de secciones.
- Serpientes: Son capaces de deslizarse por espacios reducidos e incluso escalar superficies verticales.
- Peces: Pueden nadar en el agua con movimientos más naturales que los robots rígidos tradicionales.

IV-B3. Tecnología tras los Robots Blandos:

Actuadores

De acuerdo con las capacidades extraordinarias de las estructuras blandas de animales y plantas, se han desarrollado robots duros que busca imitar estas estructuras y robots blandos que utilizan actuadores de polímeros electroactivos (EAP) y músculos artificiales neumáticos (PAM).

Robots duros con capacidades blandas

Se han desarrollado una gran variedad de robots y manipuladores terrestres (con patas, ruedas, reptantes y oruga), también acuáticos (capacidad de nadar) este tipo de mecanismo emplean principalmente materiales rígidos, pero poseen una flexibilidad que les permite recordar su estructura biológica. Respecto a ejemplos notables de robots duros inspiradas en estructuras blandas presentes en la naturaleza tenemos:

- Los robots que se arrastran utilizan locomoción ondulatoria, este se acopla de acuerdo con las deformaciones del robot y el suelo [25].
- Entre los robots que se arrastran también tenemos mecanismos trepadores con forma de serpiente y robots serpientes [26].
- Los robots nadadores que imitan el movimiento de los peces usando un enlace rígido tenemos [27].

También hay muchos robots con patas con estructuras rígidas que usan actuación eléctrica/magnética, pizoactiva o térmica, es decir, aleaciones con memoria de forma (SMA). Este es una aleación metálica, generalmente una combinación de níquel y titanio o nitinol. El material tiene la propiedad de “recordar”, su forma original, debido al SME el cual se puede encontrar en diferentes configuraciones y formas [27]. Poseen una elevada relación fuerza-peso, son mecánicamente muy simples, de fácil miniaturización, bajo precio y alta biocompatibilidad. Sin embargo, debido a que dependen de los cambios de temperatura hacen que estos sean lentos y difícil de controlar.

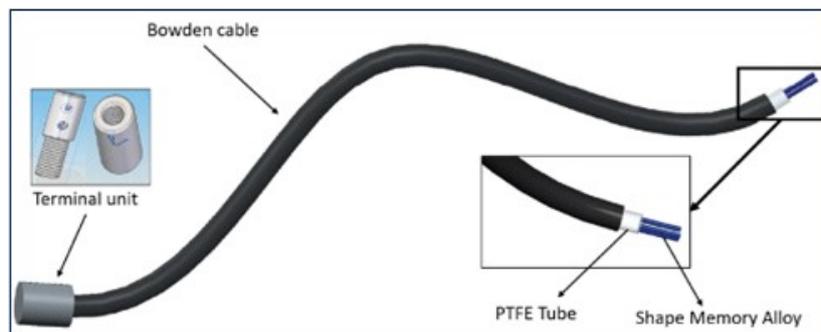


Figura 7. Componentes presentes en un actuador SMA [28].

Robótica Suave EAP

Polímeros electroactivos tienen muchas características entre las cuales podemos mencionar la tolerancia a la fractura, su bajo peso, flexibilidad, simplicidad estructural y una tensión de actuación relativamente grande que los hacen adecuados para robots blandos. Se fabrican a partir de materiales “inteligentes” capaces de sufrir deformaciones en respuesta a estímulos eléctricos adecuados.

Se pueden clasificar en términos generales en EAP electrónicos (elastómeros dieléctricos, elastómeros de injerto electrostrictivos, papel electrostrictivo, polímeros electro viscoelásticos, polímeros ferroeléctricos y elastómeros de cristal líquido) y EAP iónicos (nanotubos de carbono, polímeros conductores, fluidos electrorreológicos, geles de polímeros iónicos y polímeros iónicos).

Según [29], se concluye que los elastómeros dieléctricos son lo más cercanos a los animales. También decimos que los actuadores desarrollados mediante el uso de polímeros conductores se emplean para construir robots de inspiración biológica, por ejemplo, [30] es un robot flexible similar a una tortuga que puede gatear y andar bajo el agua usando sus cuatro patas al estas ser accionadas por el polímero conductor iónico ICPF.

Robótica Suave PAM

Son conocidos como actuadores de goma o actuadores neumáticos trenzados es un dispositivo contráctil, de acuerdo con su estudio lo definieron como actuadores neumáticos que se constituyen de una membrana tubular delgada y flexible con un refuerzo de fibra [31]. Estos poseen una malla de fibra de alta y baja densidad, físicamente es un músculo trenzado, mantiene una forma globalmente cilíndrica.

Los músculos artificiales neumáticos (PAM), también conocidos como actuadores McKibben, son ejemplos de actuadores blandos lineales compatibles compuestos por tubos de elastómeros en manguitos fibras, se caracteriza por su alto nivel de analogía funcional con el músculo esquelético humano. La relación de peso-fuerza máxima puede ser relativamente alta para una dimensión radial imitada y para un rango de presión convencional, un músculo artificial de 50 g puede desarrollar más de 1000N bajo una presión de 5 bares para un radio externo que varía entre 1,5 y 3 cm [32].

Los actuadores basados en PAM tiene algunas deficiencias, algunos de ellos necesitan de un compresor de aire voluminoso para su funcionamiento continuo, lo delimita la movilidad y dificulta la miniaturización, sin embargo, tienen ventajas sobre las EAP debido a que son químicamente más estables y fáciles de trabajar.

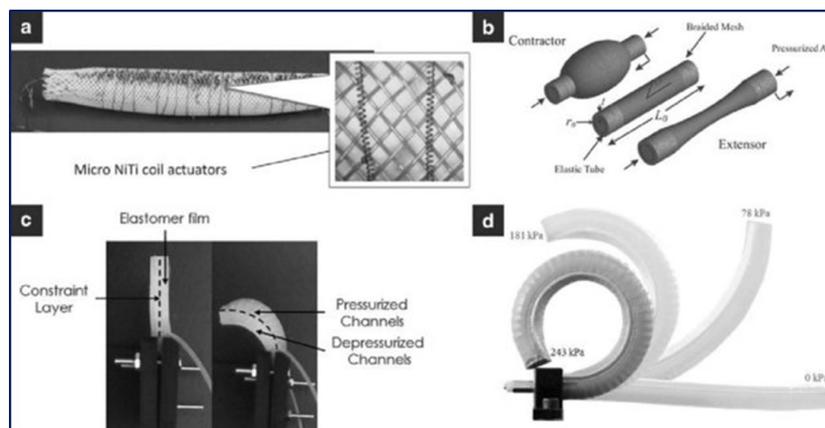


Figura 8. Robots blandos comunes: (a) Actuadores de aleación con memoria de forma (SMA). (b) Actuadores de músculos artificial neumático (PAM). (c) Actuadores de elastómero fluidoico (FEA). (d) FEA reforzados con fibra [33].

IV-B4. Sistema y Aplicaciones :

La clasificación de la robótica suave depende mucho de la definición considerada, además es un campo en pleno desarrollo, por lo tanto, muchos de los prototipos realizados no tienen ninguna aplicación en específico y son tomados como experimentos. Por esta razón, en esta sección se van a considerar cinco grupos principales.

Robots bioinspirados y Locomoción

Este es el primer grupo que se puede identificar y probablemente es el más importante porque permite el desarrollo de este nuevo campo de la robótica por medio del estudio de la naturaleza. Los investigadores se centran en la capacidad que tienen los animales en aprovechar sus estructuras en su mayoría blandas, por lo tanto, buscan reproducir innumerables organismos naturales.

Entre los estudios para la comprensión de esta área tenemos: el desarrollo de sistemas robóticos blandos basados en orugas[34], la biomecánica de gusanos permitió el estudio en conjunto de actuadores SMA [35] y elastómeros dieléctricos, también se ha explorado la locomoción cuadrúpeda.

De acuerdo con los ejemplos presentados en la figura, la mayoría de las especies que se han estudiado para poder replicar sus capacidades de adaptabilidad nos permiten concluir que los invertebrados más grandes se encuentran bajo el agua (medusas, pulpos) o bajo la tierra (gusanos), esto es una limitación para su estudio, pero también es una vertiente de los problemas del control de la rigidez.

Muchas de las aplicaciones de robótica blanda (búsqueda y rescate, monitoreo), requieren de un sistema móvil autónomo sin embargo la mayoría de estos sistemas se basan en señales de control enviadas a través de ataduras eléctricas. Se espera que en los próximos años se desarrollen mejores prototipos gracias a la aplicación de técnicas de fabricación aditiva y a los esfuerzos porque los robots posean la capacidad de percibir su forma y posición en el espacio facilitando su interacción con el entorno.

Robots Manipuladores

También se conocen como robots continuos, aunque en cuanto a su morfología están marcadamente bioinspirados en tentáculos y trompas, no comparten grupo con los robots antes mencionados. Se desarrollan para una aplicación en específico como agarrar objetos, inspección de lugares con poca accesibilidad, son características que los permiten diferenciar.

En cuanto al grupo de estos prototipos no todos pueden ser considerados blandos, pero todos poseen una gran capacidad de adaptabilidad con su entorno gracias a los grados de libertad (DOF). Su aplicación más famosa es el OctArm [36], son robots “continuos” de columna vertebral de múltiples secciones, son músculos neumáticos artificiales capaz de agarrar objetos de muchas formas y tamaños, pueden ser lo bastante grandes como conos de tráfico, balones, objetos cilíndricos huecos. Posee un agarre sólido a pesar de la vibración por los cambios en la aceleración, acuna los objetos frágiles de manera confiable.



Figura 9. Manipulador continuo representativo OctArm [37].

Pinzas Blandas

Es una de las áreas más avanzadas en cuanto a desarrollo y a prototipos presentes en la industria. La necesidad que presentaban los sectores de alimentación y agricultura en áreas de empaque y almacenamiento, influyo en la implementación de pinzas blandas que le permitirán agarrar objetos distribuyendo la fuerza de contacto y evitar dañar o dejar marcas.

Las tecnologías que permiten el desarrollo de estas pinzas son muy variadas. La solución más sencilla es crear dedos que actúen como una estructura pasiva constituida por varios enlaces que son accionados por cables y motores externos [10] , esta metodología no es necesariamente blanda. Otra tecnología puede ser las pinzas neumáticas que son aplicadas a nivel industrial, en este caso los dedos actúan como cámaras neumáticas para cuando se inflen, estas pueden agarrar los objetos, un claro ejemplo es el MultiChoiceGripper de Festo.

Robots médicos y portátiles

Los dispositivos médicos rígidos representan un alto riesgo para el paciente ya que pueden causar daños o molestias en el tejido, es por eso que una de las grandes ventajas de los sistemas robóticos blandos es la alta compatibilidad de sus módulos con los tejidos naturales para las aplicaciones médicas y portátiles. Puede resultar muy complicado reproducir perfectamente el movimiento de las articulaciones con aparatos ortopédicos rígidos. Por eso los investigadores buscan la posibilidad de integrar grados de cumplimiento en dispositivos portátiles blandos para la rehabilitación humana.

Cyborgs Blandos

Recientemente se ha comenzado a investigar sistemas robóticos que integran materiales biológicos (biológicamente compatibles). La característica de este material es que es extremadamente blando, un ejemplo de cómo se da su aplicación son los microbios que digieren material orgánico y producen electricidad alimentando de esta forma a los músculos artificiales para robots autónomos y los cardiomiocitos que se han utilizado para impulsar un cyborg inspirados en medusas.

Están diseñados para interactuar estrechamente con el cuerpo humano, es por eso el gran interés en desarrollar robots blandos que puedan diagnosticar, administrar fármacos, operar, realizar rehabilitación y a su vez que estos pueden ser usados como prótesis, órganos artificiales. Pueden representar un gran cambio de paradigma en el cuidado de la salud ya que brindan seguridad. En cuanto a su aplicación dentro del campo este tipo de robots permite el desarrollo de mejores endoscopios ya que reducen la posibilidad de dañar los tejidos y órganos de los pacientes, adicional pueden maniobrarse de una mejor manera.

Para la administración de fármacos es útil cuando el medicamento necesita llegar a una parte remota del cuerpo como el cerebro. En relación con los dispositivos portátiles no solo se desarrollan dispositivos de rehabilitación

como exoesqueletos y prótesis sino también dispositivos hápticos integrados con realidad virtual. Debido a su portabilidad generan al usuario más comodidad y menor fatiga física.

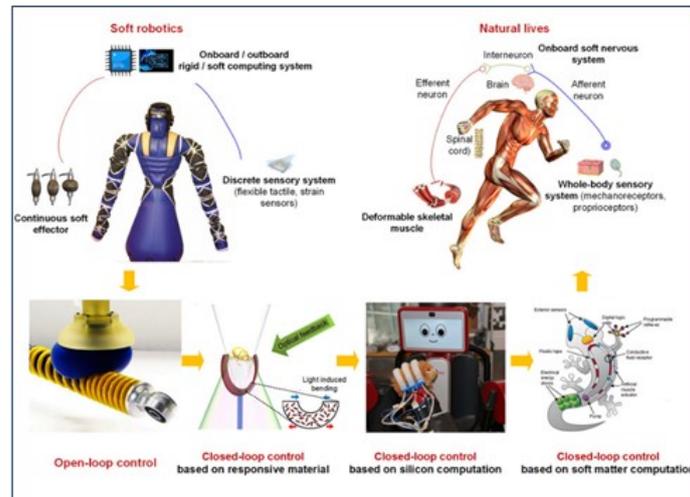


Figura 10. Biología y bioinspiración de la robótica blanda[38]

IV-C. Actuadores

Un actuador es un dispositivo capaz de producir movimientos mecánicos los cuales son necesarios para cualquier tipo de proceso dentro de una fábrica. Es capaz de transformar la energía hidráulica en neumática o eléctrica. De manera que esta energía de entrada pueda ser de manera manual por palancas y gatos o por pistones y válvulas entre otros. Estos diversos sistemas presentan una gran variedad de características pero al momento de evaluar la conveniencia de cada actuador con respecto a su eficiencia podemos tomar en consideración lo siguiente:

- Potencia.
- Peso y volumen.
- Precisión.
- Velocidad.
- Mantenimiento.
- Costo.

IV-C1. Actuadores neumáticos:

Son dispositivos utilizados para convertir la energía de presión del aire comprimido en energía mecánica para realizar distintos trabajos. Su fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. Los actuadores por lo general sirven para realizar tareas que impliquen el desplazamiento por el movimiento del pistón.

El cilindro de aire es un dispositivo eficiente para proporcionar un empuje lineal o movimientos que impliquen una línea recta. Los cilindros neumáticos se pueden utilizar para obtener movimientos lineales, giratorios y oscilatorios. Existen tres tipos de actuadores neumáticos:

- Actuador lineal o cilindro neumático.
- Actuadores rotativos o motores neumáticos.
- Actuadores de ángulo limitado.

Los actuadores neumáticos en los robots deben de disponer de una serie de instrumentos necesarios en la instalación de aire que se realiza los cuales son: filtros, secadores, sistemas de distribución y compresor.

IV-C2. Actuadores neumáticos blandos:

Los actuadores neumáticos siguen siendo la tecnología dominante en la robótica blanda debido a su peso ligero, a la respuesta tan rápida que proporciona y a la fácil implementación. Los actuadores neumáticos blandos ofrecen a la industria una alta destreza y seguridad además de grandes deformaciones necesarias para obtener una relación potencia-peso. Los actuadores blandos son generalmente construidos a partir de polímeros elastómeros esto con el fin de obtener un comportamiento elástico y lograr con esto su deformación.

Los robots blandos se fabrican a partir de actuadores neumáticos blandos los cuales van a constituir de actuadores de red neumática y reforzados con fibra. Estos poseen una variedad de movimientos que pueden realizar como lo son: flexión, extensión, contracción y torsión. Pueden fabricarse en un proceso de moldeo o imprimirse directamente en 3D.

IV-C3. Actuadores de flexión PneuNets:

Esta técnica consiste en un actuador compuesto principalmente por elastómero, pero en su interior posee una red neumática denominada PNEUNETS que son una serie de canales y cámaras que conforman la parte interna del elastómero, estas a su vez van a reaccionar a la aplicación de aire comprimido inflándose y creando un movimiento capaz de hacer que se enrolle sobre sí mismo. Al estar compuesto de un material blando tiene la capacidad de adaptar formas de objetos sin la necesidad de ejercer una gran fuerza sobre ellos.

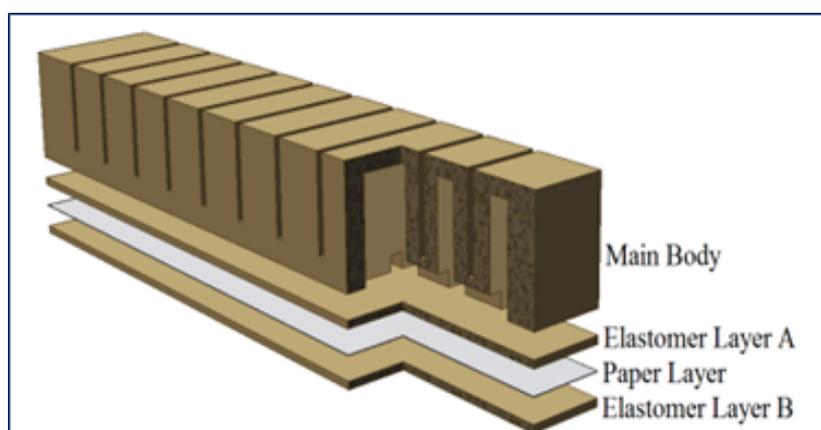


Figura 11. Actuadores PneuNets: Vista de sección transversal, los PneuNets conectados por el canal de aire [39].

Cabe recalcar que la base debe de contar con una capa de material que no sea hiperelástico ya que esto va a impedir que el actuador también se expanda en su parte inferior y con esto lograr que todo el aire que acaba de ingresar por el canal principal solo se enfoque en la parte superior en donde se encuentran las distintas partes que conforman el actuador. Por lo general este tipo de actuadores suelen pesar poco y se fabrican de manera sencilla proporcionando un movimiento no lineal.



Figura 12. Molde de los actuadores PenuNets [40].



Figura 13. Movimiento del actuador [40].

IV-C4. Actuadores reforzados con fibra:

Los actuadores reforzados con fibra (FRA) son un tipo de actuador que se utiliza en diversas aplicaciones de la ingeniería y robótica. Se fabrican mediante la incorporación de fibras, como son las fibras de carbono o aramida, en una matriz de polímero para así poder crear un material compuesto. Por lo general en este tipo de actuadores se suele aplicar un voltaje a las fibras y esto produce que el material se caliente y la matriz se deforme, lo que hace que el actuador se doble. Las diferencias que poseen los FRA con relación a los demás actuadores es que suelen ser más ligeros, más flexibles y tienen un tiempo de respuesta más rápido, cualidades similares que poseen los PNEUNETS. También generan más fuerza por unidad de peso en comparación con los actuadores tradicionales.

Poseen refuerzos inextensibles que impiden que se expanda radialmente cuando se le aplica aire a presión, permitiendo así solo su desplazamiento en el eje axial. A pesar de ser similar a los PNEUNETS este tipo de actuadores suelen requerir más tiempo de fabricación además de ser más caros que los actuadores tradicionales. En resumen, los actuadores reforzados con fibras son una tecnología avanzada que combina las propiedades únicas de las fibras sintéticas y los materiales poliméricos para proporcionar una solución electromecánica eficiente y versátil.

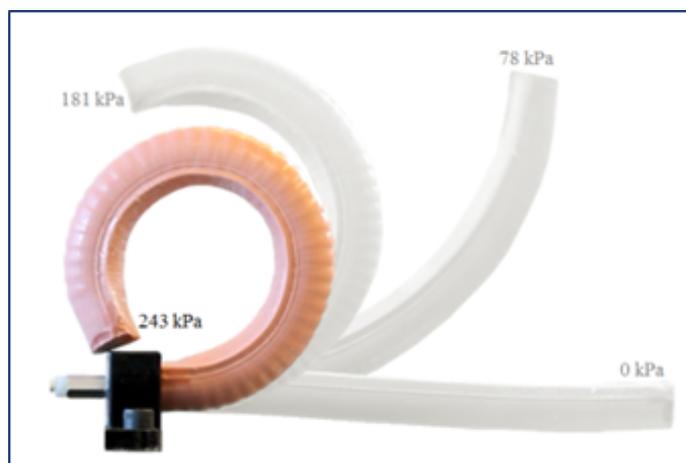


Figura 14. Movimiento de los actuadores reforzados con fibra [41] .

IV-C5. Músculos artificiales neumáticos:

Los músculos artificiales también conocidos con el nombre de “McKibben artificial muscles” son dispositivos accionados por aire que imitan el comportamiento de los músculos naturales. Consisten en un material elastomérico flexible el cual se encuentra rodeado por una malla trenzada sujeta por los extremos que se infla con aire comprimido para generar fuerza y movimiento. Esta tecnología es muy usada para dispositivos de rehabilitación y automatización industrial.

Estos actuadores tienen varias ventajas sobre los actuadores eléctricos o hidráulicos, una de ellas es el bajo costo y la alta confiabilidad. También son seguros ya que no generan calor ni producen fluidos peligrosos. Además, son flexibles, lo que permite una amplia gama de movimientos que se pueden controlar fácilmente mediante controles de presión de aire. Por lo general se utilizan en el desarrollo de dispositivos portátiles, como exoesqueletos, y en aplicaciones de robótica blanda, donde su flexibilidad y facilidad de control lo hacen ideales para crear robots flexibles y compatibles.



Figura 15. Músculos artificiales neumáticos[42]

IV-D. Materiales

IV-D1. Elastómeros:

PBAT: Poli (adipato-co-tereftalato de butileno), es un copoliéster alifático aromático sintético biodegradable. Su estructura química está formada en una parte por alifática que es responsable de su biodegradabilidad, adicional a esto la mezcla de poliésteres alifáticos y aromáticos permite controlar la velocidad de degradación mediante la variación de las composiciones [36].

TPE(TPU): Los elastómeros termoplásticos son materiales poliméricos multifuncionales que generalmente poseen la procesabilidad de los termoplásticos y la elasticidad del caucho vulcanizado. Se pueden transformar muy fácilmente, en cuanto a la dureza de en la que pueden ser fabricados va desde 5 Shore A hasta 70 Shore D. La fluidez, la densidad y la resistencia del material son características que pueden ser ajustadas a través de la preparación de los compuestos con diferentes cargas y aditivos[43] .

IV-D2. Siliconas:

PDMS: El polidimetilsiloxano o dimeticona es un polímero mineral – orgánico que es utilizado para la fabricación de prototipos de chips microfluídicos, a parte se utiliza como aditivo alimentario (E900), champús y como agente antiespumante en bebidas o en aceites lubricantes. El material es transparente con una buena estabilidad térmica, hidrofobicidad, permeabilidad y un excelente dieléctrico.

IV-D3. Serie Ecoflex: Cauchos de silicona supersuaves de curado adicional:

Ecoflex 00-33 AF

Las probetas normalizadas son una de las formas más habituales de ensayo de un material, debido a que siguen parámetros geométricos controlados y por ende el cálculo de las características del material es más sencillo y fácil. En primer lugar, se debe determinar el tipo de material en este caso un elastómero.

El primer paso es recopilar toda la información acerca de la muestra de prueba y los requisitos de esta, donde se determinen parámetros como las propiedades del material, las dimensiones y formas que debe tener la probeta de prueba, así como la velocidad y fuerza de la máquina de ensayo durante la prueba. Para ello primero nombramos el material seleccionado en este caso, Ecoflex 00-33 AF, es un caucho de silicona antifúngico o de siliconas catalizadas con platino, adecuado para hacer una variedad de configuraciones.

Entre las características de los cauchos Ecoflex tenemos se mezclan 1A: 1B por peso o volumen y se curan a temperatura ambiente. Además de eso su baja viscosidad garantiza una fácil mezcla y desaireación. Este caucho es capaz de estirarse muchas veces sin rasgarse y recuperar su forma original sin distorsión.

A continuación, se muestra una tabla acerca de las propiedades del material, así como la normas que pueden utilizarse para realizarse las pruebas.

Ecoflex 00-30

La silicona 00-30 es un tipo de elastómero de silicona que pertenece a la serie de siliconas de baja dureza conocidas como siliconas "shore 00". La designación "00-30" hace referencia a su nivel de dureza en la escala Shore A y a menudo se encuentra en forma líquida o de dos componentes para su uso en diversas aplicaciones industriales y artísticas.

- **Dureza Shore 00-30:** La dureza Shore A es una escala que mide la resistencia a la penetración de un material elástico, como la silicona. Una puntuación de 00-30 en la escala Shore A indica que la silicona es muy blanda y flexible, lo que la hace adecuada para aplicaciones donde la flexibilidad y la elasticidad son importantes.
- **Usos y Aplicaciones:** La silicona 00-30 se utiliza en una variedad de aplicaciones debido a su baja dureza y flexibilidad. Algunos ejemplos incluyen:
 - **Moldeado y Fundición:** Se usa en la fabricación de moldes flexibles para la creación de reproducciones de objetos o esculturas. Debido a su flexibilidad, es especialmente útil para la reproducción de detalles delicados.
 - **Efectos Especiales:** En la industria del cine y la televisión, se utiliza para crear prótesis, máscaras y otros efectos especiales debido a su capacidad para imitar la textura de la piel humana y su comodidad en aplicaciones de contacto con la piel.
 - **Prototipado y Modelado:** La silicona 00-30 también es utilizada en la creación de prototipos y maquetas en áreas como diseño industrial y arquitectura.
 - **Aplicaciones Médicas:** En algunos casos, se utiliza en aplicaciones médicas como prótesis y moldes para dispositivos médicos.
- **Mezcla y Curado:** La silicona 00-30 generalmente se presenta en forma de dos componentes que deben mezclarse en proporciones adecuadas antes del uso. El proceso de mezcla y curado puede variar según el fabricante, pero en general, después de mezclar los dos componentes, la silicona se vierte en el molde o sobre la superficie deseada. El tiempo de curado puede ser de varias horas a un día, dependiendo de las condiciones ambientales y las propiedades específicas del producto.
- **Color y Translucidez:** La silicona 00-30 generalmente es translúcida o tiene un color claro. Esto es beneficioso cuando se desea observar detalles y evitar burbujas en el proceso de vertido.

Descripción del producto

Los cauchos Ecoflex representan siliconas catalizadas con platino, reconocidas por su versatilidad y facilidad de aplicación. Estas siliconas se mezclan en una proporción 1A:1B, ya sea por peso o volumen, y se curan a temperatura ambiente, presentando una contracción despreciable. Su baja viscosidad garantiza un proceso sencillo de mezcla y desaireación, pudiendo también optar por la conveniente opción de cartuchos dosificadores. Una vez curado, el caucho se distingue por su notable flexibilidad, fuerza y elasticidad, capaz de extenderse considerablemente sin desgarrarse y recobrar su forma original sin deformaciones.

Estas gomas Ecoflex, translúcidas y de tono blanco acuoso, pueden ser teñidas con pigmentos licpig para lograr variados efectos cromáticos. Si se desea, es posible reducir aún más su viscosidad al incorporar silicona thinner de Smooth-On. Su versatilidad abarca aplicaciones como prótesis, amortiguación ortopédica y efectos especiales, especialmente en la creación de animatrónicos que demandan movimiento repetitivo.

Hay que destacar que Ecoflex 5 posee un tiempo de vida útil de 1 minuto y un tiempo de desmoldeo de 5 minutos, siendo dispensado únicamente en cartuchos. Ecoflex 00-33 AF, una variante antifúngica, es idónea para la confección de dispositivos de amortiguación seguros para la piel, con resistencia a hongos, en el ámbito ortopédico.

Resumen técnico

Tabla II
PROPIEDADES DE LAS SILICONAS [44]

	Viscosidad de la mezcla (ASTM D-2393)	Gravedad específica (g/cc) (ASTM D-1475)	Volumen específico (cu.in/lb) (ASTM-1475)	Vida útil (ASTM D-2471)	Tiempo de curado	Dureza Shore (ASTM D-2240)	Resistencia a la tracción	Módulo 100% (ASTM D-412)	Alargamiento en el descanso % (ASTM D-412)	Resistencia al desgarro del troquel B (ASTM D-624)	Contracción (in./in) (ASTM D-2566)
Ecoflex 5	13,000 cps	1.07	25.8	1 min	5 min	5A	350 psi	15 psi	1000 %	75 pli	<.001 in./in
Ecoflex 00-50	8,000 cps	1.07	25.9	18 min	3 horas	00-50	315 psi	12 psi	980 %	50 pli	<.001 in./in
Ecoflex 00-30	3,000 cps	1.07	26.0	45 min	4 horas	00-30	200 psi	10 psi	900 %	38 pli	<.001 in./in
Ecoflex 00-33AF	3,000 cps	1.07	26.0	45 min	4 horas	00-33	200 psi	10 psi	900 %	38 pli	<.001 in./in
Ecoflex 00-20	3,000 cps	1.07	26.0	30 min	4 horas	00-20	160 psi	8 psi	845 %	30 pli	<.001 in./in
Ecoflex 00-20 FAST	3,000 cps	1.07	26.0	20 min	1 hora	00-20	160 psi	8 psi	845 %	30 pli	<.001 in./in
Ecoflex 00-10	14,000 cps	1.04	26.6	30 min	4 horas	00-10	120 psi	8 psi	800 %	22 pli	<.001 in./in

*Todos los valores medidos después de 7 días a 73 °F/23 °C

IV-D4. Kevlar:

Es un tipo de fibra de polímero sintético que es mejor conocido por su uso en chalecos antibalas y resistentes a las puñaladas. Fue desarrollado por primera vez por la empresa DuPont en 1965 y desde entonces se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en aplicaciones en donde se requiere una alta resistencia y durabilidad.

El kevlar está constituido por fibras de polímero largas y fuertes que se tejen en una tela. Estas fibras son altamente resistentes al desgarro, corte y abrasión, lo que convierte a este material en uno de los más ideales en aplicaciones donde se requieren niveles de protección mecánica.

Las aplicaciones más frecuentes en donde se pueden encontrar el uso de kevlar son:

- Guantes y ropa resistentes a los cortes.
- Chalecos protectores para policías y militares.
- Aplicaciones industriales dedicadas a la construcción, como cuerdas, cables y cintas transportadoras.
- Aplicaciones automotrices como neumáticos.
- Equipo deportivo como remos de canoa.

Una de las principales ventajas del kevlar es su peso ligero y alta resistencia. Esta combinación es una buena elección para la implementación de dichas características en donde el peso es un factor crítico, como en chalecos antibalas y ropa de protección. Además de ser un material muy versátil que brinda altos niveles de protección. Su continuo desarrollo puede lograr que en un futuro sus aplicaciones sean aún más innovadoras y útiles.

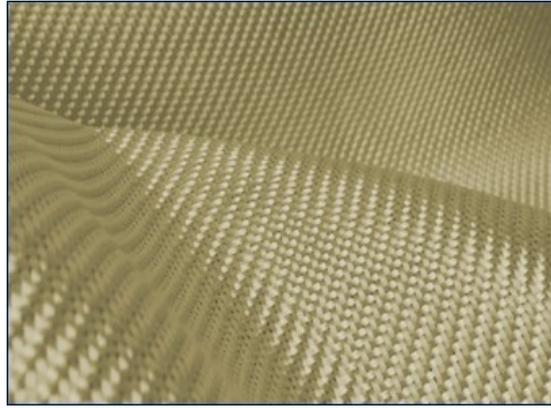


Figura 16. Kevlar[45].

IV-D5. *Fibras de Kevlar-Variacion de movimientos:*

Al manipular las disposiciones de los elementos restringidos de tensión del actuador, tal es el caso de la capa inextensible y la envoltura de la fibra, es factible lograr una diversidad de movimientos al inflar dicho actuador. Se pueden diferenciar tres variantes de movimiento que pueden ser obtenidas por el diverso recubrimiento que se realiza con el hilo de kevlar:

- Flexión.
- Torsión.
- Extensión.

También se pueden realizar combinaciones de estos patrones de movimiento. Por ejemplo es viable concebir un actuador capaz de doblarse y girar simultáneamente al ser inflado. Otra posibilidad es que se ofrece la alternativa de modificar la configuración de restricción de tensión en diferentes puntos de un solo actuador, lo que permite la realización de comportamientos variados en distintas zonas.

Curvatura

En este caso la disposición de un refuerzo de fibra en una configuración simétrica de doble hélice, se inhibe la expansión radial del actuador, limitándolo únicamente a la expansión axial. La incorporación de una capa de material inextensible destinada a restringir la tensión impide esta expansión en uno de los lados del actuador, logrando así un movimiento general de flexión.

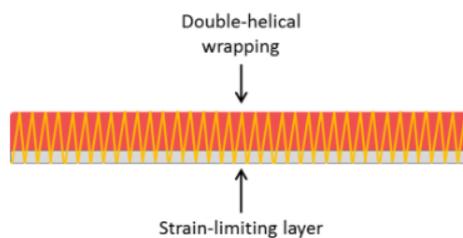


Figura 17. Doble helicoidal:Posee una capa limitante y un doble helicoidal [46].

Extensión

Una vez más, una envoltura de fibra de doble hélice simétrica restringe la expansión radial. No obstante, en esa disposición se añadió una capa inextensible, lo que produce una expansión en la dirección axial al inflar el actuador.

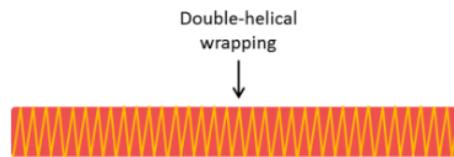


Figura 18. Doble helicoidal: Posee un doble helicoidal pero no contiene capa limitante [46].

Torsión

En este caso se utiliza una envoltura helicoidal sencilla en lugar de una de doble hélice como en los casos anteriores posibilita un movimiento de torsión. Al expandirse el núcleo del elastómero, la hélice enroscada aumenta su diámetro. No obstante como el hilo es inelástico y posee una longitud fija, el aumento en el diámetro debe compensarse con una reducción en el número de vueltas. Esto tiene como resultado un movimiento de torsión en dirección opuesta a la del recubrimiento del hilo.

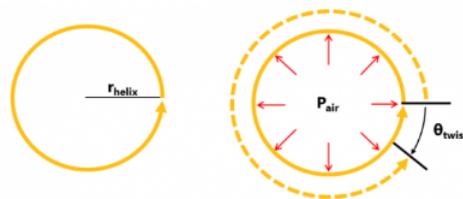


Figura 19. Núcleo del elastómero: Movimiento de torsión en dirección opuesta a la del hilo de kevlar. [46].

Combinación de torsión y curvatura

La envoltura de fibra de una sola hélice, junto con una capa que restringe la tensión, logra un movimiento combinado de torsión y flexión.

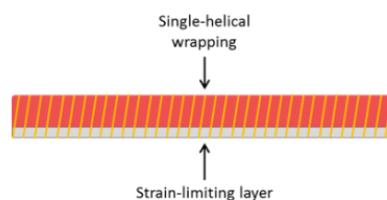


Figura 20. Helicoidal simple: Posee una capa limitante y helicoidal simple [46].

Combinación de torsión y extensión

La envoltura de fibra de una sola hélice, sin una capa que restrinja la tensión, logra un movimiento combinado de flexión y expansión axial.

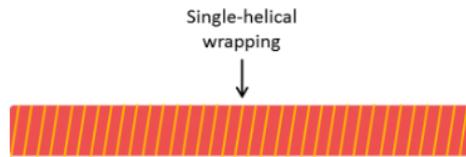


Figura 21. Helicoidal simple: Posee un helicoidal simple pero sin capa limitante[46].

Integración de múltiples comportamientos

Es factible dividir el actuador en segmentos, cada uno de los cuales exhibe un tipo de movimiento distinto. Esto permite la concepción de comportamientos más complejos y personalizados del actuador. En el ejemplo presentado, al inflar el actuador, el segmento izquierdo se curvará, el segmento central se extenderá axialmente y el segmento derecho va a realizar un movimiento de torsión y se curvará. La habilidad para "preprogramar" comportamientos complejos como este constituye una de las ventajas primordiales de la robótica blanda en comparación con la robótica rígida convencional.

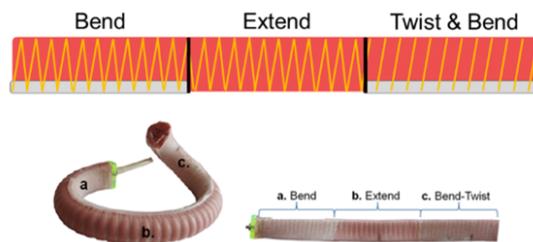


Figura 22. Múltiples helicoidales: Posee varios tipo de helicoidal con o sin capa limitante[46]

IV-E. Kirigami

Se ha desarrollado un dispositivo basado en modelos bioinspirados en materiales altamente deformables que tiene diversas aplicaciones. Sin embargo, su locomoción requiere de varios actuadores que se activan de forma independiente. Para mejorar la locomoción de estos actuadores suaves o robots flexibles, se utilizan conceptos de Kirigami, mediante transformación tridimensional y propiedades de fricción direccional. Se crean superficies Kirigami elásticas, que consisten en estructuras tridimensionales creadas a partir de láminas planas con cortes estratégicos. Estas estructuras se aplican sobre los actuadores suaves y, al cambiar de una forma plana a una tridimensional, imitan la piel escamada de las serpientes, lo que les permite moverse de manera eficiente.

La introducción de esta técnica marca un emocionante punto de encuentro entre el arte japonés del plegado de papel y la ingeniería moderna [47]. El Kirigami, inspirado en el origami, va más allá al incorporar cortes estratégicos en las láminas, lo que resulta en estructuras tridimensionales sorprendentemente flexibles y adaptables. Esta técnica ha revolucionado la forma en que concebimos y diseñamos objetos y sistemas, debido a sus aplicaciones en campos tan diversos como la arquitectura, la nanotecnología y, especialmente, la robótica [47].



Figura 23. Algunas características sobresalientes que pueden ser conferidas a una variedad de materiales mediante la aplicación de cortes de diseño inspirados en el kirigami [47].

En la búsqueda constante para mejorar la locomoción y la manipulación en entornos desafiantes, el Kirigami ha despertado el interés de los investigadores y diseñadores. Al aplicar los principios de esta técnica en el diseño de superficies y estructuras que interactúan con actuadores suaves, se ha logrado imitar las características de los movimientos de seres vivos, como insectos o serpientes. Esta convergencia entre la técnica tradicional y la tecnología moderna ha permitido la creación de sistemas que pueden cambiar su forma y función de manera eficiente y sorprendente.

En este estudio, se hace un enfoque en cómo el Kirigami ha sido utilizado para transformar láminas planas en superficies altamente elásticas con texturas tridimensionales, esta transformación no solo imita la adaptabilidad de la piel escamada de ciertos animales, sino que también influye en las propiedades de fricción de estas superficies y en la eficacia de su movimiento [48]. Al comprender y aplicar los conceptos, se allana el camino para una nueva generación de tecnologías de locomoción y manipulación, impulsadas por la sinergia entre la creatividad artística y la ingeniería de vanguardia.

Estas estructuras cuando se aplican en un actuador suave o un robot flexible pueden tener efectos interesantes en la locomoción. La transformación de las láminas planas en una estructura con textura 3D imita la piel escamada de serpientes, permite que el dispositivo pueda moverse eficientemente a través de diferentes terrenos. Dicha transformación también afecta las propiedades de fricción de las superficies, lo que puede resultar beneficioso para la tracción y el movimiento. Al envolver estas superficies Kirigami alrededor de un actuador suave que se estira, las inestabilidades mecánicas generadas por el pandeo de las estructuras Kirigami producen propiedades de fricción direccionales, lo cual permite que el robot suave pueda arrastrarse eficazmente en una dirección particular.

IV-E1. Introducción: Kirigami:

Estos organismos que carecen de extremidades han desarrollado métodos eficientes de movimiento y exploración aprovechando la flexibilidad de su cuerpo y las propiedades de fricción de su piel. Un ejemplo notable es el de las serpientes, que utilizan tanto la reconfiguración de su forma corporal como la fricción anisotrópica de su piel para propulsarse. Las características de las escamas ventrales, a nivel microscópico y macroscópico, contribuyen a esta fricción anisotrópica, donde la orientación preferencial facilita el movimiento hacia adelante más que hacia atrás.

Esta flexibilidad observada en animales de cuerpo blando ha inspirado el desarrollo reciente de una nueva clase de robots flexibles que, a pesar de ser fáciles y económicos de fabricar, son capaces de realizar movimientos complejos. Sin embargo, replicar las propiedades friccionales naturales en sistemas artificiales ha sido un desafío. La mayoría de los robots flexibles utilizan membranas sin estructura en su superficie, lo que resulta en la falta de propiedades de fricción direccionales. Por lo tanto, a menudo se requiere la activación independiente de múltiples actuadores para lograr la locomoción.

Inspirados por el movimiento asistido por fricción de las serpientes y los avances en ingeniería con propiedades tribológicas programables, se ha desarrollado una piel flexible e inteligente con propiedades de fricción anisotrópicas. Esta piel permite que un solo actuador genere movimiento suave. Para lograrlo, se utiliza el arte ancestral japonés del Kirigami, que implica realizar cortes estratégicos en una lámina de plástico plana. Luego, enrollamos esta piel alrededor del actuador suave. Al inflamarse, el actuador genera inestabilidades mecánicas en la piel de Kirigami, lo que le produjo una morfología tridimensional similar a la de una serpiente. Estas características tridimensionales altamente direccionales alteran significativamente las propiedades de fricción de la piel de Kirigami, lo que permite el dispositivo elaborado avance.

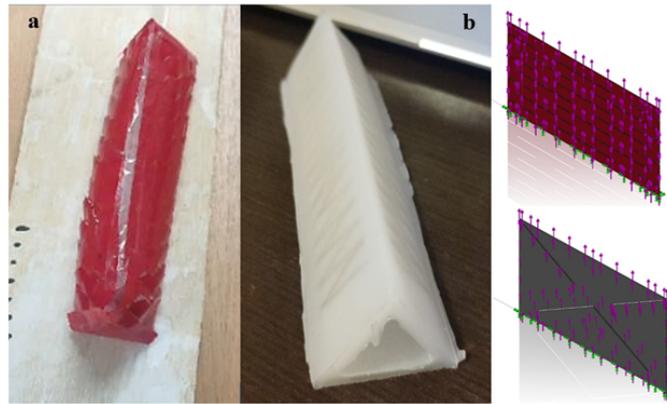


Figura 24. (a) Se consideró un actuador suave elastomérico reforzado con fibra que se extiende axialmente al inflarse. (b) Se fabricó una piel de kirigami incrustando una serie de cortes en una fina lámina de plástico [49].

IV-E2. Propiedades Anisotrópicas:

Reconfiguración Axial

La reconfiguración axial en serpientes es un proceso fascinante que ha sido investigado en diversas publicaciones científicas. Se refiere a la capacidad de las serpientes para ajustar la posición y orientación de sus vértebras, lo que les permite adoptar diferentes posturas y movimientos. Este fenómeno ha sido objeto de estudio para comprender mejor cómo las serpientes logran su flexibilidad y agilidad en el desplazamiento.

La locomoción de las serpientes se caracteriza por la capacidad de su columna vertebral para adaptarse al movimiento. Durante el desplazamiento, las serpientes pueden cambiar la forma de su columna vertebral en diferentes segmentos, lo que les permite moverse de manera eficiente. Cada vértebra en el cuerpo de la serpiente está unida por tejido conectivo y puede moverse de forma independiente hasta cierto punto. Esto les permite adoptar diversas curvas y ondulaciones a lo largo de su cuerpo mientras se desplazan.



Figura 25. Escamas de serpiente durante su arrastre [50].

Cuando una serpiente comienza a moverse, crea una curva inicial en su cuerpo que se propaga hacia adelante. Esta curva se genera mediante la activación de músculos específicos en segmentos particulares de su columna

vertebral. A medida que esta onda de curvatura se desplaza hacia la cola, impulsa el cuerpo hacia adelante. Cuando la cabeza de la serpiente llega a una posición cercana al final de la onda, se forma una nueva curva en esa región y el proceso se repite.

Este tipo de movimiento se asemeja a una serie de curvas en forma de “S” conectadas que se desplazan a lo largo del cuerpo de la serpiente. Cada segmento de la columna vertebral se adapta y se curva en respuesta a la acción de los músculos, mostrando una propulsión fluida y continua. La reconfiguración axial, junto con las propiedades de fricción de su piel, permite que las serpientes se desplacen en una variedad de superficies y terrenos, lo que les brinda una notable adaptabilidad y eficiencia en la locomoción.

IV-E3. Anisotropía por fricción:

La anisotropía de fricción en la piel de las serpientes se refiere a las diferencias en las propiedades de fricción en diferentes direcciones en su superficie [51]. Esta característica es crucial para la forma en que las serpientes se desplazan y se mueven eficientemente en su entorno. La piel de las serpientes está cubierta de escamas, que son estructuras duras y en forma de placa que recuperan su cuerpo. Estas escamas tienen una disposición particular que contribuye a la anisotropía de fricción. Por lo general, las escamas están orientadas hacia la cola de la serpiente, lo que crea una textura en la piel que permite un deslizamiento más fácil en la dirección hacia adelante y dificulta el movimiento hacia atrás.

La anisotropía de fricción en la piel de las serpientes es fundamental para su estilo de locomoción. Durante el movimiento, cuando una serpiente genera ondas de curvatura en su cuerpo, las escamas permiten que la fricción sea mayor en la dirección hacia adelante. Esto proporciona tracción para moverse cuando la serpiente se curva y se desplaza hacia adelante. Sin embargo, cuando intentan moverse hacia atrás, las escamas dificultan el deslizamiento, lo que ayuda a mantener la dirección del movimiento hacia adelante [47].

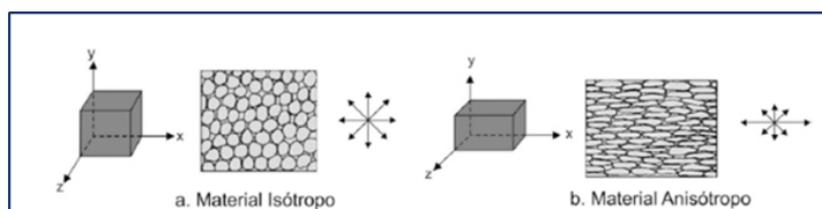


Figura 26. Representación gráfica de los materiales (a)Isótropo (b) Anisótropo [52].

Esta adaptación evolutiva ha permitido a las serpientes moverse eficientemente en diferentes tipos de superficies, desde terrenos rocosos hasta suelos suaves. La comprensión de la anisotropía de fricción en la piel de las serpientes ha llevado a investigaciones en biomimética, donde se busca imitar esta propiedad en el diseño de robots y sistemas de movimiento para lograr una locomoción más eficiente y adaptable en entornos desafiantes.

IV-E4. Aplicaciones del Kirigami:

Una forma mecánica de kirigami como ruta hacia meso estructuras 3D en micro / nano membranas

El ensamblaje de micro/nanoestructuras 3D en materiales avanzados tiene implicaciones importantes en diversas áreas tecnológicas. Sin embargo, los métodos actuales solo son compatibles con un conjunto limitado de materiales y geometrías 3D. Este documento presenta una propuesta basada en Kirigami, que permite el ensamblaje mecánico y preciso de estructuras 3D a partir de membranas micro/nanométricas 2D con patrones de corte estratégicamente diseñados.

Los métodos propuestos se respaldan con análisis teóricos y experimentos prácticos, y se pueden aplicar en escalas que van desde lo macroscópico hasta lo nanométrico. Se pueden utilizar una amplia gama de materiales, desde silicio monocristalino hasta plásticos, y las estructuras resultantes son más complejas que las obtenidas con otros enfoques de montaje. Se presentan varios ejemplos, como mesoestructuras 3D de silicio y sistemas híbridos

de nanomembranas y nanocintas que combinan polímeros y metales. Las dimensiones críticas varían desde 100 nm hasta 30 mm.

Otros enfoques[53] se basan en el pandeo por la compresión de cintas estrechas, es decir, en estructuras con una relación de aspecto lateral mayor a 5:1, o en filamentos para crear estructuras 3D complejas, pero principalmente útiles en diseños de tipo rojo abierta. Sin embargo, al aplicar estos enfoques a láminas o membranas con una relación de aspecto lateral menor a 5:1, surgen tensiones concentradas conocidas como "tensiones inducidas por torsión" que pueden causar fracturas mecánicas.

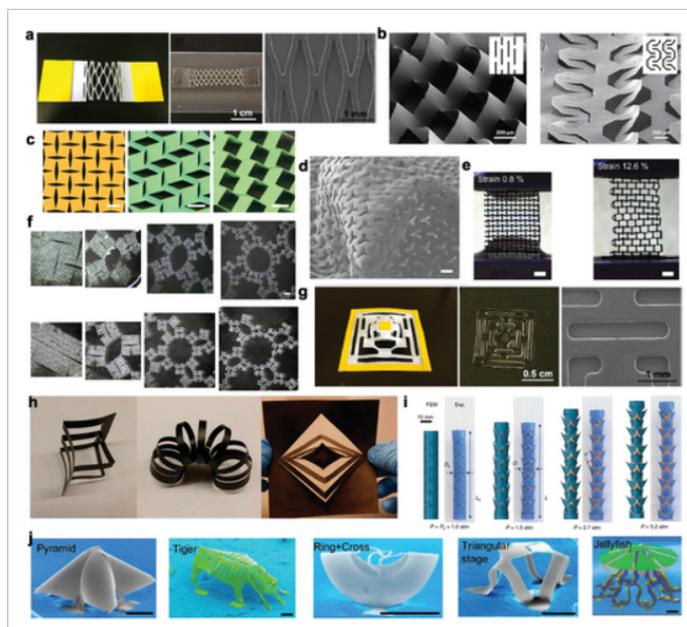


Figura 27. Fabricación de diferentes diseños de kirigami [54].

Los conceptos de Kirigami, que tienen sus raíces en la estética antigua, involucran patrones de cortes estratégicos para controlar el plegado y el pandeo. Estos cortes reducen las tensiones mencionadas anteriormente, permitiendo una amplia variedad de estructuras 3D interesantes, principalmente en papel y en dimensiones de centímetros y milímetros. Sin embargo, las técnicas tradicionales de Kirigami no son fácilmente aplicables a escalas micro/nano, y tampoco son eficientes con materiales avanzados, especialmente semiconductores frágiles.

Este trabajo presenta una variante del Kirigami que aborda estos desafíos. Mediante la aplicación de fuerzas de compresión controladas con precisión, se transforman membranas micro/nano 2D con geometrías definidas mediante litografía y patrones de corte en estructuras 3D. Esta transformación se logra en escalas que van desde macro hasta micro y nano, con un alto nivel de complejidad y control que supera a los métodos alternativos disponibles.

Este enfoque de Kirigami difiere de los enfoques convencionales a escala macroscópica, como los métodos de celosía de Kirigami [55], [56], que resuelven el problema inverso de plegar una placa plana en una configuración 3D compleja. A diferencia de estos métodos, el enfoque propuesto no produce deformaciones significativas en las regiones no cortadas de las estructuras plegadas. Además, se diferenciaron los métodos Kirigami a microescala informados recientemente que utilizan formas 2D para conductores estirables [57].

Láminas Kirigami activos programables con más libertad de actuación

El campo de los metamateriales mecánicos está experimentando un crecimiento significativo en la investigación científica e innovación en ingeniería debido a sus propiedades físicas únicas. Recientemente, el arte del papel, incluyendo el origami y el kirigami, ha inspirado la creación de una amplia variedad de metamateriales programables y reconfigurables mediante el plegado o el corte de láminas delgadas.

Mientras que el origami genera estructuras tridimensionales compactas al plegar las láminas, el kirigami, al abrir cortes en las láminas, resulta en estructuras altamente expansibles y estirables, tanto en 2D como en 3D. Esto se logra a través de la rotación rígida en el plano de las unidades cortadas o fuera del plano, y el pandeo plano de las bielas entre los cortes. La deformación en las láminas de kirigami, tanto en el plano como fuera de él, se puede ajustar manipulando la geometría de las bisagras entre los cortes, lo que tiene diversas aplicaciones, desde la electrónica hasta las máquinas estirables blandas.

Sin embargo, ambos mecanismos de apertura de corte en las láminas de kirigami presentan limitaciones. En el caso del kirigami 2D, existe una expansión máxima alcanzable a través de la rotación en el plano, más allá de la cual la estructura no puede ser reconfigurada. En el kirigami 3D, el pandeo uniforme en las unidades cortadas genera una estructura 3D periódica y homogénea, pero sin un control preciso de la deformación localizada en las unidades de corte ni de la reconfiguración global de la estructura a lo largo de la lámina.

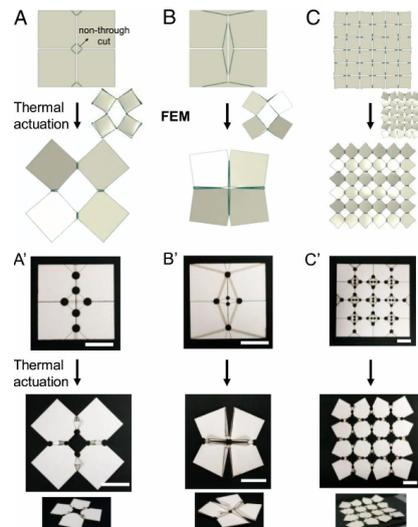


Figura 28. Estructuras kirigami 3D accionadas térmicamente programables [48].

En este trabajo, se presenta una propuesta innovadora que combina un diseño de plegado universal con cortes lineales en una hoja plana delgada. El enfoque, llamado “apertura de cortes inducida por plegado” [48], tiene como objetivo superar las limitaciones de las hojas de kirigami 2D y 3D. En los experimentos, se demuestra que, al aumentar el grado de plegado, la hoja de kirigami 2D reconfigurada con pliegues se expande más allá de lo que se lograría con un solo corte. Además, al cerrar los cortes, la hoja regresa a su estado compacto original.

Se demuestra que, al incluir pliegues adicionales, se liberan significativamente los grados de libertad restringidos en las bisagras. Esto permite tanto la rotación en el plano (un grado de libertad) como fuera del plano (múltiples grados de libertad)[48] de las unidades cortadas a través del plegado. Como resultado, se logró una manipulación activa de cambios de forma 2D y 3D, tanto a nivel local como global, en hojas de kirigami que responden a estímulos a través del plegado automático.

En contraste con el plegado de láminas de kirigami mediante la eliminación de cortes en estructuras 3D compactas mediante el cierre de cortes inducido por el plegado, nuestro enfoque demuestra que las láminas de kirigami con combinación de pliegues y hendiduras generan tanto estructuras compactas como expandidas en 2D y 3D. Esto se logra al aprovechar la apertura y el cierre de los cortes, los cuales son inducidos por el plegado. Este enfoque innovador abre nuevas posibilidades en el diseño y la ingeniería de metamateriales y estructuras reconfigurables, con un amplio espectro de aplicaciones potenciales en diversos campos.

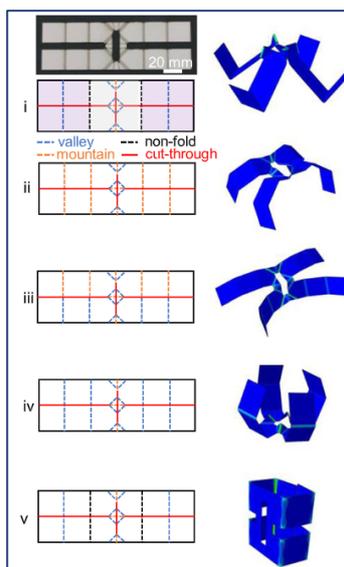


Figura 29. Resultados de simulación FEM sobre la actuación térmica de celdas de kirigami [48].

IV-F. Etapas del Circuito de Control

IV-F1. Comunicación entre el dispositivo de control y el actuador:

En el sistema integrado, la comunicación entre el dispositivo de control y el actuador se realiza utilizando un módulo de comunicación HC-05. Este módulo permite establecer una comunicación inalámbrica mediante el protocolo Bluetooth.

El dispositivo de control está compuesto por una unidad de microcontrolador, en este caso el modelo ATMEGA328, que corresponde a la placa Arduino Nano. El microcontrolador se encarga de procesar y ejecutar el programa que permite el control de los dispositivos.

La programación desarrollada en el microcontrolador establece la comunicación con el módulo HC-05 y define los comandos y protocolos necesarios para controlar los actuadores de manera óptima. De esta manera, se puede enviar información y recibir datos del actuador a través de la comunicación Bluetooth.

La utilización de un módulo de comunicación como el HC-05 y un microcontrolador como Arduino Nano proporciona una solución eficiente y flexible para el control de dispositivos mediante una comunicación inalámbrica.

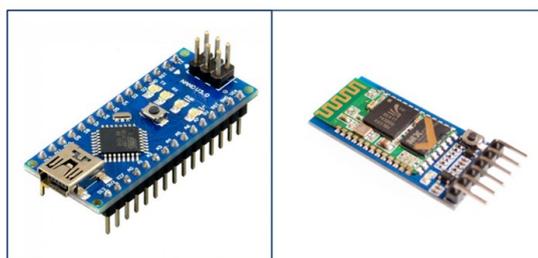


Figura 30. (a) Arduino modelo ATMEGA328. (b) Módulo HC-05.

IV-F2. Actuación:

El robot oruga es accionado mediante una bomba micro neumática de diafragma (AIMELIAE, Mini bomba de presión de aire bomba médica 30KPa 0.28L) y una válvulas solenoide neumática en miniatura de dos y tres vías. La potencia de la bomba puede ser controlada desde cero hasta su máximo por la unidad de microcontrolador con la ayuda de un controlador de motor (LM2596).

Actuación del sistema

La actuación del robot oruga se lleva a cabo mediante una bomba micro neumática de diafragma y válvulas solenoide neumáticas en miniatura de dos y tres vías.

La bomba micro neumática de diafragma utilizada es la AIMELIAE, específicamente el modelo Mini bomba de presión de aire bomba médica 30KPa 0.28L. Esta bomba proporciona la presión de aire necesaria para el funcionamiento del sistema.

Las válvulas solenoide neumáticas en miniatura de dos y tres vías se utilizan para controlar el flujo de aire en el sistema. Estas válvulas permiten dirigir el aire hacia los actuadores correspondientes para lograr el movimiento del robot oruga.

La potencia de la bomba puede ser controlada desde cero hasta su máximo por la unidad de microcontrolador. Esto se logra mediante el uso de un controlador de motor, en este caso el LM2596. El controlador de motor permite regular la potencia suministrada a la bomba, lo que a su vez controla la presión de aire generada y, por lo tanto, la actuación del sistema.



Figura 31. (a) Bomba Micro Neumática. (b) Controlador de Motor LM2596. (c) Válvulas solenoide 2 posiciones 3 vías.

IV-F3. Fuente de alimentación:

La fuente de alimentación utilizada en el sistema a bordo es una batería LIPO TATTU 3S 11,1V 650MAH 75C. Esta batería proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del sistema.

La bomba es alimentada a través de un controlador de motor (LM2596) que tiene una salida de 5V. El controlador de motor se encarga de regular la cantidad de potencia suministrada a la bomba, lo que a su vez controla la presión de aire generada y, por lo tanto, la actuación del sistema.

Además, el controlador de motor también alimenta al microcontrolador y a las válvulas solenoide neumáticas en miniatura. Esto permite un control coordinado del flujo de aire en el sistema.

El TIP122 es un transistor NPN Darlington de propósito general que se utiliza comúnmente para controlar cargas de alta corriente, como solenoides. Por otro lado, el MOSFET IRF540 es un dispositivo semiconductor utilizado para controlar y amplificar señales eléctricas en circuitos electrónicos. Ambos componentes son utilizados en el sistema descrito para alimentar y controlar la bomba y las válvulas.

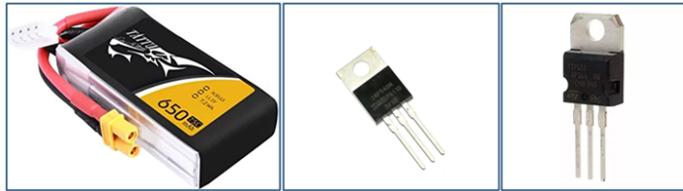


Figura 32. (a) LIPO TATTU 3S. (b) MOSFET IRF540. (c) TIP122.

IV-G. Programas utilizados para el desarrollo y simulación del actuador suave

IV-G1. AUTOCAD:

AutoCAD proporciona a los diseñadores de celdas kirigami una amplia gama de herramientas y funcionalidades para mejorar su proceso de diseño. Con esta herramienta los diseñadores pueden crear diseños precisos y detallados tanto en 2D como en 3D, lo que les permite visualizar el resultado final de sus celdas kirigami de manera más realista.

Una de las ventajas de utilizar AutoCAD en el diseño de celdas Kirigami es la eficiencia que brinda. Las herramientas y funcionalidades de AutoCAD agilizan el proceso de diseño al permitir a los diseñadores trabajar de manera más rápida y precisa. Esto les ayuda a ahorrar tiempo y esfuerzo en comparación con los métodos de diseño tradicionales.

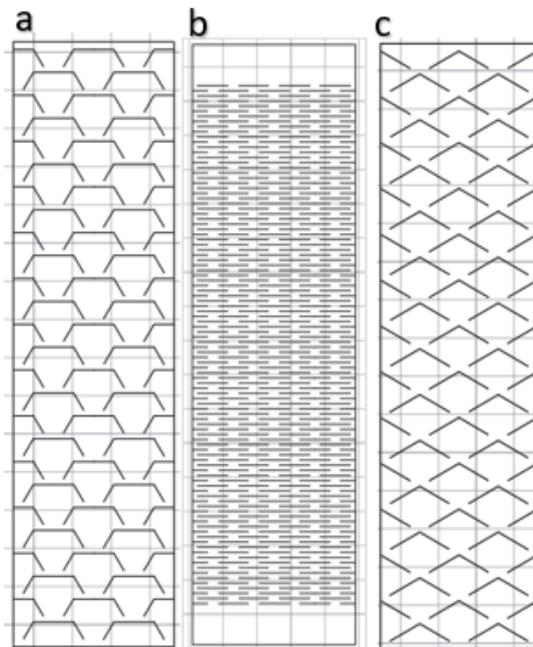


Figura 33. Celdas de Corte Kirigami: (a) Trapezoidal (b) Triangular (a) Lineal

V. MARCO METODOLÓGICO

V-A. Diseño de Moldes para Actuador Triangular

V-A1. Primera prueba de simulación:

Se diseñaron seis piezas que se pueden ensamblar perfectamente para crear un molde de vertido adecuado a las especificaciones necesarias. Estas piezas se basan en una estructura triangular que debe ubicarse en el centro del molde. Este espacio triangular posteriormente se utilizará como recipiente para moldear el material y como área de secado que contendrá la mezcla de Ecoflex 00-30 hasta que termine su tiempo de curado. Como resultado, se obtiene un actuador triangular de elastómeros con una cámara de aire que atraviesa completamente el actuador suave.

Piezas diseñadas para las simulaciones de ensamble y las primeras pruebas de impresión:

- Base
- Lateral Fino
- Lateral Grueso
- Tapa Superior
- Varilla

Diseño de primer molde de prueba

Objetivos

- Diseño de molde para cámara triangular de actuador.
- Determinar medidas del molde.

El primer diseño se enfoca en desarrollar la forma del molde que se desea obtener para la cámara triangular necesaria para el actuador suave. Se crean los primeros moldes con medidas similares a los actuadores suaves utilizados previamente para este tipo de prototipos [50].

Base

Se diseña una base cuadrada que tiene las dimensiones necesarias para que las piezas laterales puedan ser colocadas sobre la plataforma, adicionalmente cuenta con una extrusión triangular que sirve de soporte para colocar e ingresar la varilla cuando la mezcla se encuentre vertida.

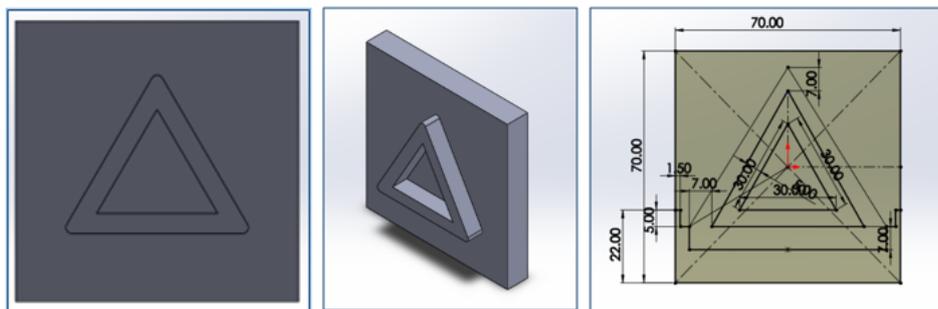


Figura 34. (a) Orientación de Vista Frontal pieza “Base”. (b) Vista Isométrica de pieza “Base”. (c) Cotas de pieza “Base” [58].

Tabla III
 TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: BASE #1

Extrusión de base cuadrada	10 mm
Extrusión del triángulo	7 mm
Redondeo	1.5 mm

Lateral Fino

Esta pieza se sujeta en la parte inferior de la extrusión triangular de la base, específicamente en el lado recto de la base del triángulo. Debido a la forma del actuador triangular, el grosor de esta pieza es mucho más delgado que el del lado grueso. Se han agregado bordes adicionales en las paredes más delgadas del molde para que ambos lados puedan encajar y adherirse más fácilmente.

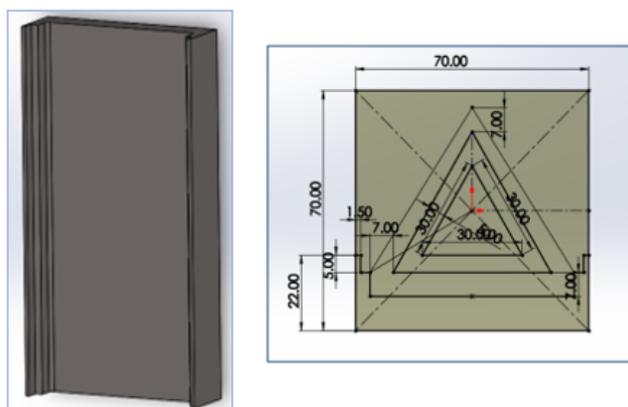


Figura 35. (a) Vista Isométrica de pieza “Lateral Fino”. (b) Cotas de pieza “Lateral Fino” [58].

Tabla IV
 TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA LATERAL: FINO #1

Extrusión lateral	140 mm
Redondeo	1.5 mm

Lateral grueso

La pieza mencionada se coloca en la parte superior de la extrusión triangular de la base, específicamente en los laterales inclinados que forman el triángulo. Debido a la forma que toma este lateral, su grosor es mucho más grueso. Al igual que en el lateral anterior, se le realizan bordes en las paredes para que ambas piezas puedan encajar fácilmente.

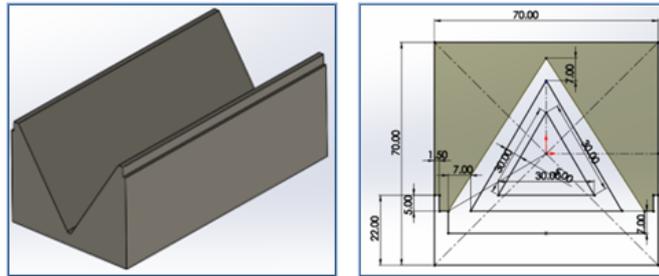


Figura 36. (a) Vista Isométrica de pieza “Lateral Grueso”. (b) Cotas de pieza “Lateral Grueso” [58].

Tabla V
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: LATERAL GRUESO #1

Extrusión lateral	140 mm
Redondeo	1.5 mm

Tapa Superior

Es una pieza cuadrada que tiene las mismas dimensiones que la base para que pueda mantener los laterales en la posición correspondiente. Además, en el centro de la pieza hay un vaciado completo en forma de triángulo que permite introducir la varilla en el molde. La varilla ingresa por la parte superior hasta la base, donde se encuentra una extrusión que encajará con la varilla y la mantendrá en su lugar durante el tiempo de secado de la mezcla.

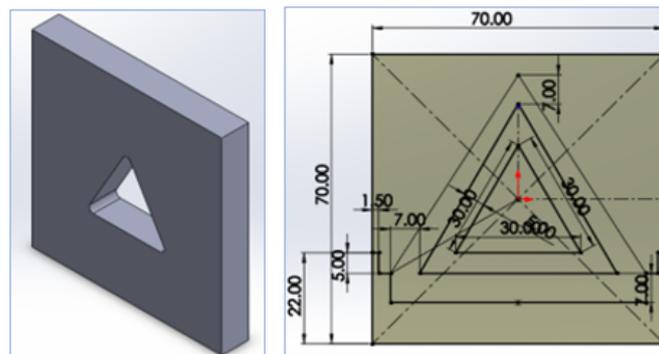


Figura 37. (a) Vista Isométrica de pieza “Tapa Superior”. (b) Cotas de pieza “Tapa Superior” [58].

Tabla VI
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA:TAPA SUPERIOR #1

Extrusión de tapa superior	10 mm
Vaciado triangular	10 mm
Redondeo	1.5 mm

Varilla

Eje que debe encajar en la extrusión de la base y es sobre el cual se adquiere la mezcla de elastómero que permite formar el actuador triangular.

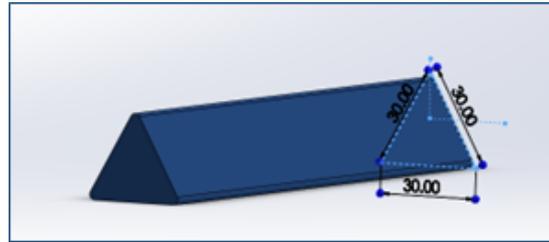


Figura 38. Vista Isométrica y cotas de pieza “Varilla” [58] .

Tabla VII

TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: VARILLA TRIANGULAR #1

Extrusión de varilla	160 mm
Redondeo	1.5 mm

Tapa de vertido

Una tapa que permite adaptar el sistema de vertido de la mezcla al molde de vertido mediante la tapa superior.

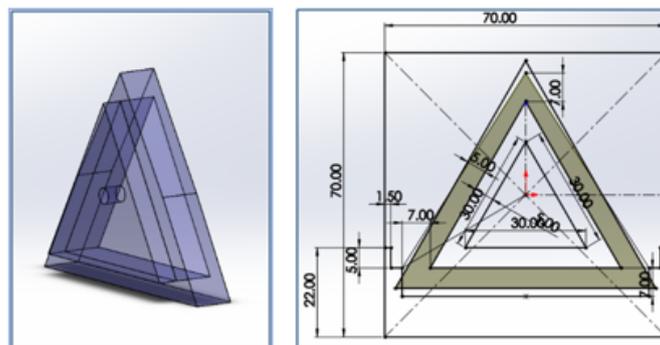


Figura 39. (a) Vista Isométrica de “Tapa de Vertido”. (b) Cotas de pieza “Tapa de Vertido” [58] .

Tabla VIII

TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: TAPA DE VERTIDO #1

Extrusión del triángulo mayor	10 mm
Extrusión del triángulo menor	5 mm
Vaciado circular(d: 4 mm)	5 mm

Diseño de primer molde de prueba-Ensamble

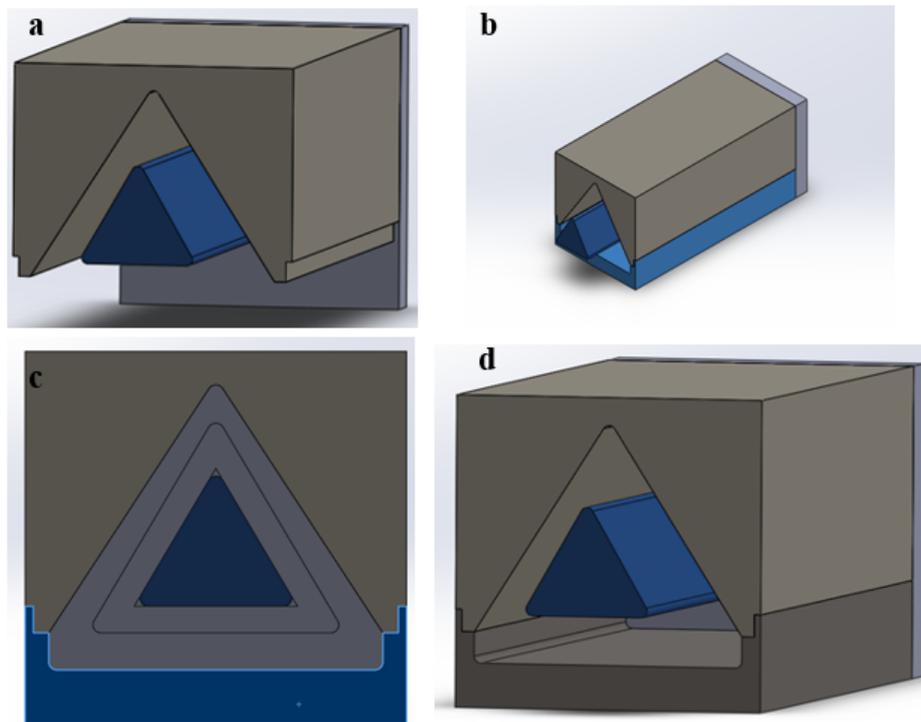


Figura 40. (a) Ensamble de pieza base, lateral fino y varilla triangular. (b) Ensamble de pieza lateral grueso. (c) Vista Frontal del ensamble. (d) Vista Isométrica del ensamble [58].

V-B. Rediseño de segundo molde de prueba

En esta etapa se rediseñó el molde de secado para la cámara triangular de actuador, se realizaron ajustes en las medidas del molde existente para evitar fugas del material.

En esta etapa solo se desarrolló en el programa SOLIDWORKS los moldes pero ninguna pieza fue impresa.

Base: Rediseño

A la base cuadrada se le adiciona bordes en la parte externa para que estos puedan mantener las piezas de los laterales en su posición de acuerdo con la presión que se ejerce entre las paredes.

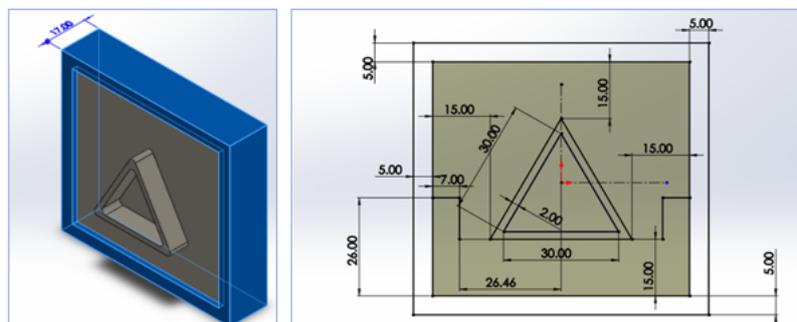


Figura 41. (a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Base” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza “Base” [58].

Tabla IX
 TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: BASE #2

Extrusión de base cuadrada	15 mm
Extrusión del triángulo	8 mm
Extrusión del borde exterior	17 mm
Redondeo	1.5 mm

Lateral Fino: Rediseño

Se reajusta el diseño para permitir un ensamblaje directo entre las piezas laterales y las paredes, evitando así una mayor pérdida de material. Al modificar los bordes laterales, se logra una conexión más eficiente y directa entre las piezas, lo que mejora la calidad y eficiencia del ensamblaje. Las medidas de esta pieza cambian de acuerdo con las dimensiones de la nueva base.

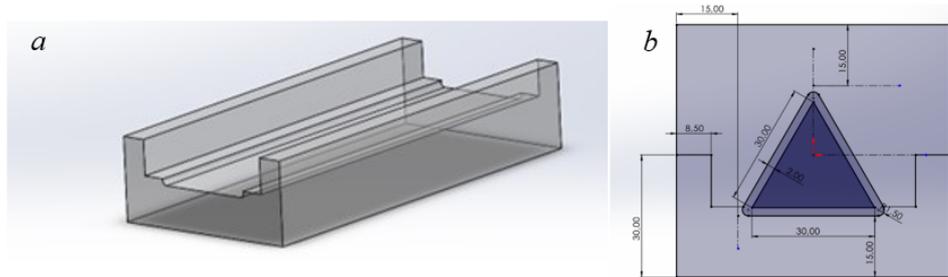


Figura 42. (a) Orientación de Vista Isométrica de pieza "Lateral Fino" con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza "Lateral Fino"[58].

Tabla X
 TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: LATERAL FINO #2

Extrusión de lateral	150 mm
Redondeo	1.5 mm

Lateral Grueso: Rediseño

Para reajustar el diseño y permitir un ensamblaje directo entre las piezas laterales y las paredes, se puede modificar el diseño de los bordes laterales. Las medidas de esta pieza cambian de acuerdo con las dimensiones de la nueva base.

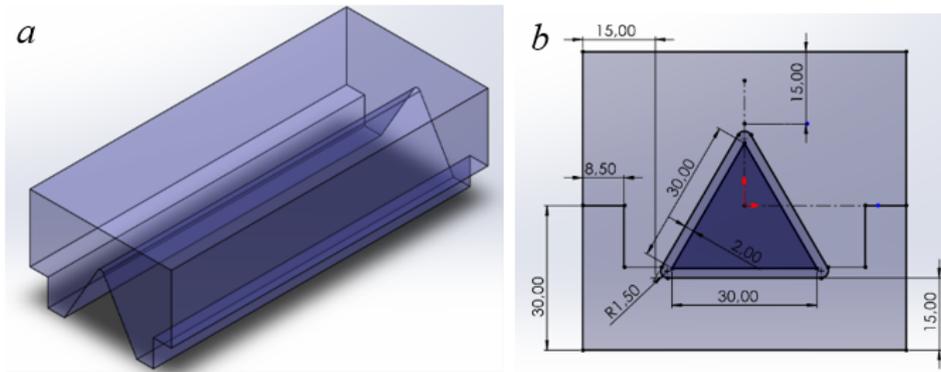


Figura 43. (a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Lateral Grueso” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza "Lateral Grueso"[58].

Tabla XI
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: LATERAL GRUESO #2

Extrusión de lateral	150 mm
Redondeo	1.5 mm

Tapa Superior: Rediseño

Se le adicionan bordes externos a la tapa superior con el fin de ajustar desde la parte superior los laterales y evitar que exista algún tipo de fuga al momento de verter el material en el molde.

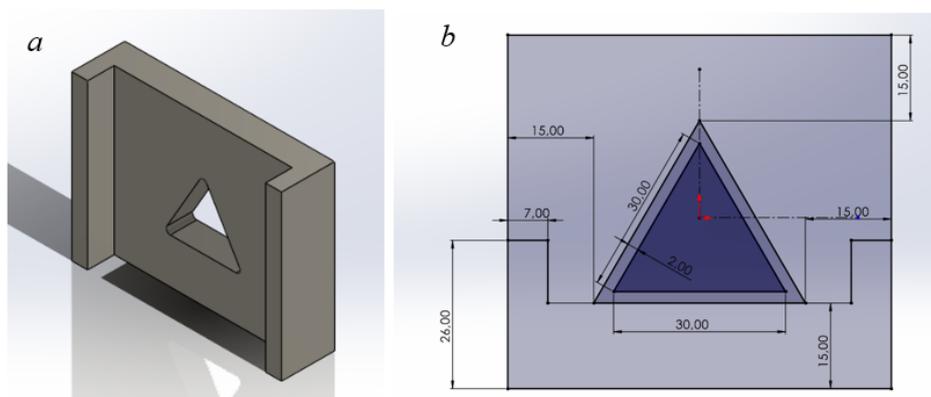


Figura 44. (a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Tapa Superior” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza "Tapa Superior"[58].

Tabla XII
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: TAPA SUPERIOR #2

Extrusión de base cuadrada	15 mm
Vaciado triangular	15 mm
Extrusión exteriores	25 mm
Redondeo	1.5 mm

Varilla: Rediseño

Se redimensiona el eje de acuerdo con las nuevas medidas de los moldes.

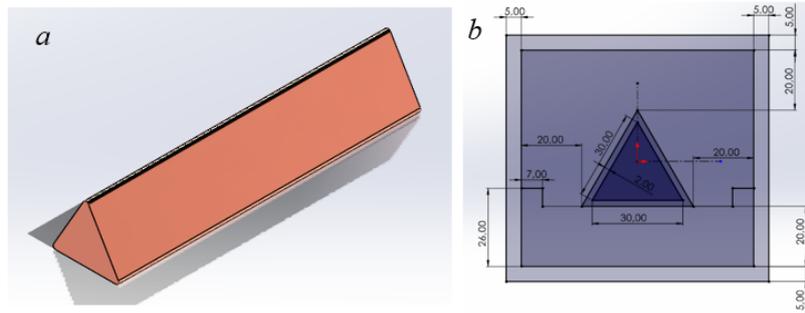


Figura 45. (a) Orientación de Vista Isométrica de pieza “Varilla” con la extrusión en sus bordes externos. (b) Cotas de pieza “Varilla” [58].

Tabla XIII
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: VARILLA #2

Extrusión de varilla	15 mm
Redondeo	1.5 mm

Tapa de vertido: Rediseño

Se redimensiona la tapa de vertido de acuerdo las medidas con la tapa superior.

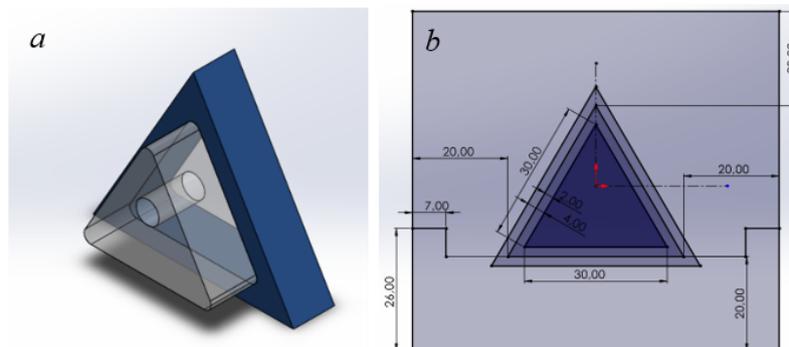


Figura 46. (a) Vista Isométrica de pieza “Tapa de Vertido”. (b) Cotas de pieza “Tapa de Vertido” [58] .

Tabla XIV
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: TAPA DE VERTIDO #2

Extrusión del triángulo mayor	9 mm
Extrusión del triángulo menor	10 mm
Vaciado circular (d: 4 mm)	5 mm

Diseño de segundo molde de prueba-Ensamble

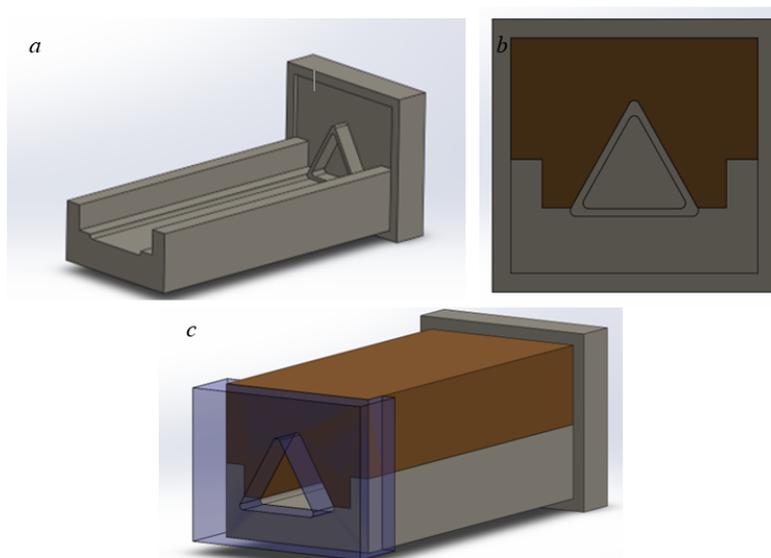


Figura 47. (a) Ensamble de pieza base y lateral fino. (b) Ensamble de pieza lateral grueso al molde. (c) Vista Isométrica del ensamblaje con tapa superior [58].

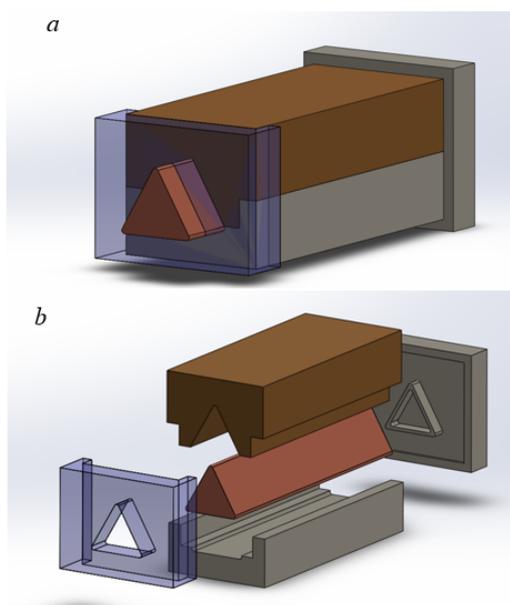


Figura 48. (a) Vista Isométrica del ensamblaje con varilla triangular. (b) Vista Isométrica del ensamblaje explosionado [58].

V-C. Tercer molde de prueba- Primera Impresión

Durante este proceso de reconfiguración, se implementaron ajustes en las dimensiones del molde existente para prevenir fugas de material no deseadas en la cámara triangular del actuador. Además, se tuvo en cuenta la extrusión de las fibras de Kevlar en el actuador para asegurar un funcionamiento adecuado.

Desarrollo del actuador

Se realiza una varilla triangular según las medidas del triángulo de extrusión que se encuentra en la base

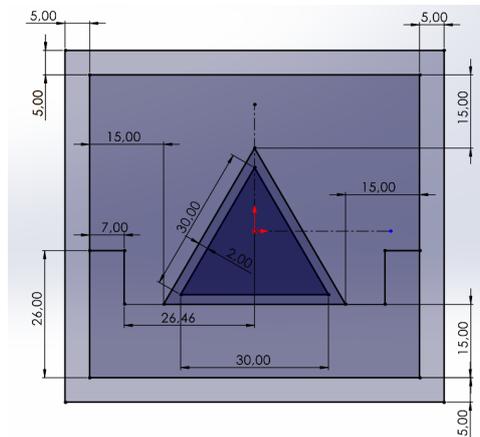


Figura 49. Vista Isométrica del actuador con sus respectivas cotas [58].

Se redondean los vértices del triángulo con un radio 1.5 mm.

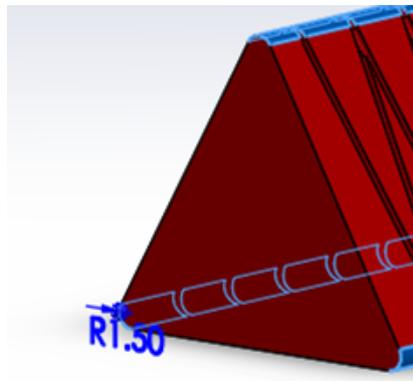


Figura 50. Vista Isométrica del actuador con redondeo [58].

Se colocan planos en la mitad de la varilla para replicar los triángulos y realizar las cortes en el actuador, los ángulos de los planos en relación con el plano alzado son de 7° a cada lado.

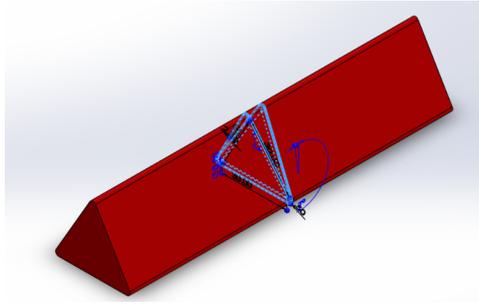


Figura 51. Vista de planos en medio del actuador [58].

Se procede a realizar la primera matriz, en relación con el segundo plano.

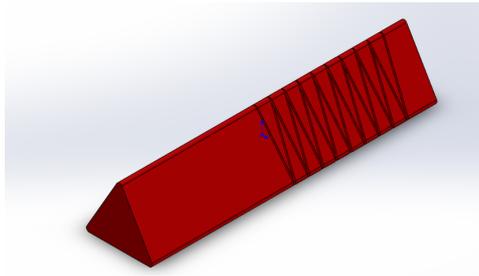


Figura 52. Vista de patrón triangulares por medio de matrices [58].

Tabla XV
TABLA DE ESPECIFICACIONES DE MATRIZ LINEAL- PATRÓN TRIANGULAR

Separación	7.40 mm
Número de instancias	9 mm

Se procede a realizar la segunda matriz, en relación con el primer plano.

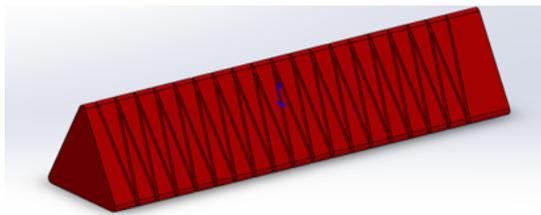


Figura 53. Vista de cortes triangulares por medio de matrices [58].

Tabla XVI
TABLA DE ESPECIFICACIONES DE MATRIZ TRIANGULAR EN EL ACTUADOR

Separación	7.40 mm
Número de instancias	10 mm

Se proceden a realizar los últimos cortes cerca de los extremos del actuador y estos deben ser rectos.

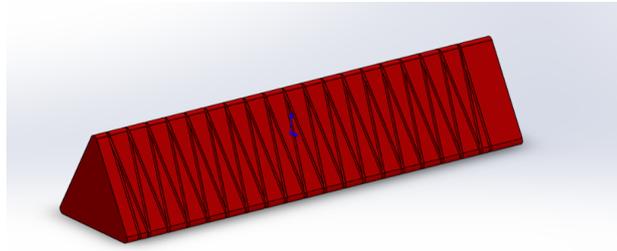


Figura 54. Actuador Triangular [58].

El diseño de este actuador permite realizar, en primer lugar, las extrusiones que deben replicarse en el lateral fino y grueso de acuerdo con el vacío triangular que se ha realizado en esta pieza por medio de matrices lineales. Estas matrices lineales permiten mantener los ángulos de separación y replicar la misma profundidad de corte. Las medidas de las piezas son exactamente iguales a las medidas definidas en el rediseño del segundo molde de prueba.

Lateral Fino:

Se realiza un ensamble con la base y el lateral fino que se va a utilizar para hacer la extrusión.

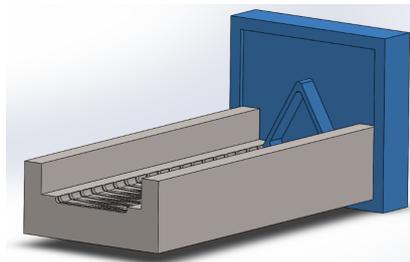


Figura 55. Ensamble de piezas como base y lateral fino [58].

Se adiciona la varilla del actuador para determinar si las distancias son correctas y si los extremos del actuador calzan con los extremos de los laterales de la pieza.

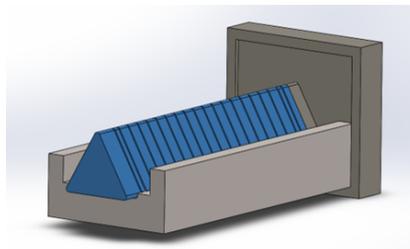


Figura 56. Vista del ensamble con el actuador triangular [58].

Se selecciona la siguiente opción para realizar las extrusiones en el lateral fino.

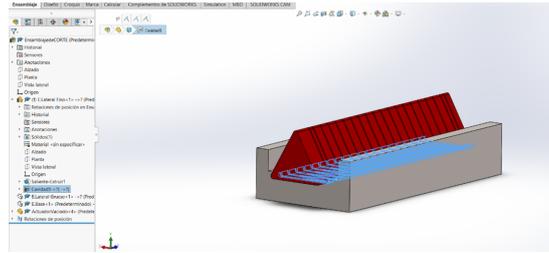


Figura 57. Vista del plano de extrusión [58].

En la sección de parámetros de entrada, podemos determinar el tamaño de la extrusión. En este caso, la primera extrusión es de 0.8 %.

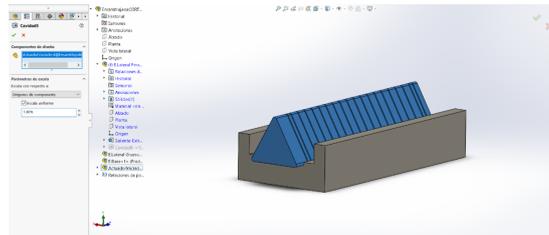


Figura 58. Escala de la extrusión [58].

Finalmente se logra replicar la extrusión en la pieza.

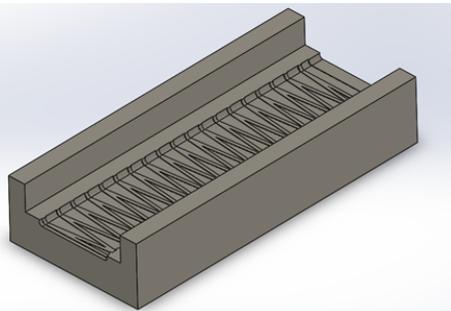


Figura 59. Vista de las extrusiones en el molde lateral fino [58] .

Las medidas de las piezas son exactamente iguales a las medidas definidas en el rediseño del segundo molde de prueba.

Lateral Grueso:

En relación con el lateral grueso se repite el proceso anterior con las mismas especificaciones. La pieza en cuestión no se imprimió hasta la segunda ronda de impresión en 3D, ya que se realizaron pruebas para verificar si la extrusión realizada era suficiente para generar el patrón helicoidal en el actuador.

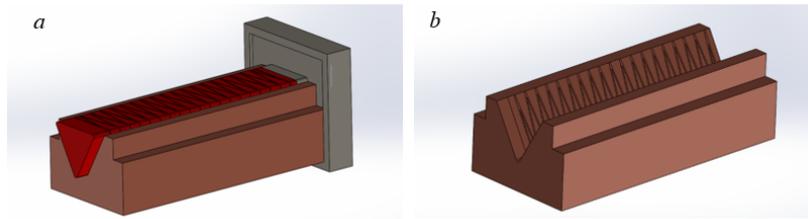


Figura 60. (a) Ensamble de piezas como base, lateral grueso y actuador triangular. (b) Se pueden observar las extrusiones de acuerdo con el patrón del actuador [58].

Varilla triangular

Se presenta un cambio en las dimensiones de la varilla que actúa como eje central del actuador.

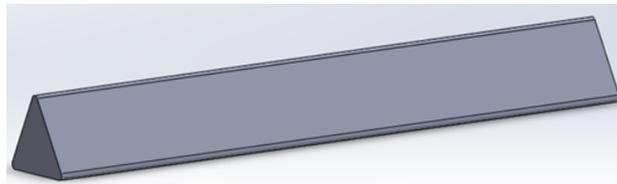


Figura 61. Varilla Triangular [58].

Ensamble de piezas del molde del primer molde de impresión

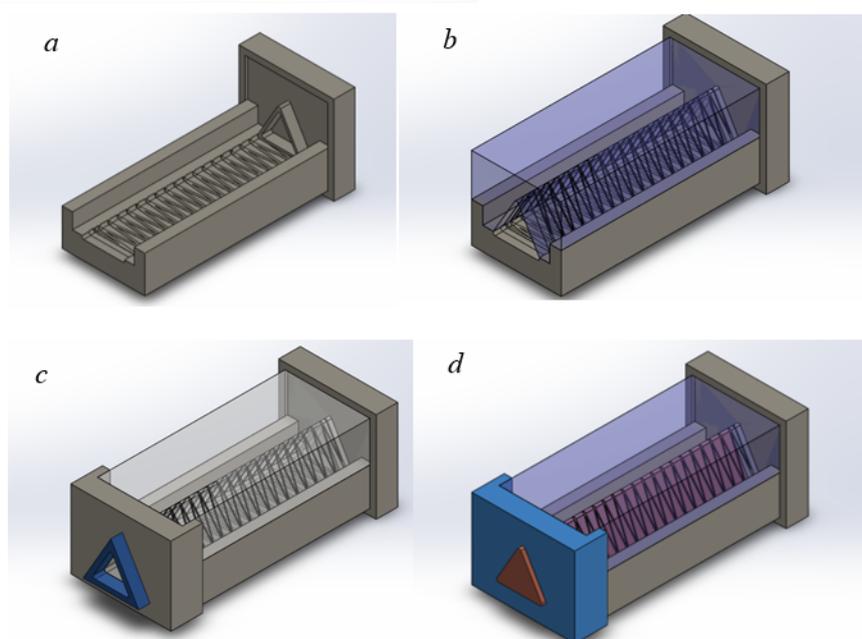


Figura 62. (a) Ensamble de pieza base y lateral fino. (b) Ensamble de pieza lateral grueso al molde. (c) Vista Isométrica del ensamble con tapa superior y tapa de vertido. (d) Ensamble de varilla triangular en el molde de vertido [58] .

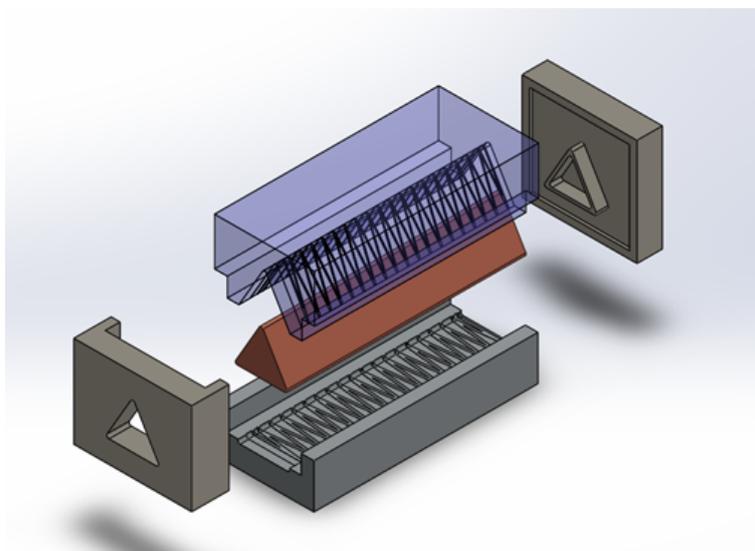


Figura 63. Vista Isométrica del ensamble explosionado [58].

Impresión de Piezas	
Dificultades	
Base	Los bordes externos que sirven de pared de contención para las piezas laterales no tienen una altura considerable por lo que no son capaces de generar presión en las piezas laterales, generando fugas del material cuando este se vierte.
Lateral Fino	El patrón de extrusión, que sirve para realizar el camino por el que debe pasar la fibra de kevlar, tiene una escala de 0.8 %. Al momento de imprimir la pieza el patrón de extrusión no se generó en la pieza.

V-D. Cuarto molde de prueba- Segunda Impresión

Durante la fase de reconfiguración, se realizaron modificaciones en las medidas del molde existente con el objetivo de evitar la filtración de material no deseado en la cámara triangular del actuador. Asimismo, se consideró la extrusión de las fibras de Kevlar en el actuador para garantizar un correcto funcionamiento.

▪ Segunda impresión de piezas:

- Base
- Lateral Grueso

Base:Rediseño

A esta pieza se le agregan pequeños rectángulos vaciados de 6 mm de profundidad hacia el interior de la base, estos se encuentran en el área donde debe encajar el lateral grueso. La función de estos es ajustar el lateral a la base y prevenir la fuga del material. Además, se aumenta la altura de los bordes de la base para que cumplan su función de manera más efectiva.

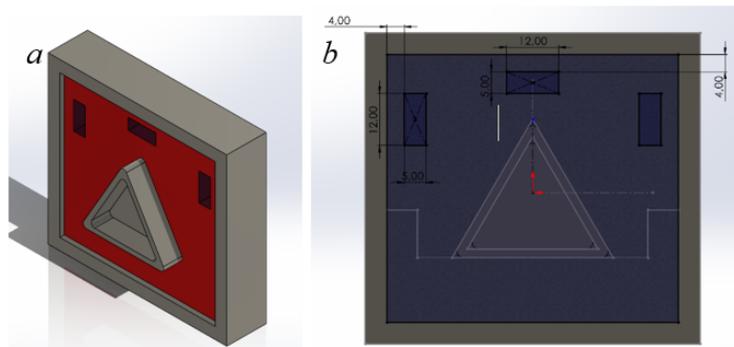


Figura 64. (a) Vista Isométrica de la pieza Base con cotas. (b) Cotas de pieza “Base” [58].

Tabla XVII
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: BASE #3

Extrusión de base cuadrada	15 mm
Extrusión del triángulo	8 mm
Altura del borde exterior	22 mm
Profundidad de rectángulos	6mm
Redondeo	1.5 mm

Lateral Grueso: Rediseño

A la pieza se le agregan en la parte inferior tres extrusiones rectangulares con una altura de 6 mm que va a hacer utiliza para que la base y el lateral puedan ensamblarse de una mejor manera y evitar la fuga del material. Se debe determinar el tamaño de la extrusión en este caso luego de una serie de prueba es de 4.5 %.

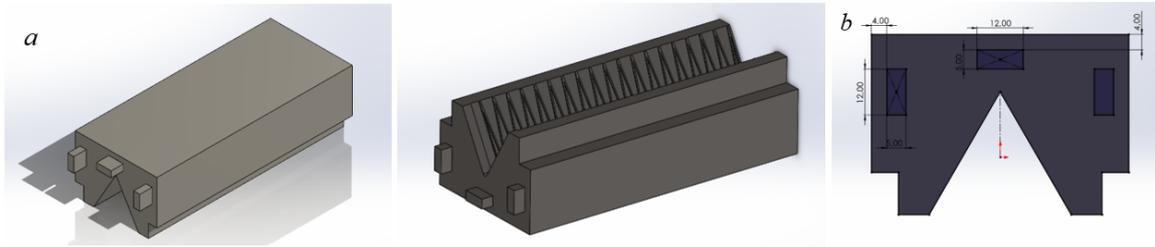


Figura 65. (a) Vista Isométrica del “Lateral Grueso” . (b) Cotas del “Lateral Grueso” [58].

Tabla XVIII
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: LATERAL GRUESO #3

Extrusión del lateral	150 mm
Extrusión de rectángulos	6 mm
Redondeo	1.5 mm

Dificultades:El Ensamble de Piezas- Pruebas físicas

Los rectángulos que iban a servir para encajar y anclar el lateral grueso a la base no pueden ser utilizados ya que la tolerancia que existe entre los rectángulos de extrusión del lateral y el rectángulo vacío que se encuentra en la base no permite que ambas piezas encajen.

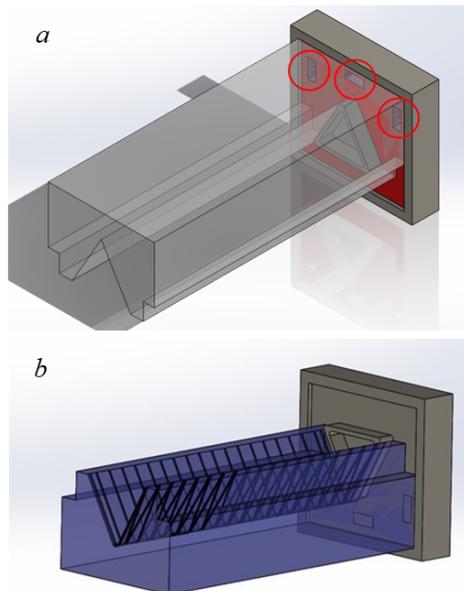


Figura 66. (a) Se muestran los errores en el ensamble de las piezas. (b) Ensamble de pieza base y lateral grueso [58].

V-E. Molde final para segunda capa de recubrimiento

Tercera impresión de piezas:

- Base
- Lateral Grueso
- Lateral Fino
- Tapa Superior

Base:

Se redimensiona el tamaño del triángulo que determinan el nuevo grosor del actuador.

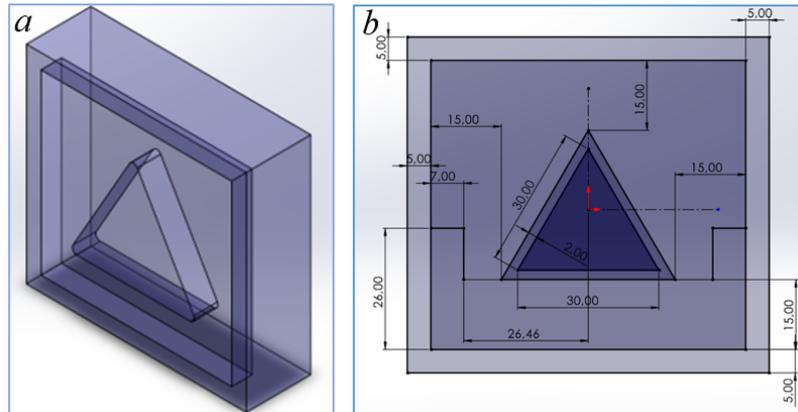


Figura 67. (a) Vista Isométrica de la pieza “Base”. (b) Cotas de pieza “Base” [58].

Tabla XIX

TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: BASE

Extrusión de base cuadrada	15 mm
Extrusión del triángulo	8 mm
Altura del borde exterior	22 mm
Redondeo	1.5 mm

Es fundamental recordar que el diseño del molde de recubrimiento debe excluir cualquier forma de extrusión interna. El propósito primordial de este molde es asegurar la integridad de las ataduras del hilo de Kevlar, garantizando así un proceso de inflado sin inconvenientes. Por lo tanto, se ha adaptado la configuración de estos moldes de manera meticulosa, con el objetivo de eliminar toda eventualidad de fuga en su interior.

Lateral Grueso: Diseño final

Se redimensiona las medidas a tal punto que se tenga un espacio considerable de 1 mm para el segundo grosor del actuador.

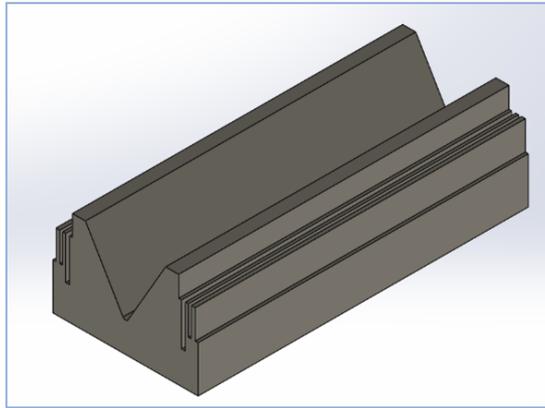


Figura 68. (a) Vista Isométrica de la pieza "Lateral Grueso" [58].

Tabla XX
TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: LATERAL GRUESO

Extrusión del lateral	170 mm
Redondeo del triángulo	1.5 mm
Separacion entre laterales	22 mm

Lateral Fino: Diseño final

Se redimensiona las medidas a tal punto que se tenga un espacio considerable de 1mm para el segundo grosor del actuador y que pueda encajar perfectamente al molde "lateral grueso" para evitar cualquier tipo de fugas.

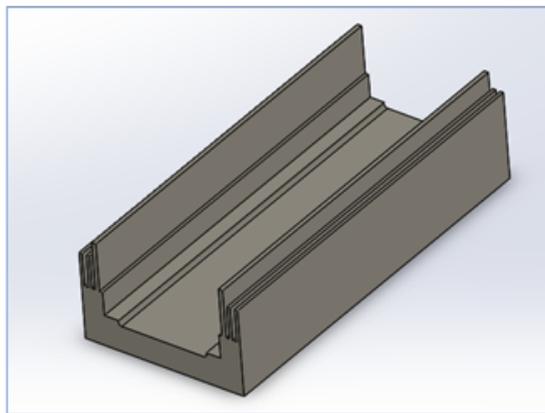


Figura 69. (a) Vista Isométrica de la pieza "Lateral Fino" [58].

Tabla XXI
 TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: LATERAL FINO

Extrusión del lateral	170 mm
Redondeo de la base del triángulo	1.5 mm

Tapa superior: Diseño final

Se ajustan las medidas para que encaje junto a ambos moldes “lateral grueso” y “lateral fino”.

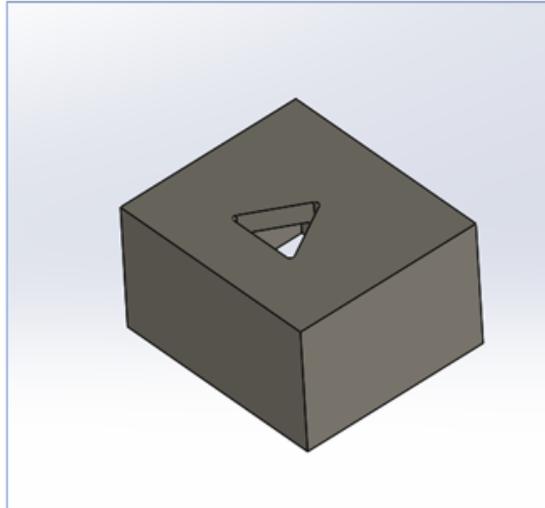


Figura 70. (a) Vista Isométrica de la pieza “Tapa Superior” [58] .

Tabla XXII
 TABLA DE MEDIDAS DE PIEZA: TAPA SUPERIOR

Extrusión de la tapa	50 mm
Redondeo del triángulo	1.5 mm

Resulta evidente que todas las dimensiones presentan igualdad; este hecho es particularmente notorio en el caso de la tapa superior y la varilla, las cuales deben compartir una medida idéntica para lograr un acoplamiento preciso y desempeñar efectivamente su función como elemento de cierre.

V-F. Impresión 3D de Moldes

Programa utilizado:

Ultimaker Cura

Información del uso de la máquina:

Esta máquina se ocupó para la impresión de moldes en 3D, se usó dos tipos de materiales. El primer material mencionado es el TPU , que es un material blando y flexible. El segundo material mencionado es el ABS , que es un material mucho más rígido. Se caracteriza por su resistencia a los impactos y su buena estabilidad dimensional. Ambos materiales son polímeros, ofrecen diferentes propiedades y características, lo que los hace adecuados para diferentes aplicaciones.

V-G. Procedimiento de la impresión en 3D

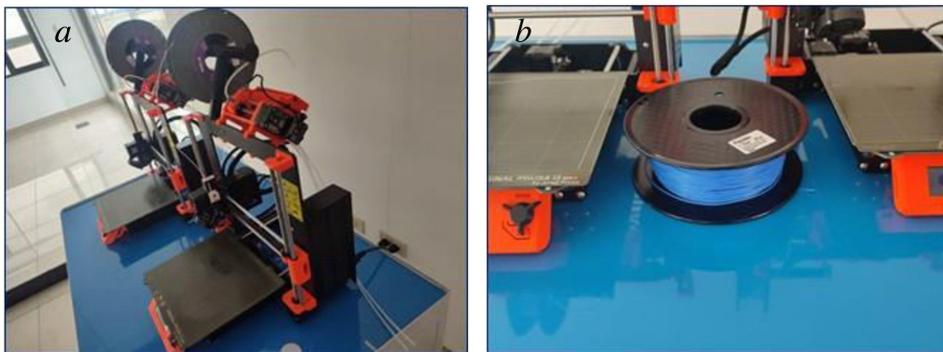


Figura 71. (a) Impresora 3D. (b) Material utilizado: TPU [59].

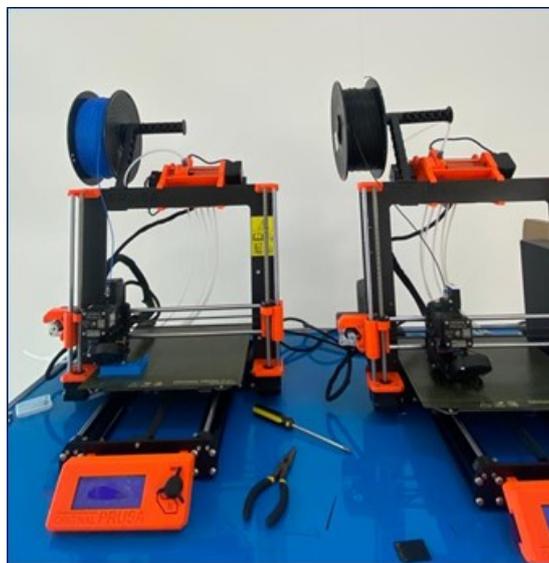


Figura 72. Material TPU de color azul y negro [59].

Parámetros a configurar en el programa

- Calidad: 0.2mm
- Grosor de la pared: 0.8mm
- Grosor superior/ inferior: 0.9 mm
- Temperatura de impresión: 240°C
- Temperatura de la placa de impresión: 70°C
- Velocidad de impresión: 60 mm/s
- Tipo de adherencia a la placa de impresión: Balsa

V-H. Procedimiento para moldes de silicon

V-H1. Secado del material:

Se realiza la mezcla de material Ecoflex de acuerdo con la porción de peso en este caso 1A: 1B y se espera de acuerdo con su tiempo de secado de 4 horas. Debido a especificaciones de la norma y para la obtención de mejores resultados durante el ensayo, en el secado de la mezcla se aplican la desgasificación al vacío.

Este último proceso tiene como finalidad la eliminación de gases disueltos en un líquido, es decir, cuando una onda de alta presión golpea la pared donde se encuentra la burbuja esta explota y la energía que se libera es la encargada de romper los lazos entre las partículas y elimina el gas presente en la disolución.

V-H2. Medición y mezcla:

Se deben revolver las Partes A y B minuciosamente antes de dispensar. Después de dispensar las cantidades requeridas de las Partes A y B en el recipiente de mezcla (1A:1B por volumen o peso), se debe de mezclar de manera exhaustiva durante 3 minutos, asegurándose de raspar los lados y el fondo del recipiente de mezcla varias veces. Después de mezclar las partes A y B.

Hay que dejar suficiente espacio en el recipiente para la expansión del material. Se debe realizar el vacío hasta que el material suba, se rompa y caiga. El vacío se lo realiza durante 1 minuto después de que el material caiga.

V-H3. Vertido, curado y desempeño del molde:

Para obtener mejores resultados, la mezcla se debe vertir en un solo punto en el punto más bajo del campo de contención. Hay que dejar que el caucho alcance su nivel y cubra el modelo. Un flujo uniforme ayudará a minimizar las burbujas de aire atrapadas. El caucho líquido debe nivelarse al menos 1.3 cm por encima del punto más alto de la superficie del modelo.

V-H4. Curado/Poscurado:

Se deja curar el caucho según las indicaciones a temperatura ambiente (73°F/23°C) antes de desmoldear. No hay que curar el caucho a temperaturas inferiores a 65°F/18°C. Opcional: El poscurado del molde ayudará a alcanzar rápidamente las propiedades físicas y de rendimiento máximas. Después de curar a temperatura ambiente, se debe exponer el caucho a 176°F/80°C durante 2 horas y a 212°F/100°C durante una hora.

Se recomienda dejar que el molde se enfríe a temperatura ambiente antes de usarlo. Si se utiliza como molde, los moldes de caucho de silicona pueden exhibir características de liberación naturales cuando se vierte por primera vez. Sin embargo, dependiendo de lo que se esté moldeando en el molde, la lubricidad del molde puede agotarse con el tiempo y las piezas podrían comenzar a pegarse. En el caso de moldear cera o yeso, no se necesita un agente de liberación. Sin embargo, para evitar la degradación del molde al moldear poliuretano, poliéster y cualquier tipo de resinas, se recomienda aplicar un agente de liberación como Mold Release antes de realizar el moldeado.

V-H5. Kevlar: Ángulo:

Para el diseño los actuadores se dispuso un ángulo entre la envoltura del hilo de kevlar a tal punto que se pudiera generar un movimiento de extensión a a lo largo de actuador blando.

Con el propósito de optimizar la capacidad de elongación del actuador inflado y limitar su deformación en la dirección radial del tubo elastomérico, se emplea un revestimiento de fibras rígidas de Kevlar dispuestas en un patrón helicoidal. Considerando que un actuador de extensión pura demanda un ángulo de fibras de 0° , el cual presenta dificultades en su logro práctico, se recurre a la disposición de dos conjuntos de fibras dispuestas simétricamente a un ángulo característico de 7° . Este enfoque conduce a la creación de un actuador que logra extensión pura sin inclinaciones ni expansiones no deseadas.

Para la regulación del ángulo de las fibras durante la manufactura, se implementan crestas en la superficie del molde, generando surcos en el actuador que trazan la dirección para enrollar las fibras. En los extremos del actuador, se ejecuta un enrollamiento múltiple de las fibras, seguido de su atado. Esta disposición se asegura mediante la aplicación de una fina capa de elastómero sin curar sobre la superficie del actuador, lo que fija el hilo en su posición. Luego, el actuador se retira de la varilla con precaución. Los extremos del actuador se cierran con Sil-Poxy y un tornillo ventilado se inserta en uno de sus extremos. La posterior curación del Sil-Poxy se efectúa durante un período de 24 horas.

Este proceso de manipulación meticulosa y diseño calculado busca garantizar la integridad estructural y funcional del actuador, permitiendo una extensión libre de distorsiones no deseadas. La utilización de fibras rígidas de Kevlar dispuestas en un ángulo característico de 7° grados demuestra ser una solución ingeniosa para superar las limitaciones prácticas en la obtención de un ángulo de fibras de 0° y en última instancia, posibilita la creación de actuadores que cumplen con los requerimientos de extensión sin comprometer su rendimiento ni su durabilidad.

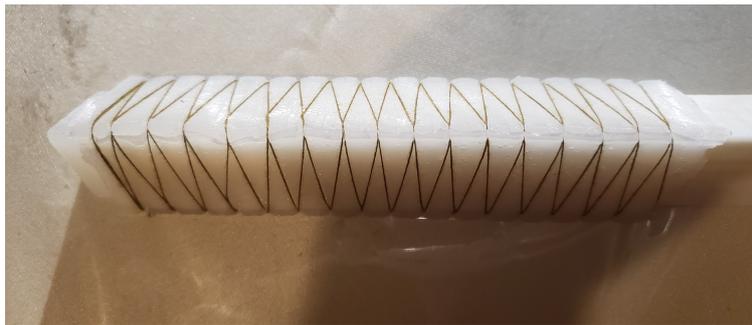


Figura 73. Patron helicoidal del hilo de kevlar[59].

Hilo de kevlar con ángulo 0°

Lograr un ángulo de envoltura de hilo de Kevlar de cero grados en el contexto de la robótica blanda es complicado debido a varias razones:

- **Naturaleza Flexible de los Materiales:** La robótica blanda se basa en materiales flexibles y deformables que imitan las propiedades de tejidos biológicos. Estos materiales están diseñados para adaptarse a diferentes formas y movimientos, lo que dificulta la obtención de un ángulo de envoltura completamente plano.
- **Integridad Mecánica:** Un ángulo de envoltura de cero grados implicaría que las capas de hilo de Kevlar estarían completamente alineadas sin solapamiento. Sin embargo, el solapamiento entre las capas es esencial para proporcionar resistencia mecánica y evitar que las capas se deslicen entre sí, lo que podría comprometer la integridad del actuador.
- **Adhesión y Coherencia:** En la fabricación de actuadores blandos, es necesario garantizar una adhesión adecuada entre las capas de material para que el actuador pueda soportar cargas y deformaciones. Un ángulo de envoltura de cero grados podría dificultar la creación de esta adhesión y coherencia entre las capas.

- **Proceso de Fabricación:** Lograr un ángulo de envoltura de cero grados implicaría un proceso de fabricación muy preciso y controlado. La manipulación manual de los hilos de Kevlar para lograr esta configuración sería extremadamente difícil y propenso a errores.
- **Diseño y Funcionalidad:** En muchos casos, la flexibilidad y la adaptabilidad son características deseadas en los actuadores blandos. Forzar un ángulo de envoltura de cero grados podría limitar la capacidad del actuador para cambiar de forma y adaptarse a diferentes condiciones.

La combinación de la naturaleza flexible de los materiales, la necesidad de integridad mecánica, la importancia de la adhesión entre capas y la complejidad del proceso de fabricación hacen que lograr un ángulo de envoltura de hilo de Kevlar de 0° sea difícil y poco práctico en el contexto de la robótica blanda.

Hilo de kevlar con ángulo 7°

El estudio y la implementación del hilo de kevlar con un ángulo de 7° representan un enfoque innovador en el campo de la ingeniería de materiales y la aplicación de materiales avanzados en diversas industrias. El Kevlar, una fibra sintética conocida por su excepcional resistencia y durabilidad, ha sido ampliamente utilizada en la fabricación de productos que requieren propiedades mecánicas sobresalientes. Sin embargo, la introducción de un ángulo de 7° sugiere una particularidad en la configuración y aplicación de esta fibra en un ángulo específico, lo cual podría tener implicaciones significativas en términos de comportamiento mecánico y funcionalidad.

La selección de este ángulo puede tener fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas que se extienden a diversas áreas. La geometría y la orientación de las fibras en materiales compuestos, como el Kevlar, tienen un impacto crucial en sus propiedades estructurales. Un ángulo de 7° puede influir en la resistencia a la tracción, la rigidez y la capacidad de absorción de energía del material compuesto resultante. Esta orientación específica podría permitir una distribución más eficiente de las cargas aplicadas, optimizando la relación entre peso y rendimiento en aplicaciones donde la eficiencia estructural es esencial.

Desde la perspectiva de esta aplicación se podría encontrar usos en una variedad de campos. En la industria aeroespacial, por ejemplo, donde se valora la relación peso-resistencia, esta configuración podría contribuir a la fabricación de componentes livianos y robustos para aeronaves y satélites. En el ámbito deportivo, esta innovación podría mejorar el diseño y la producción de equipos deportivos de alto rendimiento, como bicicletas, palos de golf y raquetas, al aprovechar las propiedades mecánicas excepcionales del Kevlar a un ángulo específico para optimizar la eficiencia y la durabilidad.

En resumen, el ángulo que posee el hilo de kevlar en este proceso es fundamental para el movimiento que se desea lograr mientras que el ángulo 0° es muy difícil de lograr durante de la experimentación dado que se necesita una precisión con un nivel de complejidad mayor.

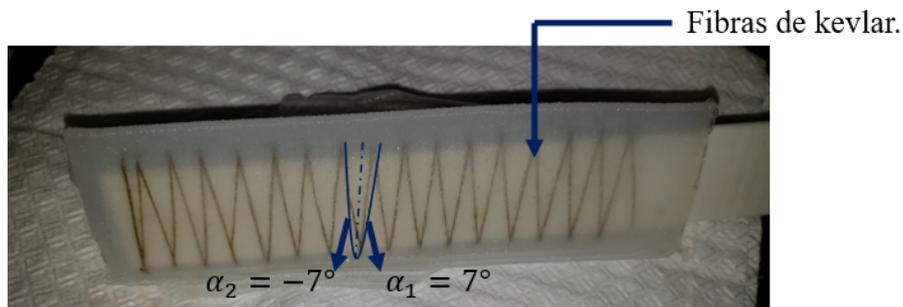


Figura 74. Ángulo del hilo de kevlar [60].

V-I. *Lista de materiales*

- Hilo de kevlar



Figura 75. Hilo de kevlar [61].

- Spray “Universal Mold release”



Figura 76. Spray Universal Mold Release [61].

- Silicona Ecoflex



Figura 77. (a) Ecoflex 00-30 “Parte A y Parte B”. (b) Ecoflex 00-33 AF “Parte A y Parte B” [61].

Tabla XXIII
COMPARACIÓN ENTRE ECOFLEX 00-30 Y ECOFLEX 00-33 AF

Característica	Comparación
Dureza	La silicona Ecoflex 00-30 tiene una dureza más suave en comparación con la Ecoflex 00-33 AF, la cual tiene una dureza media.
Resistencia al moho	La Ecoflex 00-33 AF es una variante de la silicona Ecoflex 00-33 formulada específicamente para ser resistente al crecimiento de hongos y moho.
Aplicaciones	La elección entre la Ecoflex 00-30 y la Ecoflex 00-33 AF dependerá de los requisitos específicos de tu proyecto, tales como la flexibilidad deseada y la necesidad de resistencia al moho.

- Sil Poxy



Figura 78. Sil poxy/pegamento para silicona [61].

- Moldes impresos en 3D: TPU (material utilizado)

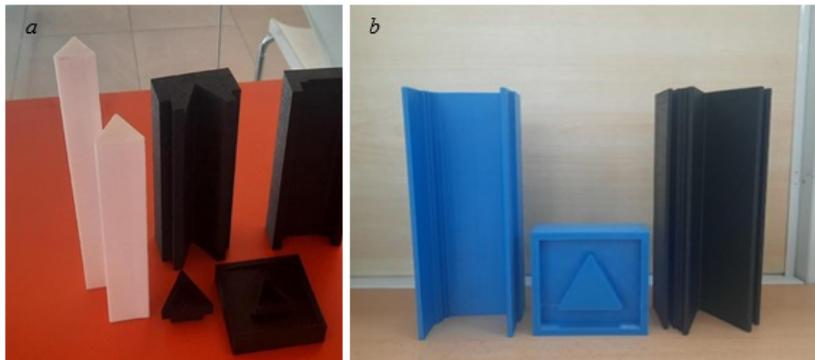


Figura 79. (a) Moldes impresos en 3D. (b) Moldes impresos en 3D correcciones por fuga de material [61].

Se rediseñaron los laterales de las piezas mediante la incorporación de nuevas aberturas en las paredes con el fin de prevenir la fuga del material durante el proceso de secado. Esta mejora permite una mayor eficiencia en el secado y evita desperdicios innecesarios.

V-J. Actuadores

1. Paso 1: Diseño de moldes en SolidWorks.

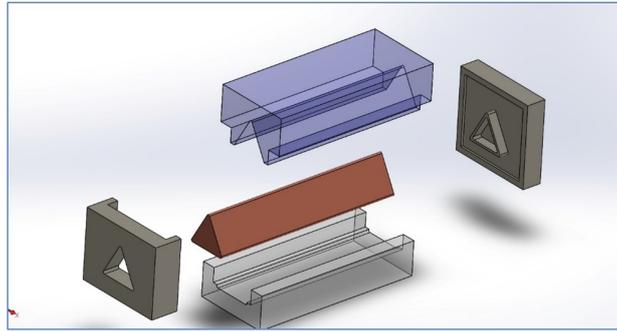


Figura 80. Simulación del ensamblaje del molde de secado [62].

2. Paso 2: Preparación de los actuadores utilizando los materiales mencionados previamente. Para moldear la silicona Ecoflex, se emplearon moldes fabricados con TPU mediante una impresora 3D. La varilla central, confeccionada con el material rígido denominado ABS, se inserta en el molde. Antes de verter la silicona, es necesario aplicar una capa de “Mold release” que es un aerosol que facilita la extracción de la silicona solidificada y simplifica este proceso. La mezcla se deja reposar durante 5 minutos.



Figura 81. Uso del Spray Mold Release [62] .

3. Paso 3: Se procede a verter la silicona en un recipiente de plástico, para medir la cantidad exacta requerida. A continuación, se vierte la silicona en los moldes impresos previamente. Es importante destacar que los primeros moldes presentan una extrusión interna que crea una marca orientativa para la trayectoria del hilo de Kevlar.



Figura 82. Vertido de silicona en el interior de los moldes [62].



Figura 83. Sellado de molde [62].

4. Paso 4: Tras el vertido inicial, se deja secar durante aproximadamente 8 horas y luego se retiran con precaución los moldes laterales. La varilla interior no debe ser extraída, ya que sirve para crear un espacio hueco que permite el flujo de aire sin dificultades. Se procede a amarrar la primera capa de silicona con el hilo de Kevlar, siguiendo la ruta previamente marcada en la silicona. Se realiza un pequeño nudo en el lateral.



Figura 84. Se retira la cobertura del primer molde [62].

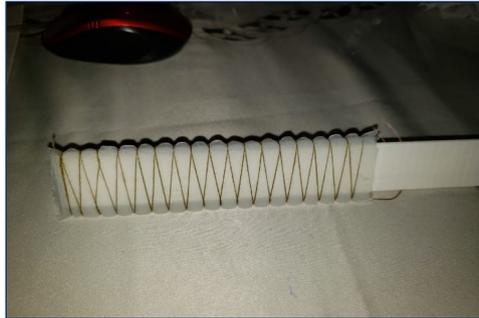


Figura 85. Atadura del hilo de kevlar [62].

5. Paso 5: Una vez obtenida la primera capa junto al hilo de Kevlar, se lleva a cabo un segundo recubrimiento con el propósito de fortalecer la fibra de Kevlar. Los moldes utilizados en esta etapa no deben presentar extrusiones internas. La silicona se vierte en el segundo molde de recubrimiento.



Figura 86. Segundo vertido [62].

6. Paso 6: Se retira los moldes laterales, dejando visible la varilla en el interior. Con cuidado, se retira la varilla, dejando ambos extremos huecos, utilizando un adhesivo de silicona conocido como “Sil Poxy”, se unen en ambos lados dos triángulos fabricados del mismo material de silicona.

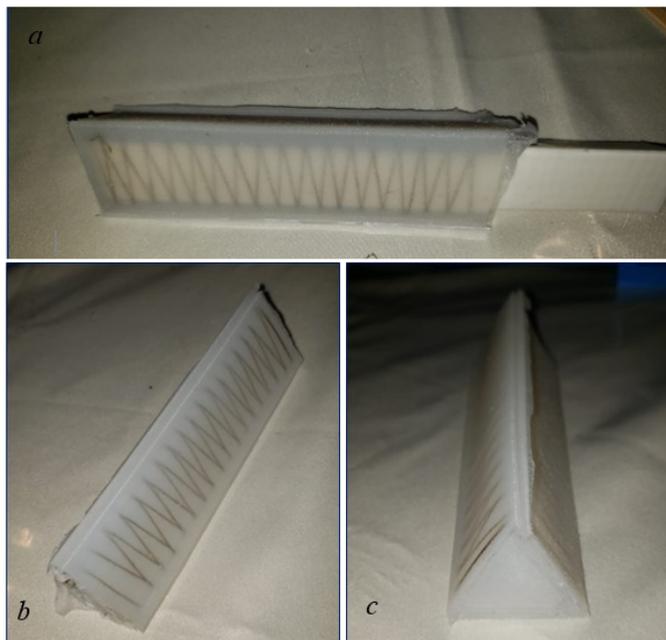


Figura 87. (a) Segunda cobertura con hilo de kevlar. (b) Se retira la varilla. (c) Ingreso de triángulos fabricados del mismo material, pegados con pegamento de silicon [62].

7. Paso 7: Se procede a colocar una manguera.



Figura 88. Se inserta la manguera dentro del actuador [62].

8. Paso 8: Finalmente, para mayor seguridad del actuador y que no presente fugas lo que se colocó es un tornillo hexagonal hueco ventilado, junto a dos arandelas triangulares y una tuerca. Se coloca un poco de Sil poxy a sus extremos y se ingresa una manguera para catéteres en el actuador haciendo una pequeña incisión en el molde, para realizar la primera prueba de locomoción del molde.

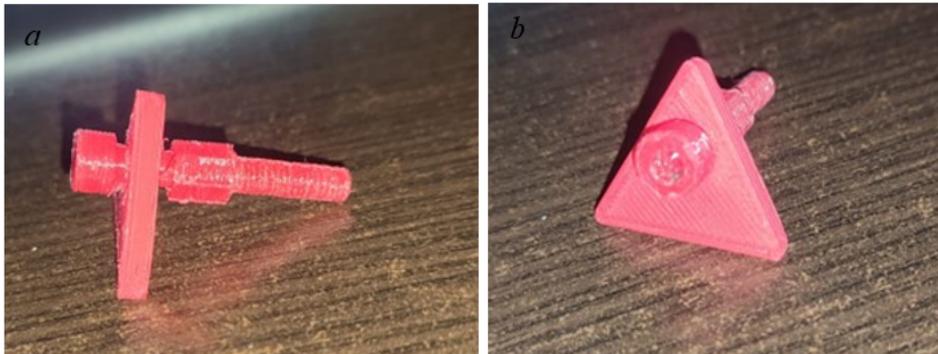


Figura 89. (a) Tornillo hueco y tuerca. (b) Arandela triangular [62].

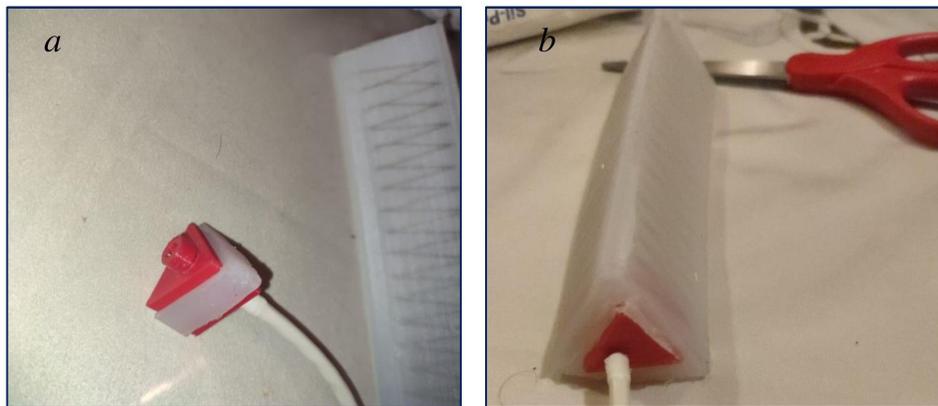


Figura 90. (a) Triángulo de silicona. (b) Sellado completo e ingreso de manguera. [62].

V-K1. *Patrón Lineal*: De acuerdo con el estudio experimental y teórico, el enfoque kirigami permite diseñar y controlar las propiedades elásticas de los materiales laminares de una manera altamente flexible [63]. Los materiales laminares con patrones de corte en forma de muescas, conocidos como kirigami, demuestran una respuesta mecánica única prometedora para diversas aplicaciones de ingeniería, como baterías estirables, actuadores plegables, compuestos con memoria de forma autoplegables, baterías de iones de litio estirables, electrodos estirables, grafenos estirables [64] y seguimiento solar integrado [65].

Las láminas kirigami poseen un régimen mecánico en el que las láminas son altamente estirables y muy suaves en comparación con las láminas originales sin grietas o cortes lineales, en virtud de la deformación fuera del plano. El enfoque kirigami permite predecir la resistencia a la tracción de las láminas con precisión mediante modelado de elementos finitos.

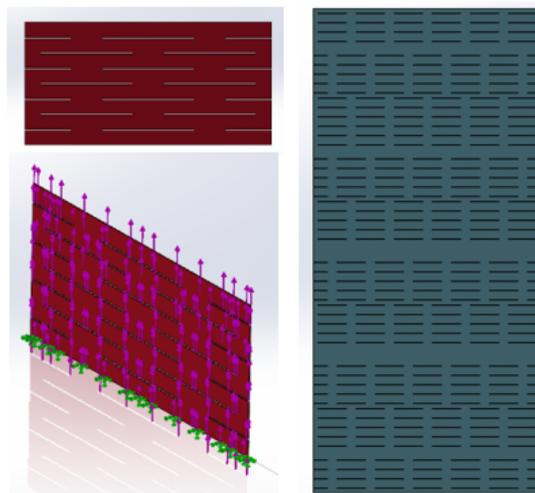


Figura 91. Patrón Lineal [66].

A diferencia del patrón convencional de cortes lineales aplicado comúnmente para crear sistemas altamente elásticos, el hallazgo del trabajo revela que la piel de kirigami asociada restringió en gran medida la capacidad de estiramiento del actuador ($\epsilon < 0,05$), ($\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$) y lo convirtió en un componente rígido. L_0 y L que denotan las longitudes no deformadas y deformadas de la parte perforada de la piel.

La supresión del modo de pandeo asimétrico característico de las láminas de kirigami, el cual consiste en alternar ligamentos que se tuerce hacia arriba y hacia abajo, fue contrarrestado por la presencia del actuador, lo que resultó en la ausencia de cambios discernibles al inflarse. El movimiento de la oruga se mantuvo suave en ambas direcciones con valores de fricción similares durante la tracción y el empuje $u_f(V) \approx u_b(V) \approx 0,75 - 1$.

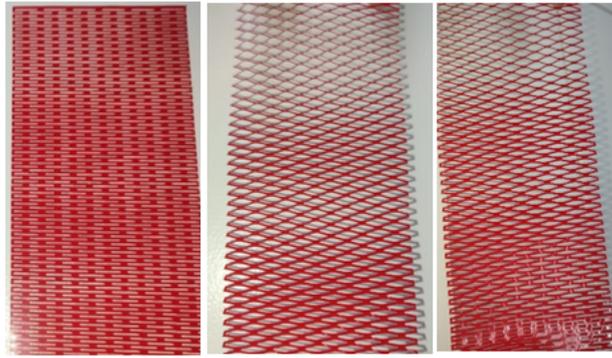


Figura 92. Probeta de Deformación Lineal [67].

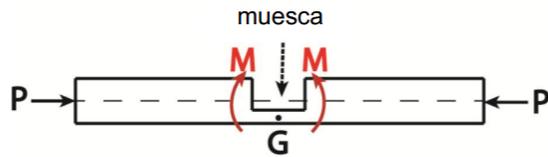


Figura 93. Muesca del Patrón Lineal [68].

Debido a que el corte rompe la simetría geométrica, el centro de gravedad se desplaza hacia abajo y no se alinea con la línea neutra de la superficie (indicada con una línea punteada). Esto genera un momento de flexión M que cierra el corte durante la compresión y, por lo tanto, influye en la dirección de la flexión resultante [68].

Se utilizó la teoría de vigas de pandeo lateral inducido por torsión para predecir el pandeo crítico después del pandeo en una estructura kirigami de corte lineal con una celda unitaria representativa. La celda unitaria se dividió en dos partes y el comportamiento de pandeo se investigó desde la viga superior que exhibe deformación sinusoidal. El pandeo de la viga incluye deflexión lateral y torsión. La rotación de las unidades de kirigami alrededor de las rótulas cortadas se consideró como un movimiento de cuerpo rígido y, por lo tanto, no se consideró en el modelo de pandeo.

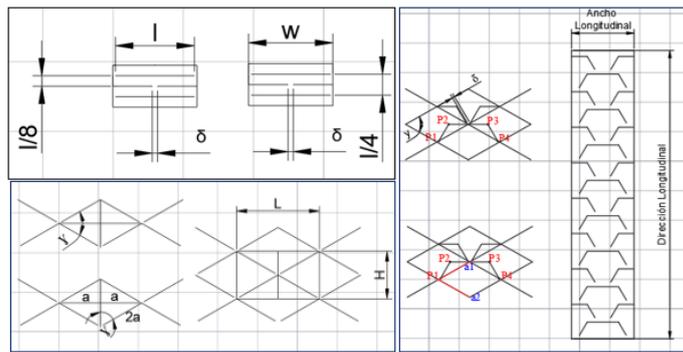


Figura 94. Desarrollo de celdas de patrones lineales, triangular, trapezoidal [69].

Definición de la estructura lineal

La estructura kirigami es una estructura con cortes periódicos en la dirección del ancho, y el conjunto de cortes alineados en la dirección del ancho se repite en la dirección longitudinal. Los diversos parámetros de dimensión que pueden describir una estructura kirigami incluyen el ancho de la celda w mm, la distancia vertical de la celda $H : \frac{l}{4}$ mm, el ancho de corte l mm, la distancia de corte o ancho de bisagra δ mm, el paso de corte $\frac{l}{8}$ mm, y número de ciclos de patrón n [50].

Las características mecánicas de una estructura kirigami o un dispositivo que incluye esta estructura pueden cambiar con cualquier modificación en los parámetros de dimensión. La estructura kirigami se deforma en las direcciones tridimensional y fuera del plano después de la deformación en el plano en dos dimensiones [57], [54], [53]. La estructura kirigami se deforma en las direcciones tridimensional y fuera del plano después de la deformación en el plano en dos dimensiones.

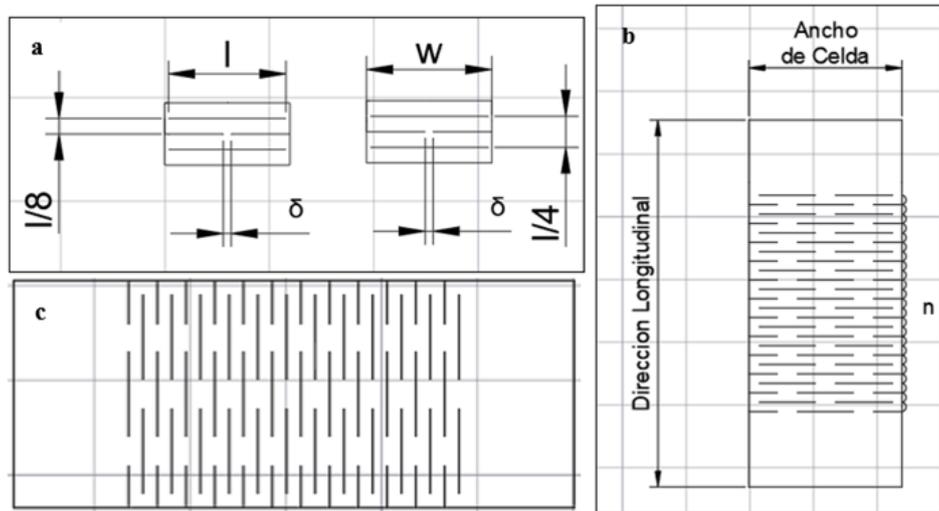


Figura 95. (a)Parámetros de celda Lineal,(b) Ciclo patrón Lineal, (c) Probeta Lineal [70].

Tabla XXIV
TABLA DE PARÁMETROS: CELDA LINEAL

Parámetros	Símbolos	Unidades
Ancho de la celda	w	mm
Longitud de celda	$l/4$	mm
Ancho del corte	l	mm
Ancho de bisagra	δ	mm
Paso del corte	$l/8$	mm
Número de ciclos de patrón	n	-

Se debe recordar que la longitud direccional de las probetas de corte lineal se determina a partir de los parámetros establecidos en la norma ISO 527-3 para láminas con un espesor menor a 0.1 mm, donde la longitud total debe ser mayor o igual a 150 mm, con relación con esta normativa y la definición previa de los parámetros según la celda lineal podemos establecer las siguientes medidas para las probetas de una, dos y tres celdas.

Diseño de Celdas y Probetas Lineales

Celda lineal

El tamaño de la celda lineal con respecto a una probeta de una celda es de 24 mm, lo que significa que su medida en w , es el doble de su medida en l , comprende una matriz de cortes lineales escalonados de longitud

$l - \delta$. Esto se debe a que la celda debe adecuarse a un ancho que le permita observar el pandeo de las bisagras al momento de realizar el análisis de deformación en las probetas planas.

El primer diseño realizado permite tener una idea clara de cómo se desarrolla el patrón a lo largo de su dirección longitudinal. Es importante determinar qué medidas deben adecuarse dentro de la celda en relación con su ancho de bisagra, la cantidad de cortes presentes en el ancho direccional de la celda así como el número de ciclos de corte que deben realizarse hasta llegar a una determinada dirección longitudinal.

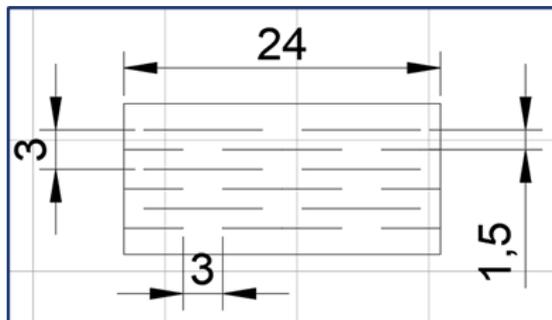


Figura 96. Valores de celda lineal [70].

Tabla XXV
TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DE CELDA LINEAL

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	24	mm
Ancho del corte	l	12	mm
Longitud de celda	$l/4$	3	mm
Paso del corte	$l/8$	1.5	mm
Ancho de bisagra	δ	3	mm
Número de ciclos de patrón	n	5	-

Probeta lineal: Una celda

Esta probeta ha sido específicamente diseñada para permitir la visualización de la deformación que ocurre en la lámina durante las pruebas realizadas en una máquina de tracción. Esto es de gran utilidad para comparar los resultados obtenidos con los datos simulados mediante elementos finitos en SOLIDWORKS. La razón detrás de esto radica en que los cortes realizados en un área más amplia del material pueden tener un impacto significativo en el comportamiento de deformación.

Cualquier error en los cálculos de las medidas o en el diseño de la probeta puede tener un impacto significativo en el comportamiento del pandeo de la lámina al pasar de una estructura en 2D a 3D. Por lo tanto, es fundamental asegurarse de que los cortes sean precisos y estén correctamente diseñados para evitar cualquier influencia negativa en la deformación de la lámina.

Además, una vez que se ha definido la celda base que servirá como patrón lineal, se procede a configurar una matriz rectangular siguiendo una disposición específica, tal como se muestra en la imagen proporcionada, a continuación.

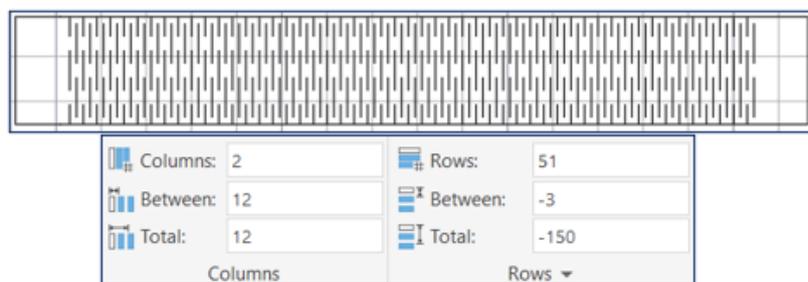


Figura 97. Configuración de matriz rectangular para Probeta Lineal: Una Celda [70].

Tabla XXVI
TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN LINEAL: UNA CELDA

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	24	mm
Ancho del corte	l	12	mm
Longitud de celda	$l/4$	3	mm
Paso del corte	$l/8$	1.5	mm
Ancho de bisagra	δ	3	mm
Número de ciclos de patrón	n	51	-

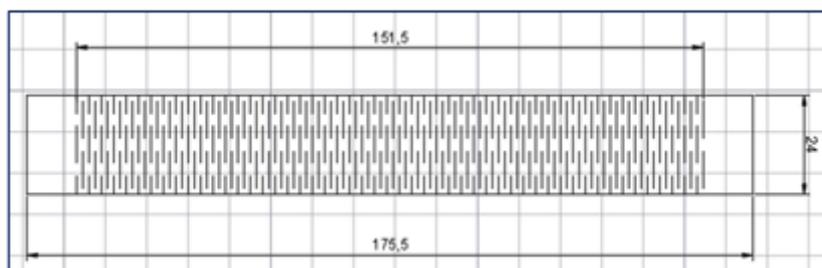


Figura 98. Probeta lineal medidas finales: Una Celda [70].

Probeta lineal: Dos celdas

Las probetas utilizadas para simulaciones en programas de diseño como AutoCAD y SOLIDWORKS ofrecen una forma eficiente y precisa de evaluar el comportamiento de los materiales y componentes en un entorno virtual.

La probeta lineal de esta dimensión se utilizó exclusivamente para la simulación del diseño del material con este tipo de corte. Las dimensiones del corte no se emplearon en las pruebas reales donde se cortaron los patrones diseñados.

Al repetirse las medidas en cada uno de los parámetros mencionados, las tablas que se presentarán a continuación solo mostrarán aquellos parámetros donde se observen cambios.

Tabla XXVII
TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN LINEAL: DOS CELDA

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	48	mm
Tamaño del ciclo del patrón		151.5	
Dirección longitudinal		175.5	

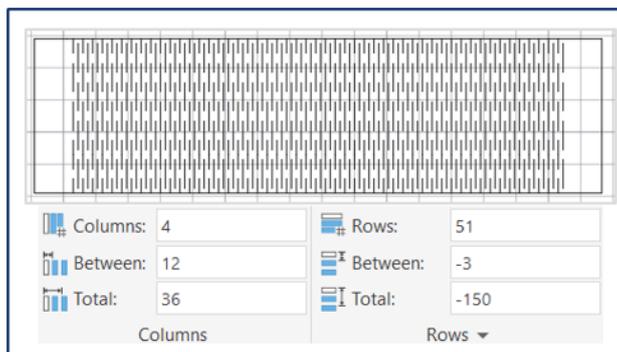


Figura 99. Configuración de matriz rectangular para Probeta Lineal: Dos Celdas [70].

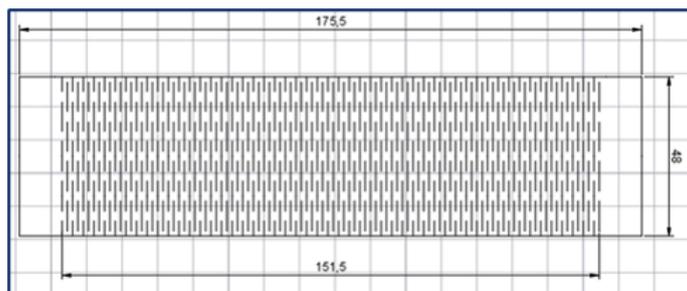


Figura 100. Probeta lineal medidas finales: Dos Celdas [70].

Probeta lineal: Tres Celdas

Las probetas de 6 celdas x 51 cortes son una muestra utilizada en las pruebas de deformación en una máquina de ensayo universal. Estas probetas han sido diseñadas específicamente para evaluar la deformación en base al desplazamiento de puntos seleccionados previamente en las pruebas. Además, son una herramienta efectiva para visualizar parámetros clave como la máxima fuerza aplicada, el máximo desplazamiento y la máxima deformación obtenida durante las pruebas. Estas probetas son de vital importancia para obtener datos precisos y confiables sobre la deformación de los materiales bajo diferentes condiciones de carga.

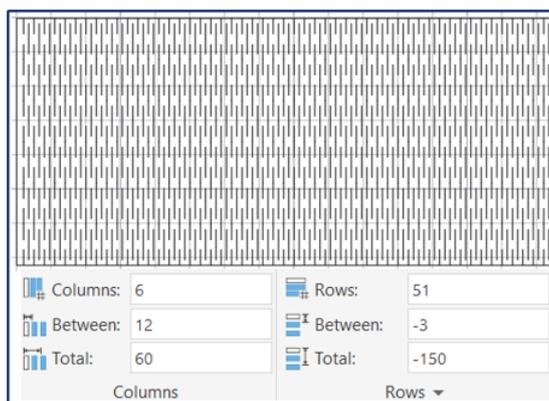


Figura 101. Configuración de matriz rectangular para Probeta Lineal: Tres Celdas [70].

Tabla XXVIII
TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN LINEAL: TRES CELDA

Parámetros	Simbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	72	mm
Tamaño del ciclo del patrón		151.5	
Dirección longitudinal		153.5	

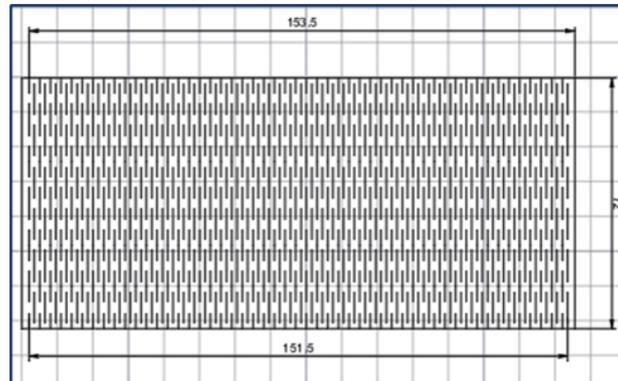


Figura 102. Probeta lineal medidas finales: Tres Celdas [70].

Piel de Recubrimiento del Actuador: Patrón Lineal

Columns:	11	Rows:	48
Between:	12	Between:	-3
Total:	120	Total:	-141
Columns		Rows	

Figura 103. Configuración de matriz rectangular para Piel de recubrimiento Lineal [70].

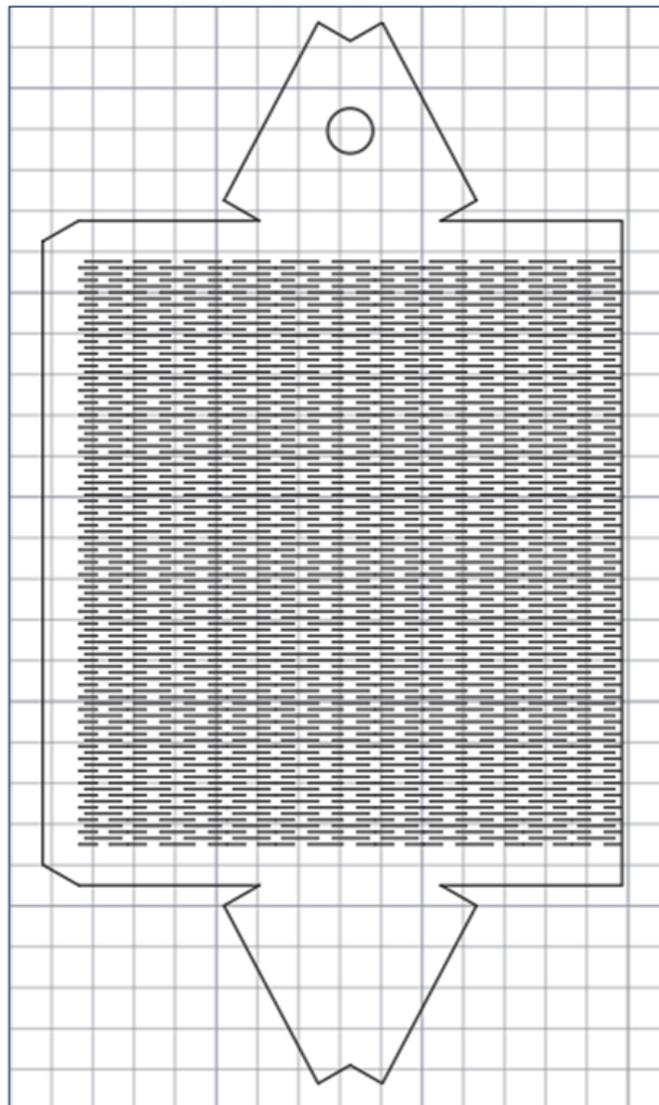


Figura 104. Piel de Recubrimiento Lineal [70].

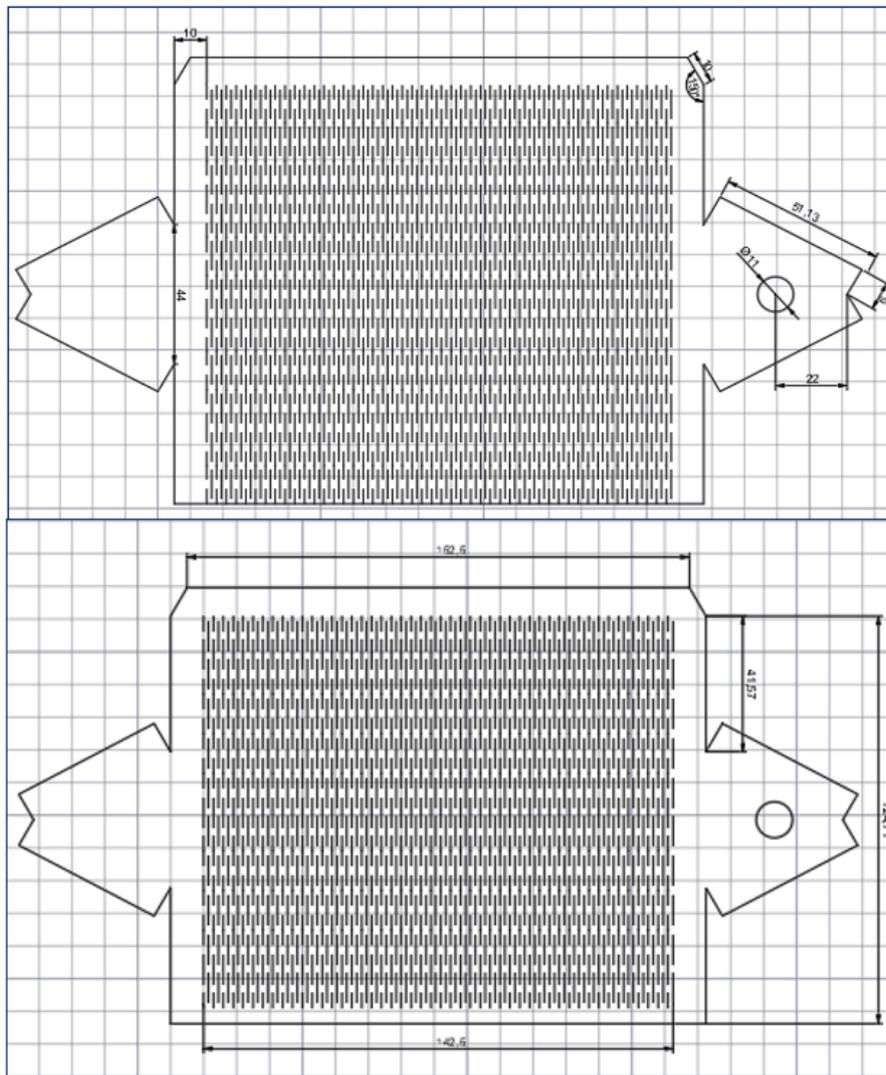


Figura 105. Medidas de Piel de Recubrimiento Lineal [70].

V-K2. Patrón Triangular:

En contraste, se descubrió que las otras tres pieles solo limitaban moderadamente la capacidad de estiramiento del actuador suave $\varepsilon \approx 0,12 \sim 0,18$, lo que resultó en una curva de presión-alargamiento caracterizada por un régimen lineal inicial, una meseta de presión y un endurecimiento final. Durante el régimen lineal inicial, todas las bisagras se doblaron en el plano y las pieles permanecieron planas. La desviación repentina de la linealidad a una tensión de meseta fue causada por el pandeo fuera del plano de las bisagras, lo que indujo la formación de un patrón 3D similar al de la piel de una serpiente con todas las características saliendo homogéneamente hacia afuera [50]. Esta ventana emergente inducida por el pandeo alteró significativamente la fuerza de fricción medida.

Definición de la estructura triangular

Los diversos parámetros de dimensión que pueden describir una red triangular kirigami incluyen el ancho de corte l mm, el ángulo presente en la celda triangular γ [radianes, grados], la distancia de corte o ancho de bisagra δ mm y número de ciclos de patrón n . La celda unitaria consiste en un dominio rectangular con ancho L y H con cuatro cortes incrustados de longitud $l - \delta$ separados por bisagras de ancho δ [71].

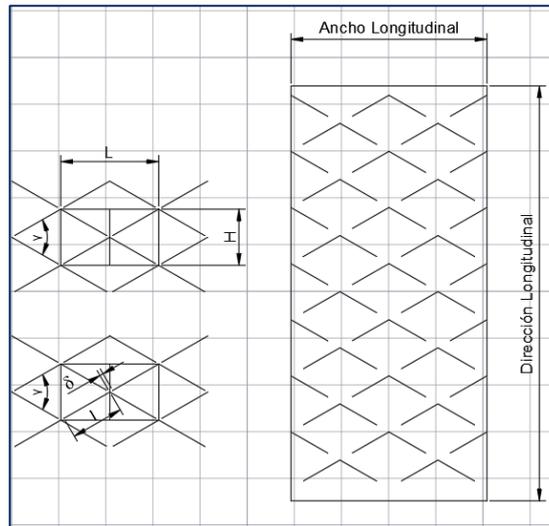


Figura 106. Parámetros de Celda Triangular [72].

Tabla XXIX
 TABLA DE PARÁMETROS, SÍMBOLOS Y UNIDADES DE CELDA TRIANGULAR

Parámetros	Símbolos	Unidades
Ancho de la celda	L	mm
Longitud de celda	H	mm
Ancho del corte	l	mm
Ancho de bisagra	δ	mm
Ángulo	γ	radianes, grados
Número de ciclos de patrón	n	-

Se debe recordar que la longitud direccional de las probetas de corte triangular se determina a partir de los parámetros establecidos en la norma ISO 527-3 para láminas con un espesor menor a 0.1 mm, donde la longitud total debe ser mayor o igual a 150 mm.

Definir las ecuaciones de L y H:

Básicamente nuestra red triangular está formada por triángulos rectángulos notable de 30° y 60° de la siguiente manera.

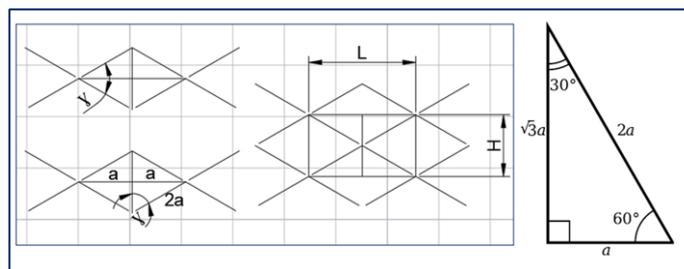


Figura 107. Valor del ángulo de la Celda Triangular [72].

Tabla XXX
 TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DE CELDA TRIANGULAR

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho del corte	l	12	mm
Ancho de bisagra	δ	3	mm
Ángulo	γ	60°	grados

Desarrollo:

La fórmula es:

$$H = 2l \sin(\gamma)$$

Sustituyendo los valores, tenemos:

$$H = 2(12) \sin(30) = 12 \text{ mm}$$

La fórmula es:

$$L = 2l \cos(\gamma)$$

Sustituyendo los valores, tenemos:

$$L = 2(12) \cos(30) = 20,78 \text{ mm}$$

Diseño de Celdas y Probetas Triangulares

Celda Triangular

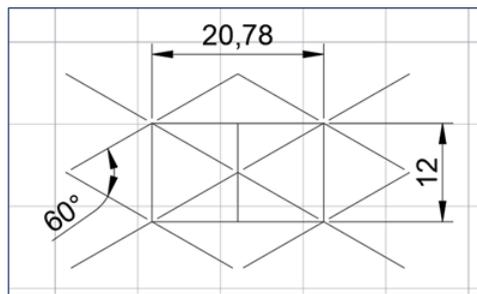


Figura 108. Valores de Celda Triangular [72].

Tabla XXXI
 VALORES DE LOS PARÁMETROS DE CELDA TRIANGULAR

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	L	20.78	mm
Longitud de celda	H	12	mm
Ancho del corte	l	12	mm
Ancho de bisagra	δ	3	mm
Ángulo	γ	30°	radianes

Probeta Triangular: Una celda

Este tipo de probeta fue diseñada con el propósito de visualizar la deformación que ocurre en la lámina durante las pruebas realizadas en una máquina de tracción. Esto es de gran utilidad para comparar los resultados obtenidos con los datos simulados mediante elementos finitos en SOLIDWORKS.

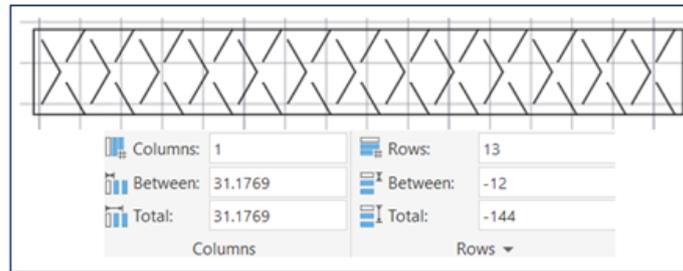


Figura 109. Configuración de matriz rectangular para Probeta Triangular: Una Celda [72].

Tabla XXXII

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRIANGULAR: UNA CELDA.

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	L	20.78	mm
Longitud de celda	H	12	mm
Ancho del corte	l	12	mm
Ancho de bisagra	δ	3	mm
Ángulo	γ	30°	radianes
Número de ciclos de patrón	n	13	-

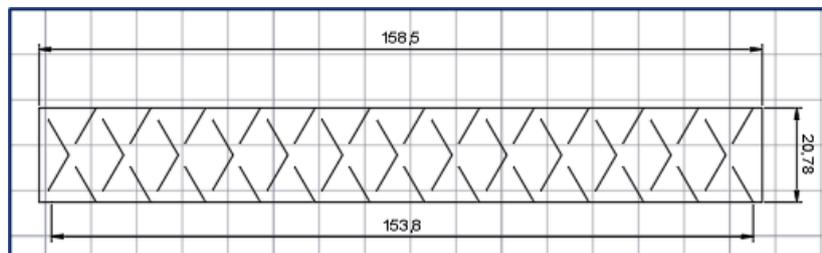


Figura 110. Probeta triangular medidas finales: Una Celda [72].

Tabla XXXIII

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRIANGULAR: UNA CELDA

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	72	mm
Tamaño del ciclo del patrón		151.5	
Dirección longitudinal		153.5	

Probeta Triangular: Dos celdas

La probeta triangular de esta dimensión se utilizó exclusivamente para simulación del diseño del corte en el material. Las dimensiones del corte no se emplearon en las pruebas reales donde se cortaron los patrones diseñados. Al repetirse las medidas en cada uno de los parámetros mencionados, las tablas que se presentarán a continuación solo mostrarán aquellos parámetros donde se observen cambios.

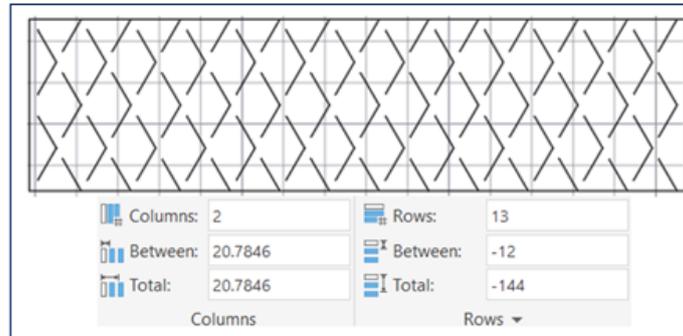


Figura 111. Configuración de matriz rectangular para Probeta Triangular: Dos Celdas [72].

Tabla XXXIV

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRIANGULAR:DOS CELDAS

Parámetros	Simbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	41.57	mm
Tamaño del ciclo del patrón		154.68	
Dirección longitudinal		158.5	

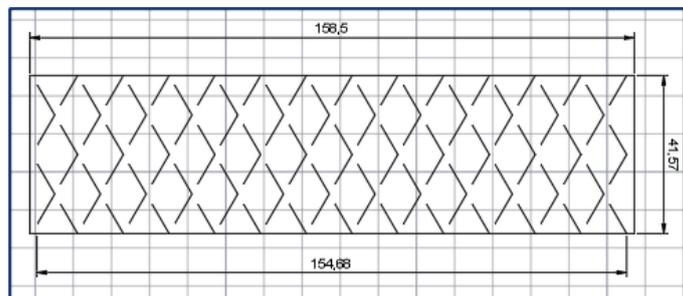


Figura 112. Probeta triangular medidas finales: Dos Celdas [72].

Probeta Triangular: Tres Celdas

Las probetas de 3 celdas x 13 cortes han sido diseñadas específicamente para evaluar la deformación en base al desplazamiento de puntos seleccionados previamente en las pruebas. Estas probetas permiten visualizar parámetros clave como la máxima fuerza aplicada, el máximo desplazamiento y la máxima deformación obtenida durante las pruebas. Son una herramienta efectiva y de vital importancia para obtener datos precisos y confiables sobre la deformación de los materiales bajo diferentes condiciones de carga.

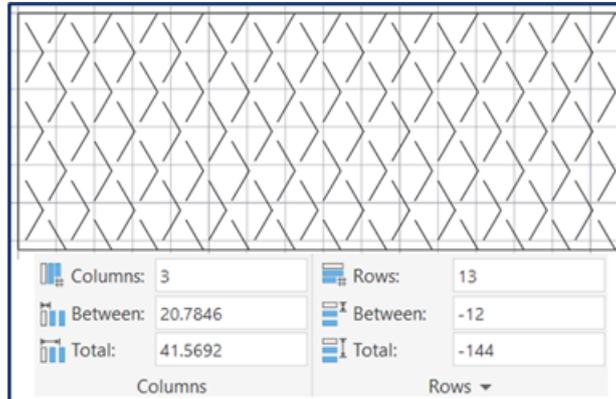


Figura 113. Configuración de matriz rectangular para Probeta Triangular: Tres Celda [72] .

Tabla XXXV

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRIANGULAR:TRES CELDAS

Parámetros	Simbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	62.36	mm
Tamaño del ciclo del patrón		154.41	
Dirección longitudinal		158.5	

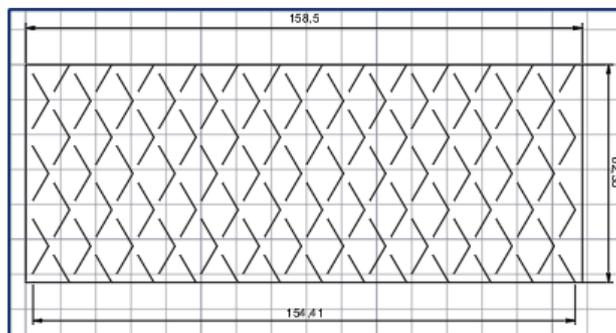


Figura 114. Probeta triangular medidas finales: Tres Celdas [72].

Piel de Recubrimiento del Actuador: Patrón Triangular

Columns:	6	Rows:	12
Between:	20.7846	Between:	-12
Total:	103.923	Total:	-132
Columns		Rows ▼	

Figura 115. Configuración de matriz rectangular para Piel de recubrimiento Triangular [72].

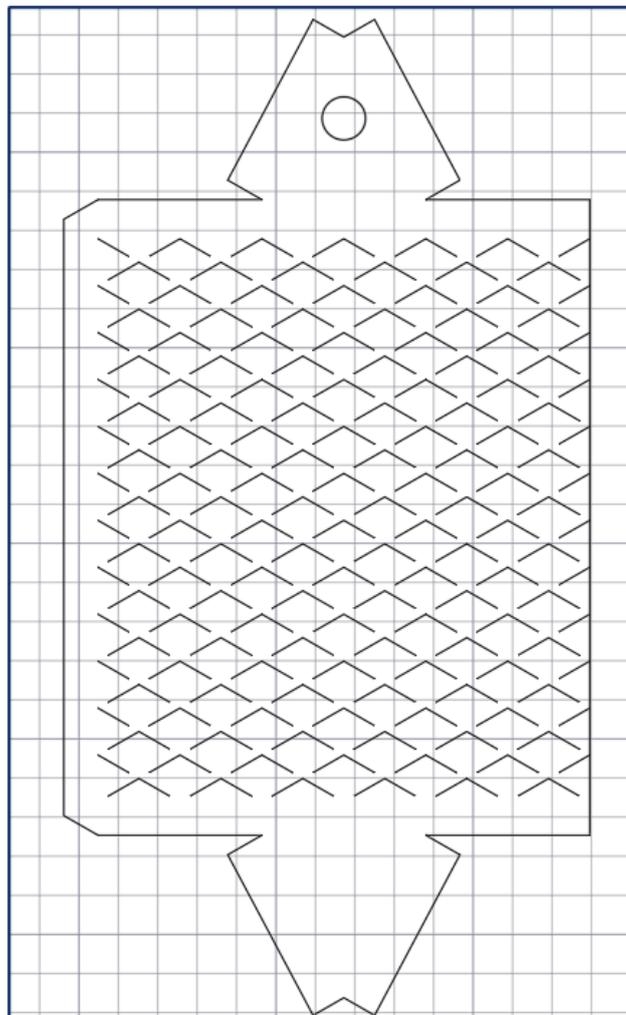


Figura 116. Piel de Recubrimiento Triangular [72].

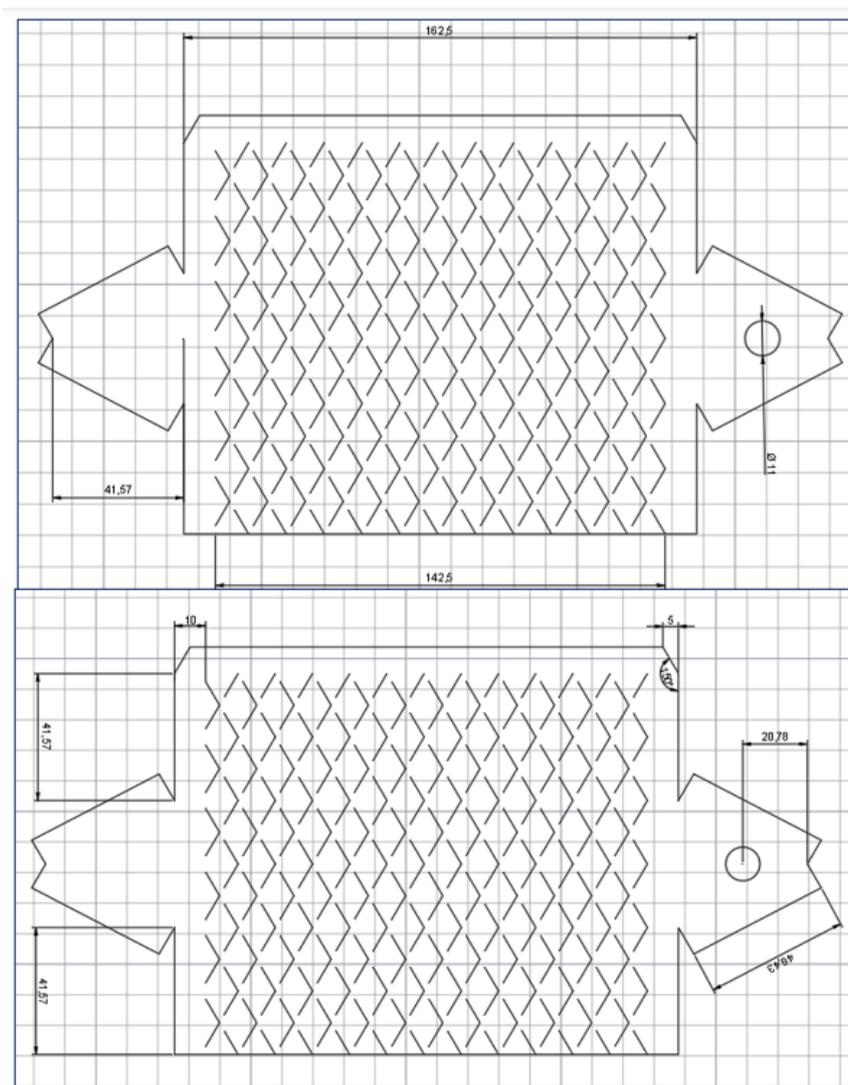


Figura 117. Medidas de Piel de Recubrimiento Triangular [72].

V-K3. Patrón Trapezoidal:

Se ha observado que la eficiencia de los rastreadores equipados con pieles de kirigami con propiedades de fricción anisotrópica (es decir, aquellas con cortes triangulares y trapezoidales) estuvo principalmente determinada por la capacidad de estiramiento de su piel. La piel con cortes trapezoidales demostró ser más estirable en comparación con las pieles con cortes circulares y triangulares, lo que permitió que el rastreador tuviera una zancada más larga y se moviera mayores distancias.

Definición de la estructura trapezoidal

Los diversos parámetros de dimensión que pueden describir una red triangular kirigami incluyen el ancho de corte l mm, el ángulo presente en la red γ [radianes, grados], la distancia de corte o ancho de bisagra δ mm, y número de ciclos de patrón n . Para determinar completamente el patrón trapezoidal se definen 4 puntos en la celda principal [71].

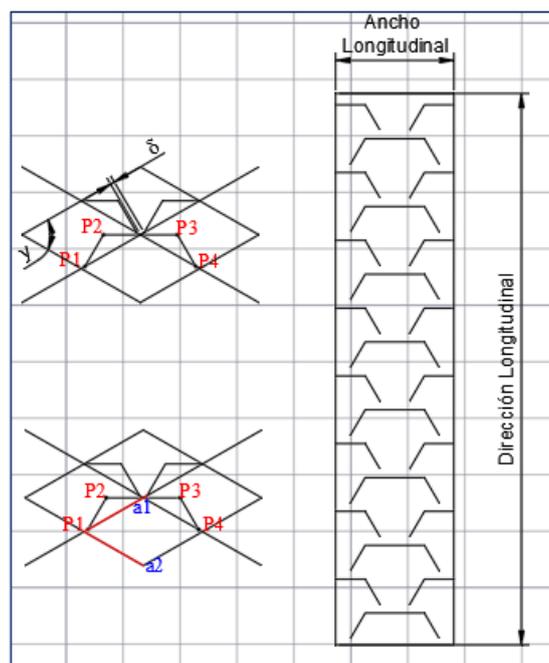


Figura 118. Parámetros de Celda Trapezoidal [73].

Tabla XXXVI

TABLA DE PARÁMETROS, SÍMBOLOS Y UNIDADES DE CELDA TRAPEZOIDAL

Parámetros	Símbolos	Unidades
Ancho de la celda	L	mm
Longitud de celda	H	mm
Ancho del corte	l	mm
Ancho de bisagra	δ	mm
Ángulo	γ	radianes, grados
Número de ciclos de patrón	n	-

Tabla XXXVII

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DE CELDA TRAPEZOIDAL

Parámetros	Símbolos	Valores	Unidades
Ancho del corte	l	12	mm
Ancho de bisagra	δ	3	mm
Ángulo	γ	60°	grados

Se debe recordar que la longitud direccional de las probetas de corte trapezoidal se determina a partir de los parámetros establecidos en la norma ISO 527-3 para láminas con un espesor menor a 0.1 mm, donde la longitud total debe ser mayor o igual a 150 mm, con relación con esta normativa y la definición previa de los parámetros según la celda lineal se puede establecer las siguientes medidas para las probetas de una, dos y tres celdas.

Ecuaciones de celda trapezoidal

Se utilizan las fórmulas de investigaciones anteriores que ya fueron validadas

$$a_1 = \left[l \cos \left(\frac{\pi}{6} \right), l \sin \left(\frac{\pi}{6} \right) \right]$$

$$a_2 = \left[l \cos \left(\frac{\pi}{6} \right), -l \sin \left(\frac{\pi}{6} \right) \right]$$

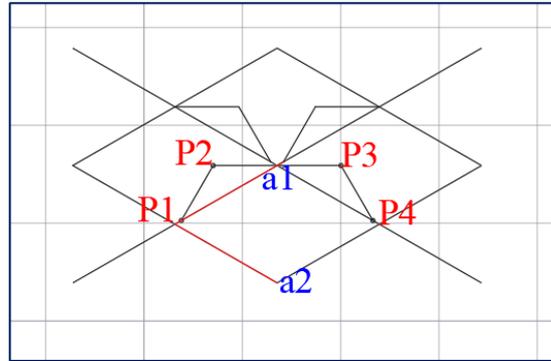


Figura 119. Celda Trapezoidal, Vectores a_1, a_2 [73].

Definir los 4 puntos de la celda Trapezoidales:

$$P_1 = \frac{a_1 \delta}{l}$$

$$P_2 = a_1 - \left[(l - \delta) \tan \left(\frac{\pi}{6} \right), 0 \right]$$

$$P_4 = a_1 + \left[(l - \delta) \tan \left(\frac{\pi}{6} \right), 0 \right]$$

$$P_5 = a_1 + a_2 \left(1 - \frac{\delta}{l} \right)$$

Desarrollo de las ecuaciones:

Punto#1

$$P_1 = \frac{a_1 \delta}{l}$$

$$a_{1x} = l \cos \left(\frac{\pi}{6} \right) = 12 \cos(30^\circ) = 10,39 \text{ mm}$$

$$P_{1x} = 12 \cos(30^\circ) \left(\frac{3}{12} \right) = 2,59 \text{ mm}$$

$$a_{1y} = l \sin \left(\frac{\pi}{6} \right) = 12 \sin(30^\circ) = 6 \text{ mm}$$

$$P_{1y} = 12 \sin(30^\circ) \left(\frac{3}{12} \right) = 1,5 \text{ mm}$$

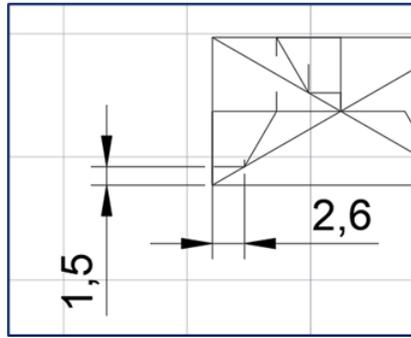


Figura 120. Celda Trapezoidal Punto#1 [74].

Punto#2

$$P_2 = a_1 - \left[(l - \delta) \tan\left(\frac{\pi}{6}\right), 0 \right]$$

$$P_2 = \left[12 \cos\left(\frac{\pi}{6}\right), 12 \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] - \left[9 \tan\left(\frac{\pi}{6}\right), 0 \right]$$

$$P_2 = [10,39; 6] - [5,19; 0]$$

$$P_{2x} = 5,2 \text{ mm}$$

$$P_{2y} = 6 \text{ mm}$$

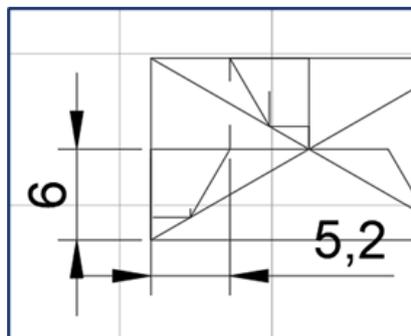


Figura 121. Celda Trapezoidal Punto#2 [74].

Punto#3

$$P_3 = a_1 + \left[(l - \delta) \tan\left(\frac{\pi}{6}\right), 0 \right]$$

$$P_3 = \left[12 \cos\left(\frac{\pi}{6}\right), 12 \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] + \left[9 \tan\left(\frac{\pi}{6}\right), 0 \right]$$

$$P_3 = [10,39; 6] + [5,19; 0]$$

$$P_{2x} = [15,59] \text{ mm}$$

$$P_{3y} = [6] \text{ mm}$$

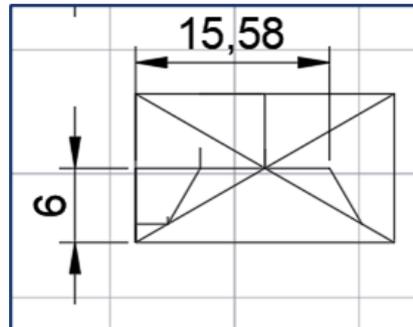


Figura 122. Celda Trapezoidal Punto#3 [74].

Punto#4

$$P_4 = a_1 + a_2 \left(1 - \frac{\delta}{l}\right)$$

$$P_4 = \left[12 \cos\left(\frac{\pi}{6}\right), 12 \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)\right] + \left[12 \cos\left(\frac{\pi}{6}\right), -12 \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)\right] [0,75]$$

$$P_{4x} = [10,39, 6] + [10,39, -6] \cdot [0,75] = 18,18 \text{ mm}$$

$$P_{4y} = [10,39, 6] + [10,39, -6] \cdot [0,75] = 1,5 \text{ mm}$$

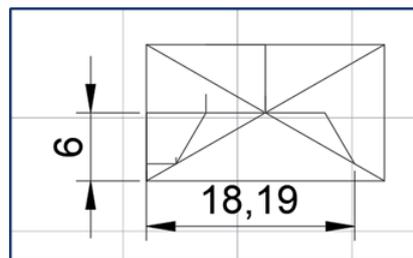


Figura 123. Celda Trapezoidal Punto#4 [74].

Probeta Trapezoidal: Una celda

Este tipo de probeta trapezoidal fue diseñada con el propósito de visualizar la deformación que ocurre en la lámina durante las pruebas realizadas en una máquina de tracción. Esto es de gran utilidad para comparar los resultados obtenidos con los datos simulados mediante elementos finitos en SOLIDWORKS.

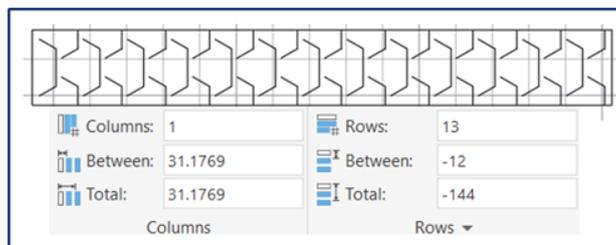


Figura 124. Configuración de matriz rectangular para Probeta Trapezoidal: Una Celda [58].

Tabla XXXVIII

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRAPEZOIDAL : UNA CELDA

Parámetros	Símbolos	Valores y Unidades
Ancho de la celda	L	20,78 mm
Longitud de celda	H	12 mm
Ancho del corte	l	12 mm
Ancho de bisagra	δ	3 mm
Numero de ciclos de patrón	n	13

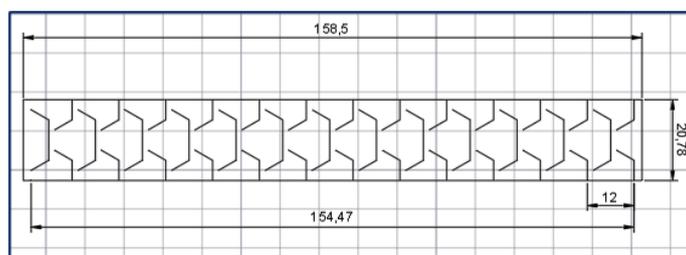


Figura 125. Probeta trapezoidal medidas finales: Una Celda [58].

Tabla XXXIX

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRAPEZOIDAL:UNA CELDA

Parámetros	Simbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	20.78	mm
Tamaño del ciclo del patrón		154.47	
Dirección longitudinal		158.5	

Probeta Trapezoidal: Dos celdas

La probeta trapezoidal de esta dimensión se utiliza para simular los cortes específicos en el material. No se emplea en pruebas reales, pero es importante para evaluar la deformación y obtener datos precisos de los materiales bajo diferentes condiciones de carga. Los cortes precisos y la configuración de la matriz rectangular permiten visualizar la deformación y comparar los resultados con simulaciones en SOLIDWORKS.

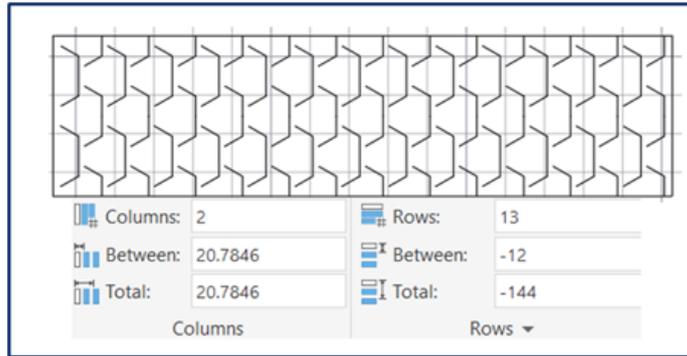


Figura 126. Configuración de matriz rectangular para Probeta Trapezoidal: Dos Celdas [58].

Tabla XL
TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRAPEZOIDAL:DOS CELDAS

Parámetros	Simbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	41.57	mm
Tamaño del ciclo del patrón		154.4	
Dirección longitudinal		158.5	

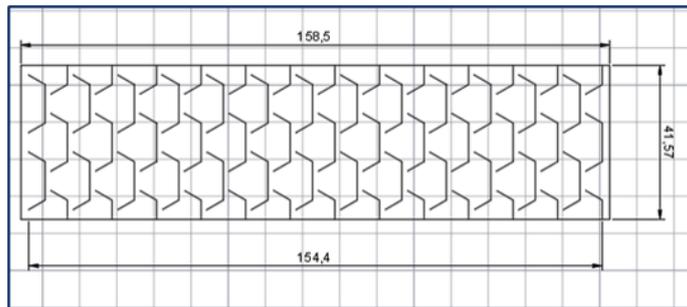


Figura 127. Probeta trapezoidal medidas finales: Dos Celdas. [58]

Probeta Trapezoidal: Tres Celdas

Las probetas de 3 celdas x 13 cortes en el diseño trapezoidal son una herramienta especializada que se utiliza para evaluar y medir la deformación en materiales durante pruebas de carga. Estas probetas permiten visualizar y analizar parámetros clave, como la fuerza aplicada, el desplazamiento y la deformación máxima alcanzada. Son una herramienta esencial para obtener datos precisos y confiables sobre el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de carga.

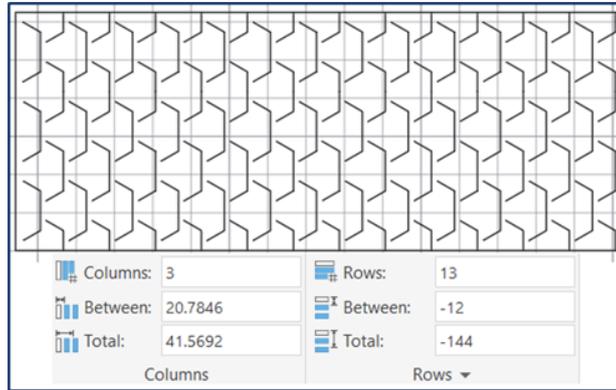


Figura 128. Configuración de matriz rectangular para Probeta Trapezoidal: Tres Celda [58].

Tabla XLI

TABLA DE PARÁMETROS Y VALORES DEL PATRÓN TRAPEZOIDAL:TRES CELDAS

Parámetros	Simbolos	Valores	Unidades
Ancho de la celda	w	62.35	mm
Tamaño del ciclo del patrón		154.33	
Dirección longitudinal		158.5	

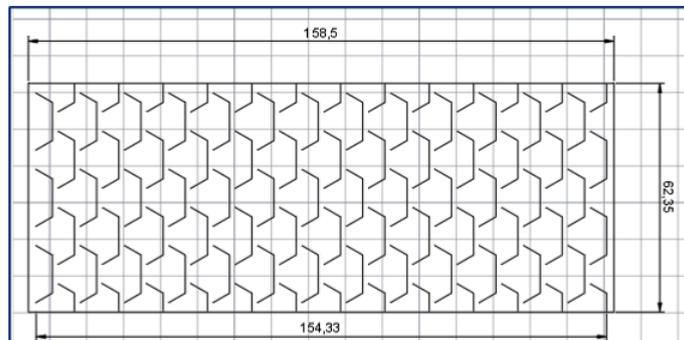


Figura 129. Probeta triangular medidas finales: Tres Celdas [58].

Piel de Recubrimiento del Actuador: Patrón Trapezoidal

Columns:	6	Rows:	12
Between:	20.7846	Between:	-12
Total:	103.923	Total:	-132
Columns		Rows ▼	

Figura 130. Configuración de matriz rectangular para Piel de recubrimiento Trapezoidal [58].

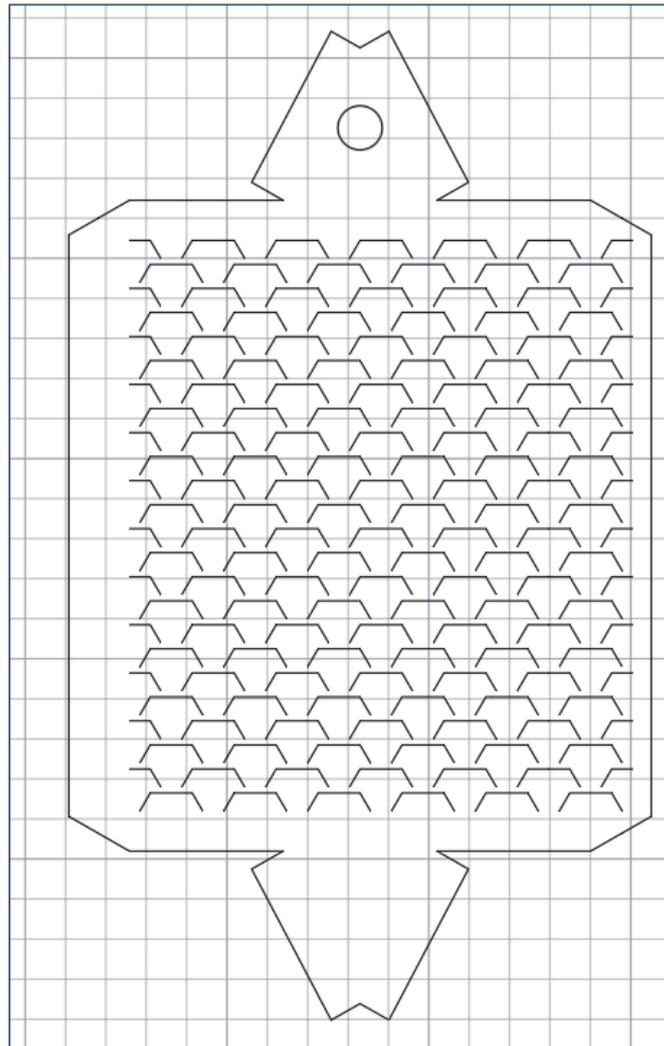


Figura 131. Piel de Recubrimiento Trapezoidal [58].

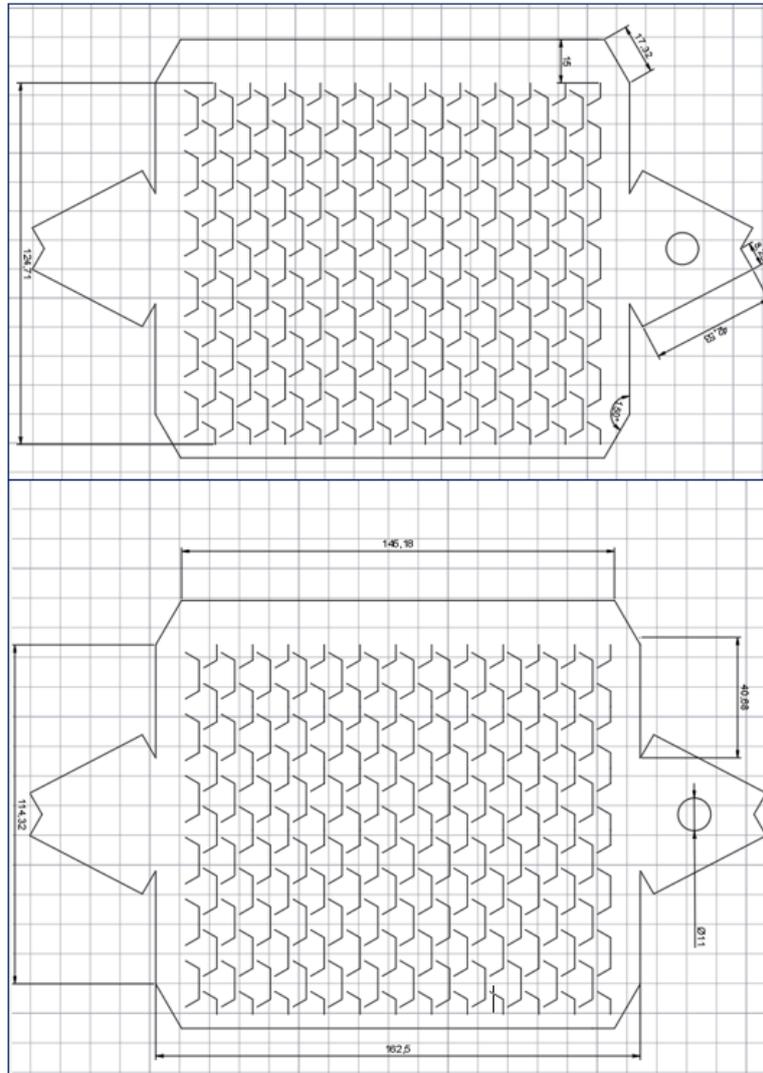


Figura 132. Medidas de Piel de Recubrimiento Trapezoidal [58].

V-L. Simulación de Elementos Finitos

La simulación de elementos finitos en SOLIDWORKS puede ser utilizada para analizar y comprender el comportamiento de materiales o láminas de poliéster de plástico. Esta herramienta permite modelar el material como una malla de elementos interconectados, lo que facilita el cálculo y visualización de tensiones, deformaciones y otros parámetros relevantes. Al simular diferentes condiciones de carga, es posible predecir cómo el material se deformará y responderá, lo que proporciona información valiosa sobre su rendimiento y capacidad para soportar fuerzas específicas. Esto ayuda a optimizar el diseño y asegurar la calidad y confiabilidad de los productos fabricados con estos materiales.

Láminas

Los patrones de corte de piel de Kirigami que se analizan en esta investigación se fabrican cortando con láser, en láminas de plástico de poliéster con un espesor $t = 0.002$ in o 0.05 mm, Módulo de Young $E = 4.33$ GPa y relación de Poisson $\nu = 0,4$.

- En la investigaciones [50], [71], utilizadas de referencia marcan las características que deben tener las láminas de poliéster con dimensiones de 10×20 in.



Figura 133. Probeta Sin Cortes SOLIDWORKS [75].

- Las características del material se obtienen mediante pruebas de tracción en una máquina de ensayo universal, ya que la empresa no proporciona los datos técnicos del material .

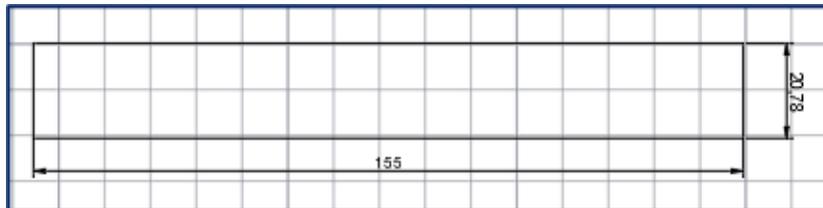


Figura 134. Probeta Sin Cortes [75].

V-L1. Procedimiento para la obtención de datos técnicos del material:

Prueba de Tracción

1. Se utiliza la probeta sin cortes que ha sido fabricada en una máquina láser, siguiendo las medidas previamente mencionadas. Estas medidas se basan en la norma ISO 527-3 para láminas con un espesor inferior a 0.1 mm. A continuación, se selecciona el espécimen de acuerdo a las siguientes especificaciones:

- Ancho: entre 10 mm y 25 mm.
- Espesor (h): ≤ 1 mm.
- Distancia inicial entre puños (L): $100 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$.
- Longitud total (l_3): ≥ 150 mm.

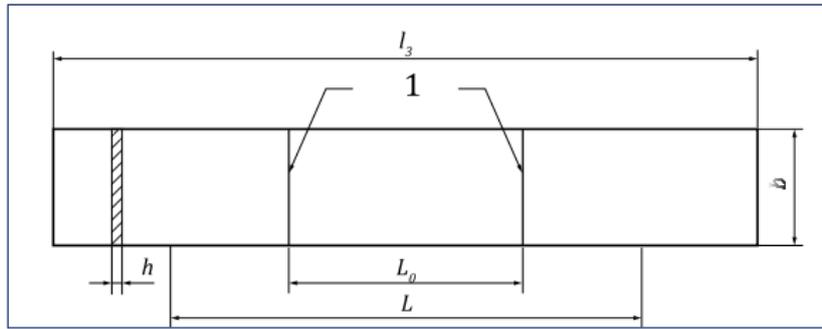


Figura 135. Dimensiones de Probetas de Norma ISO 527-3[76].

Es importante utilizar una probeta que cumpla con estas medidas para garantizar la precisión y fiabilidad de los resultados del ensayo.

2. Se adecua la máquina de ensayo universal para garantizar la correcta sujeción del material durante el ensayo. En pruebas anteriores, se ha observado que el material tiende a resbalar de las mordazas. Por lo tanto, se añaden placas pequeñas de metal planas entre las mordazas y el material para evitar que se suelte durante las pruebas. Además, se realiza una calibración de la distancia entre las marcas a 100 mm antes de llevar a cabo el ensayo.

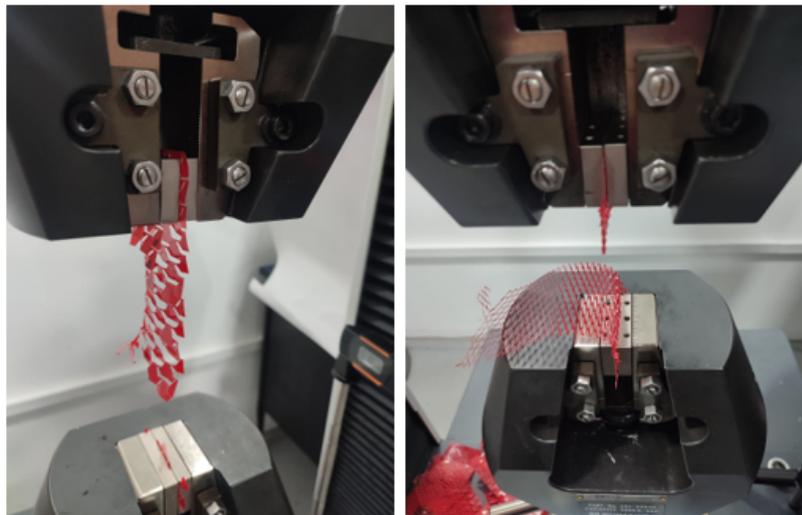


Figura 136. Se adecua la máquina de ensayo [77].

3. Colocar la probeta entre las placas mencionadas anteriormente, asegurarse de que las placas estén correctamente ubicadas entre las mordazas, ajustar la celda de carga antes de empezar el ensayo.

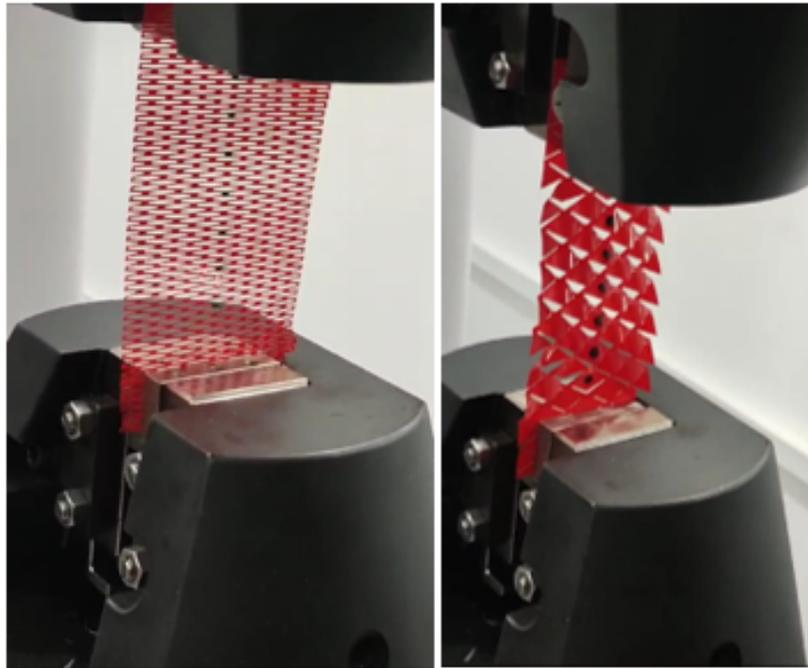


Figura 137. Se colocan las probetas entre las mordazas y se ajusta la celda de carga [77].

4. Cuando se utiliza una máquina para monitorear el ensayo, hay varios aspectos que se deben tener en cuenta durante la prueba.
 - Tipo de ensayo: En primer lugar, se debe seleccionar el tipo de ensayo específico que se va a realizar. Esto puede variar dependiendo del objetivo del ensayo y las propiedades del material que se está probando.
 - Velocidad del ensayo: En este caso, la velocidad de ensayo establecida es de 50 mm/min. Es importante asegurarse de que la máquina esté configurada correctamente para operar a esta velocidad durante todo el ensayo.
 - Características de la probeta: Antes de iniciar el ensayo, es necesario determinar y registrar todas las características relevantes de la probeta. Estas características incluyen el espesor del material utilizado en la probeta, el ancho de la probeta y la longitud calibrada de la misma. Estos datos son fundamentales para asegurar que se está probando una muestra adecuada y que los resultados obtenidos son válidos.
5. Se corroborará que todo esté de acuerdo a las indicaciones previas y se ejecutará el ensayo.

Especificaciones del Material

Se presentan los datos obtenidos en las pruebas de tracción:

Tabla XLII
PARÁMETROS DE PRUEBA DE TRACCIÓN

Velocidad	50 mm/min	Tipo de ensayo	Tracción
N de partidas	1	Forma	Plana
Modo de Ensayo	sencillo	N de muestras	1

Primera Prueba

CoPA				
Palabra llave	Trihezagonal 40%	Nombre de producto	CoPA	
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo		
Fecha de informe	8/2/2023	Fecha de ensayo	8/2/2023	
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion	
Velocidad	50mm/min	Forma	Plana	
Nºde partidas:	1	Nºde muestras:	1	

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	0.0500	20.7800	100.0000

Nombre Parametros	LE1_Fuerza	Rotura_Fuerza	M.Elastico Tension 0 – 20 N/mm2	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas
Unidad	N	Nivel(%/Max) 10	N/mm2	N
1_1	92.7448	3.14713	3486.68	139.427
Media	92.7448	3.14713	3486.68	139.427
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre Parametros	Max. Desplazamiento Calc. at Entire Areas	Rotura_Desplazamiento Nivel(%/Max) 10	EACS1_Desplazamiento Fuerza 1 N	LE1_Desplazamiento 0.2 %
Unidad	mm	mm	mm	mm
1_1	15.8013	16.5346	0.02046	2.85961
Media	15.8013	16.5346	0.02046	2.85961
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre Parametros	Agt_Fuerza
Unidad	N
1_1	138.903
Media	138.903
Desviacion Estandar	--
Rango	0.00000

Figura 138. Tabla de Prueba de Tracción para probeta sin cortes[78].

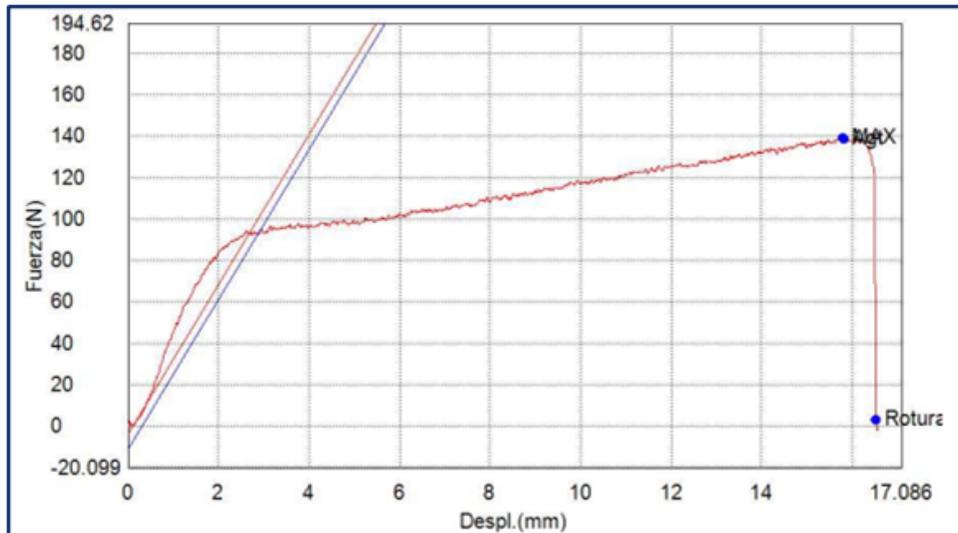


Figura 139. Gráfica Tabla de Prueba de Tracción para probeta sin cortes [78].

Los resultados obtenidos en la prueba de tracción permiten determinar las características del material, como el módulo de elasticidad (Modulo de Young), que se mencionan en los documentos de investigación. Estos resultados también proporcionan datos adicionales, como el límite elástico, que son necesarios para definir adecuadamente un material en SolidWorks.

Las características del material arrojadas por la prueba permiten realizar las siguientes afirmaciones:

Límite elástico:

$$89,26 \text{ N/mm}^2$$

Valores tomados de la tabla:

$$F : 92,74 \text{ N}$$

$$A = 0,05 \text{ mm} \times 20,78 \text{ mm} = 1,039 \text{ mm}^2$$

$$\phi : \frac{N}{F} : \frac{92,74 \text{ N}}{1,039 \text{ mm}^2} : 89,26 \text{ N/mm}^2$$

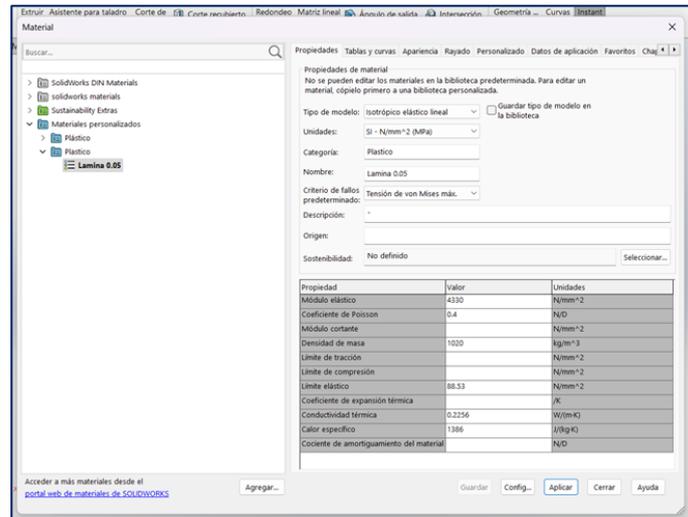


Figura 140. Se ingresan las características para definir el material [79].

Módulo de Young:

El valor obtenido es cercano al valor real 3.44 GPa presentado en las investigaciones seleccionadas.

M.Elastico
Tension 0 – 20
N/mm2
N/mm2
3486.68
3486.68

Figura 141. Módulo Elástico del Material[79].

Segunda Prueba

Para dar mayor certeza a las pruebas realizadas, se pueden realizar pruebas adicionales.

CoPA

Palabra llave	Trihexagonal 40%	Nombre de producto	CoPA
Nombre de archivo de ensayo		Nombre de metodo de ensayo	Polimeros.xmas
Fecha de informe	8/15/2023	Fecha de ensayo	8/15/2023
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	50mm/min	Forma	Plana
Nºde partidas:	1	Nºde muestras:	1

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidad	mm	mm	mm
1_1	0.0500	20.8000	100.0000

Nombre Parametros	LE1_Fuerza 0.2 %	Rotura_Fuerza Nivel(%/Max) 10	M.Elastico Tension 0 – 20 N/mm2	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas
Unidad	N	N	N/mm2	N
1_1	72.2885	-1.62125	4814.96	115.919
Media	72.2885	-1.62125	4814.96	115.919
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre Parametros	Max._Desplazamiento Calc. at Entire Areas	Rotura_Desplazamiento Nivel(%/Max) 10	EACS1_Desplazamiento Fuerza 1 N	LE1_Desplazamiento 0.2 %
Unidad	mm	mm	mm	mm
1_1	12.3180	12.4096	0.09684	1.72628
Media	12.3180	12.4096	0.09684	1.72628
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Nombre Parametros	Agt_Fuerza 0.2 %
Unidad	N
1_1	115.585
Media	115.585
Desviacion Estandar	--
Rango	0.00000

Figura 142. Tabla de Prueba de Tracción para probeta sin cortes [78].

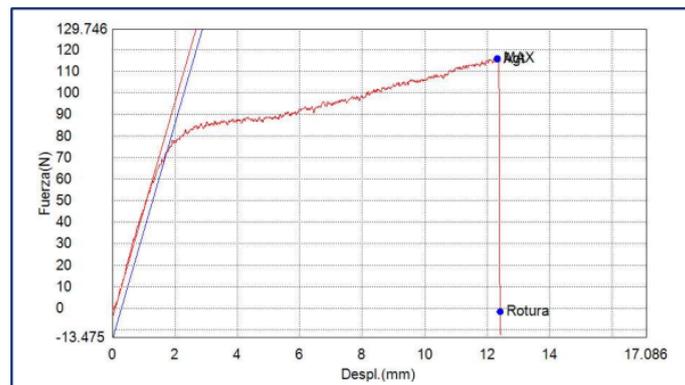


Figura 143. Gráfica de Prueba de Tracción para probeta sin cortes [78].

V-L2. Procedimiento de Simulación de Celdas y Probetas en FEM:

El procedimiento que se describe a continuación se debe repetir al momento de realizar el análisis de elementos finitos en celdas lineales, triangulares y trapezoidales, así como en probetas de una y tres celdas:

Simulación de FEM en Probeta Sin Corte en SolidWorks

1. Se define las características del material de la probeta.

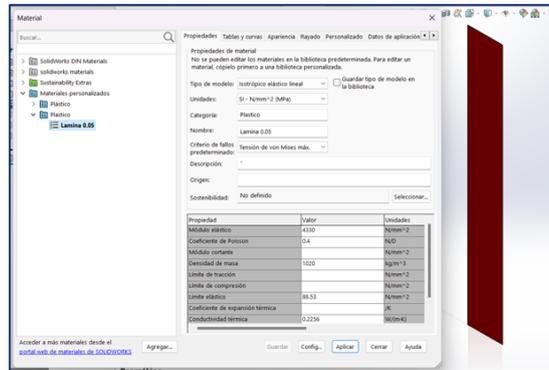


Figura 144. Ingreso de características del material en SOLIDWORKS[79].

2. Nos dirigimos a la pestaña simulación, seleccionamos la opción nuevo estudio, entre las opciones que se encuentran para la simulación, seleccionamos “Análisis Estático”. En relación con el análisis de elementos finitos, ofrece varias opciones para simular las condiciones más cercanas a la vida real de acuerdo con el uso del material y se pueden realizar pruebas adicionales para aumentar la certeza de los resultados obtenidos.

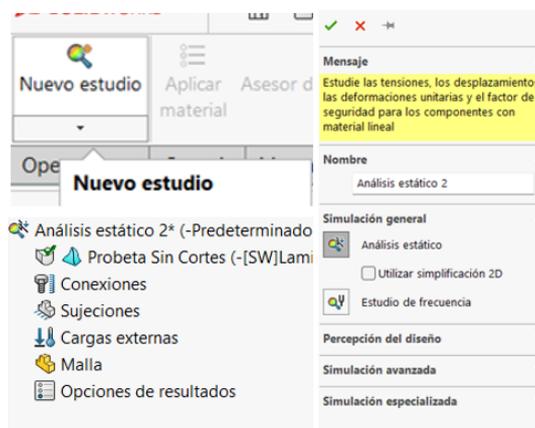


Figura 145. Proceso de nuevo Estudio de Simulación [79].

3. Primera Configuración: Sujeciones

En esta sección se define como geometría fija de la probeta la cara 1, luego se selecciona las caras donde se ejerce la fuerza externa.

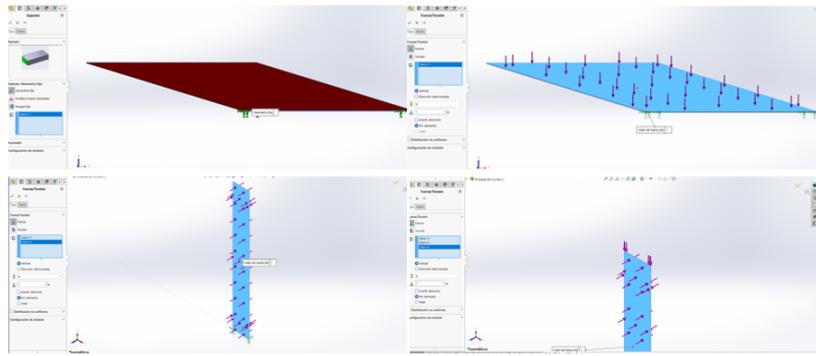


Figura 146. Configuración: Sujeciones, se ejerce la fuerza externa en las caras de la probeta [79].

Se define la dirección y la magnitud (100N) de las fuerzas aplicadas. Luego, se selecciona la opción "total", lo cual indica que las fuerzas se distribuyen en toda la probeta en cada una de las caras seleccionadas. Después de eso, se procede a crear la malla automáticamente y se ejecuta la simulación. Esto permite obtener resultados sobre la distribución de las fuerzas en la probeta y su comportamiento bajo carga.

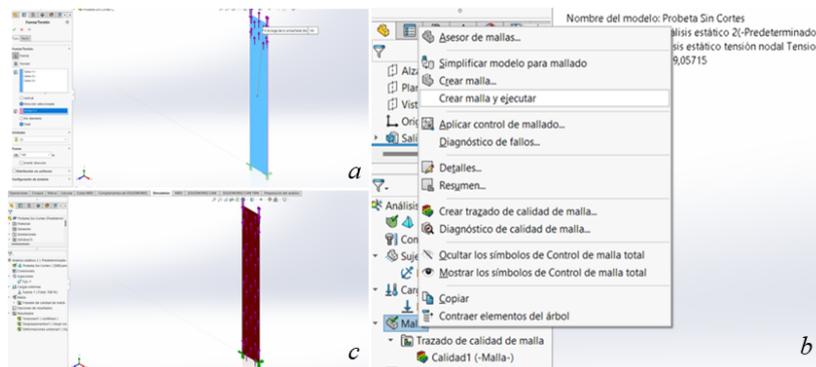


Figura 147. (a) Configuración de aplicación de Fuerzas. (b) Diseño de malla. (c) Ejecución de la simulación [79].

V-M. Máquina de corte laser

Información del uso de la máquina:

La cortadora laser R500 se ocupó para los cortes de los diversos patrones kirigami. Los cortes se realizaron en el material de plástico de poliéster.



Figura 148. Máquina de corte laser R500 [80].

Informacion del material

- Boquilla del láser: Este diseño ha sido realizado en base a las medidas del laser que es de 3mm.
- Material: Plastico de poliester
- Espesor del material: 0.05mm

Configuracion-Potencia



Figura 149. Potencia de 60W [80].

Parámetros

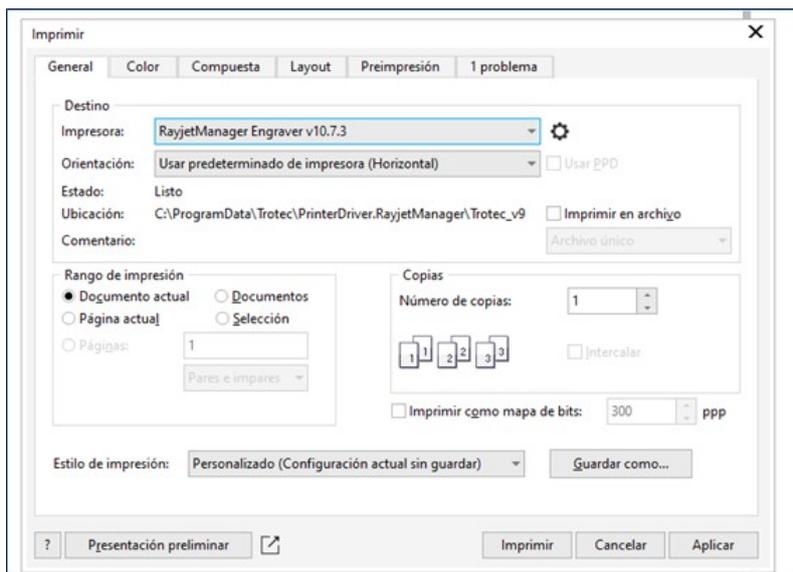


Figura 150. Selección de documento [80].

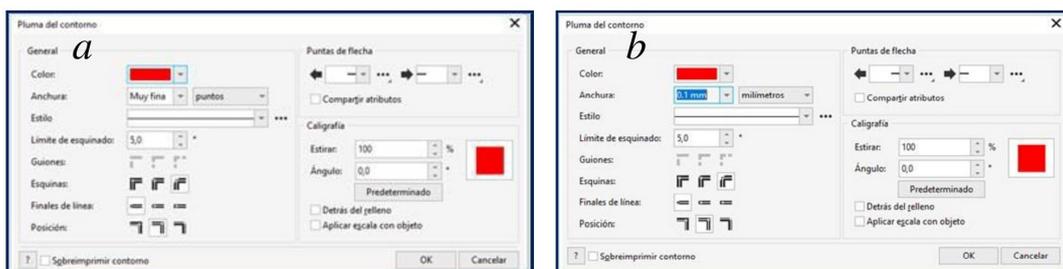


Figura 151. (a) Selección de líneas. (b) Lámina de grosor de 0.05mm [80].

Cortes

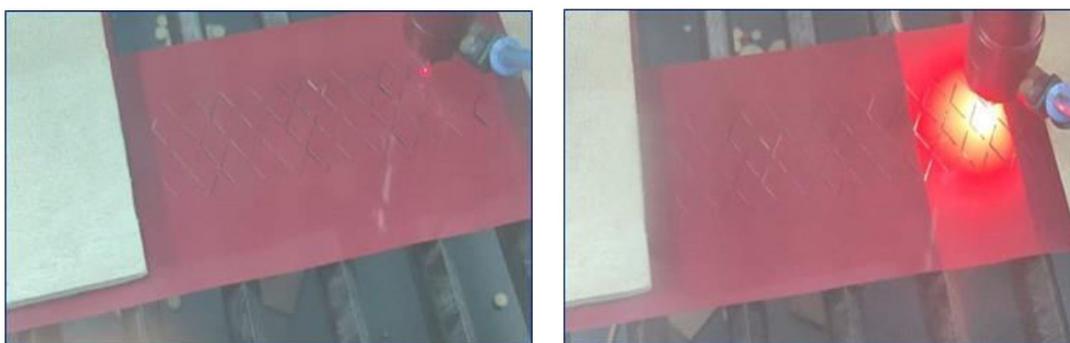


Figura 152. Corte de patrón triangular primeras celdas [80].

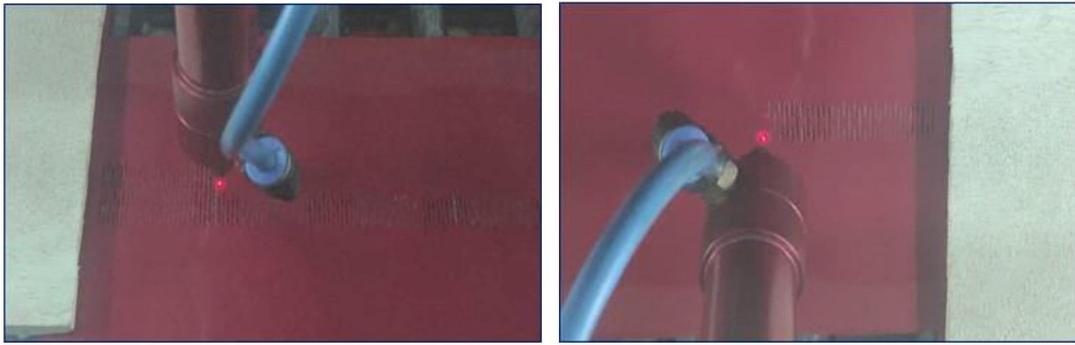


Figura 153. Corte de patrón lineal [80].

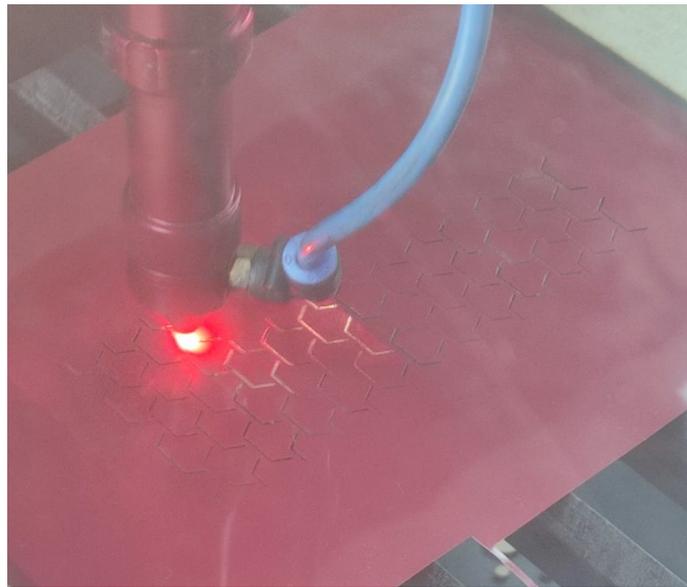


Figura 154. Corte de patrón Trapezoidal [80].

Durante el desarrollo de esta investigación, se llevó a cabo la fabricación de una serie de probetas con geometrías triangulares, lineales y trapezoidales utilizando una máquina de corte láser de alta precisión. Esta etapa de la investigación buscaba obtener un conjunto diverso de probetas que representara diferentes patrones y configuraciones geométricas, con el objetivo de realizar ensayos de tracción y analizar las respuestas mecánicas correspondientes.

Para la generación de las probetas triangulares, lineales y trapezoidales, se utilizaron láminas de material polimérico con propiedades mecánicas adecuadas para representar el comportamiento de materiales similares a los que se esperaban en la aplicación final. Las dimensiones y patrones geométricos de las probetas se establecieron de acuerdo con las especificaciones de diseño y se programaron en la máquina de corte láser para garantizar una alta precisión en el proceso de corte.

El proceso de corte láser permitió obtener probetas con bordes y geometrías muy definidos, lo que aseguró la reproducibilidad y la uniformidad en las muestras fabricadas. La máquina de corte láser permitió realizar cortes limpios y precisos, lo que resultó en probetas de alta calidad con bordes libres de imperfecciones que podrían afectar los resultados de los ensayos de tracción.

Cada conjunto de probetas se fabricó siguiendo un protocolo establecido, que incluía la preparación y carga del material en la máquina de corte láser, la configuración de los parámetros de corte según las especificaciones. Se

realizó una inspección visual para verificar la integridad de las probetas y se descartaron aquellas que presentaban defectos evidentes.

La fabricación de estas probetas mediante la máquina de corte láser proporcionó un proceso eficiente y controlado para obtener muestras con geometrías específicas y dimensiones precisas. Estas probetas se utilizaron posteriormente en los ensayos de tracción para evaluar sus propiedades mecánicas y generar datos valiosos para el análisis y la comparación entre los diferentes patrones y configuraciones geométricas.

V-N. Montaje de la piel Kirigami

En el proceso de ensamblaje de los patrones de piel de kirigami, se recurre al uso de una cinta de doble cara de dimensión 5 metrosx12mm, con el fin de lograr una unión eficiente y duradera. El proceso de ensamblaje se compone de diversas etapas que garantizan la integridad y funcionalidad del resultado final.

1. Se realizan los cortes en el programa AutoCAD.
2. En primera instancia, el procedimiento se inicia al situar la lámina de plástico de poliéster que corresponde al patrón deseado. Esta lámina es acompañada por dos tapas triangulares que poseen pequeños bordes largos. Estos bordes rodean el área triangular del patrón y se disponen de tal manera que puedan unirse posteriormente. La conexión de estos bordes asegura que envuelvan el actuador de manera adecuada. Con el propósito de facilitar la operación del actuador, se crea una abertura circular en la tapa trasera, permitiendo el paso fluido del tubo de entrada sin obstáculos.
3. Una vez realizado el corte preciso de los patrones de piel kirigami, el siguiente paso consiste en el ensamblaje de estos patrones junto al actuador. La inserción del tubo de entrada se efectúa a través de la abertura circular en la tapa trasera. A continuación, se aplica cinta de doble cara en los pliegues generados por el patrón de kirigami. Esto se realiza con el propósito de asegurar una unión sólida y sellada entre los patrones y el actuador. Es importante destacar que en esta etapa del proceso no se requiere el uso de pegamento, sino que se emplea exclusivamente la cinta de doble cara.

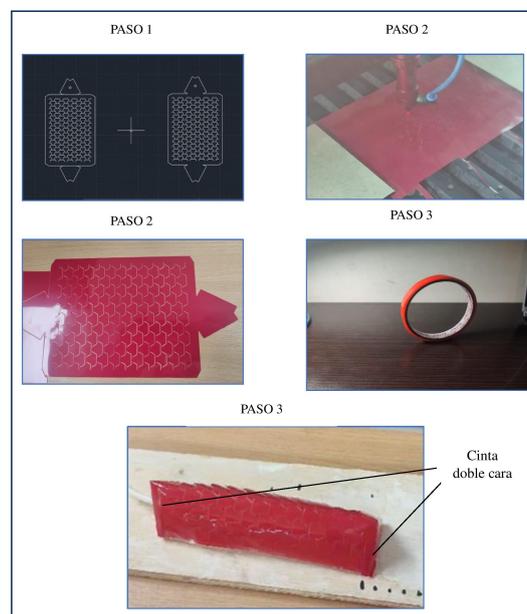


Figura 155. Recubrimiento de piel Kirigami [81]

Este enfoque de ensamblaje se ejecuta con precisión y atención meticulosa, dado que garantiza no solo la adecuada unión entre los componentes, sino también la correcta funcionalidad del actuador una vez ensamblado.

La utilización de la cinta de doble cara en lugar de pegamento asegura una conexión fiable sin riesgos de afectar negativamente la estructura o las propiedades del material. Con esta metodología de ensamblaje, se busca lograr un resultado coherente y de alta calidad que cumpla con los estándares de rendimiento requeridos en la aplicación del actuador kirigami

V-Ñ. *Procedimiento del circuito*

Materiales utilizados en el Proceso Evolutivo: Desde la Prueba hasta el Circuito Final

Componente	Información
Microbomba de aire	Marca: Skocoom -DC 3V/6V SC3101PM- Corriente nominal <350mA <150mA- Peso: 6.5g6.5g
Microbomba de aire.	Marca: Aimeliae- DC 3V Corriente nominal <350mA <200mA- Peso: 6.5g
Microválvula solenoide	3 vías normalmente abierta DC3.7V- corriente 280mA- Peso: 9g
Modulo Bluetooth:	HC-05 Maestro-Esclavo
Microcontrolador:	Arduino Nano ATmega 328
MOSFET	IRF540
TIP	122
Batería	3s de 11,1v 75c 650mah
Batería	3.7v
Leds	Rojo, verde y azul
Material adicional	
Baquelitas	
Cable TPU	
Jumpers	
Switch	
Conectores para batería	

En esta sección, se detallará el procedimiento para la implementación de un circuito neumático con un sistema de alimentación diseñado con el propósito de lograr el desplazamiento independiente del mecanismo. El objetivo central es establecer un enfoque sistemático y claro para la creación y optimización del circuito, permitiendo el control preciso y coordinado de los actuadores neumáticos. A lo largo de esta sección, se presentarán los pasos esenciales, desde el concepto inicial hasta la versión final del circuito.

La premisa fundamental de este concepto es aprovechar las propiedades del aire comprimido para generar fuerzas y movimientos precisos. El sistema de alimentación se concibe para suministrar el aire necesario en momentos estratégicos, coordinando el inflado y desinflado de los actuadores de manera independiente. Esto permite la creación de movimientos específicos en el mecanismo, contribuyendo a la versatilidad y aplicabilidad del diseño. El enfoque en el desplazamiento independiente es esencial para lograr una mayor precisión y flexibilidad en el control del sistema.

V-Ñ1. *Diseño de circuito:*

Concepto preliminar- Encendido y apagado de led con pulsadores

Este proceso, se aborda la implementación de una secuencia de encendido y apagado específica de los leds, utilizando dos pulsadores para controlar dicha secuencia, el objetivo central es lograr que, al accionar uno de los pulsadores, el led#1 se encienda mientras que el led#2 permanece apagado, posteriormente, al liberar el pulsador, el led#1 se apague y simultáneamente el led#2 se encienda, creando una secuencia intercalada y controlada. Del mismo modo, al presionar el segundo pulsador, esta secuencia se invierte, ofreciendo una interacción dinámica con los leds.

Para empezar, se realiza el montaje físico del circuito. Se emplea un Arduino como el controlador central, y se interconectan dos LEDs en una protoboard. Además, se incorporan dos pulsadores momentáneos para interactuar con los LEDs y controlar la secuencia. Se implementan resistencias adecuadas para evitar fluctuaciones en los pines de los pulsadores, asegurando una detección estable de su estado.

La programación del Arduino juega un papel fundamental para coordinar la secuencia deseada. En el entorno de desarrollo Arduino IDE, se escribe un programa que regula el funcionamiento de los LEDs y la respuesta a los pulsadores. Se definen variables que asignan números de pines específicos para los LEDs y los pulsadores, estableciendo una comunicación efectiva con el hardware. La lógica del programa se encuentra en la función loop(), donde se utiliza la función digitalRead() para verificar el estado de los pulsadores y digitalWrite() para controlar los LEDs.

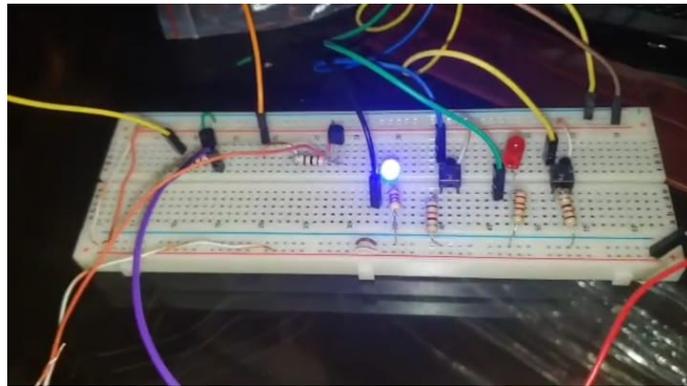


Figura 156. Circuito con pulsadores [82].

Dentro de la lógica del programa, se establece una secuencia que permite el encendido y apagado intercalado de los LEDs. Al presionar uno de los pulsadores (Pulsador #1), el LED #1 se enciende y el LED #2 permanece apagado. Una vez que se suelta el pulsador, el LED #1 se apaga y el LED #2 se enciende, completando la primera parte de la secuencia. Asimismo, al accionar el segundo pulsador (Pulsador #2), la secuencia se invierte: el LED #2 se enciende mientras que el LED #1 se mantiene apagado.

Con el programa cargado en el Arduino, se puede observar cómo los LEDs responden a las acciones de los pulsadores. La secuencia de encendido y apagado intercalado se desarrolla según la lógica programada, ofreciendo una experiencia visual atractiva y controlada. Para ajustar la velocidad de la secuencia, se pueden modificar los valores en la función delay(), permitiendo personalizar la dinámica de visualización.

En resumen, este procedimiento aborda la implementación de una secuencia de encendido y apagado de LEDs mediante la interacción de pulsadores. La programación y el montaje del circuito permiten el control de la secuencia deseada, generando un efecto visual interactivo que puede ser aplicado en diversos contextos y proyectos electrónicos.

Primer diseño

- Power off, puerto 1 y puerto 3 abierto, puerto 2 cerrado.
- Power on, puerto 1 y puerto 2 abierto, puerto 3 cerrado.

Con Microbomba Skoocom y Microválvula solenoide.



Figura 157. Comprobación de vías [82].

En esta etapa se llevó a cabo la primera prueba del diseño neumático con un sistema de alimentación destinado a lograr el desplazamiento independiente de un mecanismo. El objetivo de esta prueba era evaluar la viabilidad y la funcionalidad del sistema, utilizando dos pulsadores, una microbomba y una microválvula solenoide controlados por un Arduino nano.

En el proceso inicial de desarrollo, se llevó a cabo el montaje de un circuito provisional para establecer la interacción entre los componentes clave. El Arduino Nano se conectó a una fuente de alimentación y se utilizó una protoboard para organizar eficazmente los elementos. Se incorporaron dos pulsadores momentáneos que se conectaron a los pines digitales del Arduino, permitiendo la detección de sus activaciones y, por ende, el seguimiento del estado de inflado y desinflado. Además, se implementó una microbomba para suministrar el aire requerido por los actuadores neumáticos y una microválvula solenoide para controlar el flujo de aire hacia dichos actuadores, ambos conectados a los pines digitales del Arduino junto con un Mosfet. Se consideró una fuente de alimentación de 3.7 voltios para la válvula solenoide, mientras que el Arduino Nano se conectó a una computadora para recibir el voltaje necesario.

Posteriormente, se procedió a cargar un programa preliminar en el Arduino Nano para iniciar las pruebas. El programa se enfocó en la lectura de los estados de los pulsadores y en el control básico de la microbomba y la microválvula solenoide. Esta etapa permitió verificar la respuesta de los componentes a las instrucciones del Arduino. Se realizaron pruebas adicionales presionando los pulsadores en diversas combinaciones, lo que resultó en el inflado y desinflado de los actuadores neumáticos. Sin embargo, se observaron problemas de coordinación y control de tiempo insuficiente en esta fase inicial.

En conclusión, la primera prueba del diseño neumático con el sistema de alimentación proporcionó información esencial sobre el funcionamiento básico de los componentes. Se identificaron áreas de mejora, como la necesidad de incorporar comunicación Bluetooth para lograr un control más preciso y coordinado, así como la posibilidad de programar secuencias de movimiento personalizadas. Estos ajustes serán fundamentales en las futuras iteraciones del diseño neumático con sistema de alimentación.

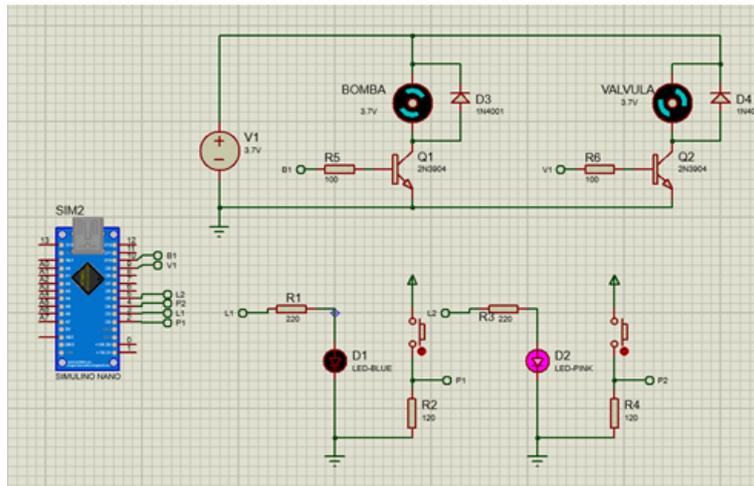


Figura 158. Circuito en el programa Proteus[83].

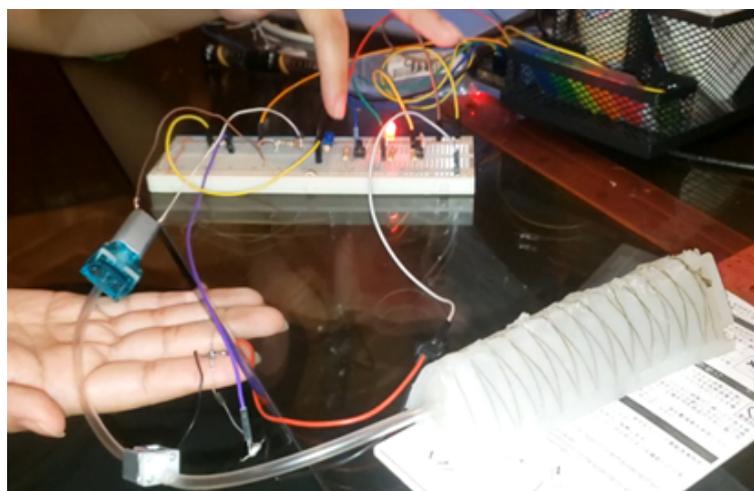


Figura 159. Primer diseño de inflado y desinflado [83].

Un punto de relevancia crucial en este estudio radica en el uso del actuador, el cual se empleó con fines de prueba y no en su tamaño real. Este enfoque fue deliberadamente adoptado para explicar el propósito detrás de esta elección, como la validación del concepto, la exploración de la viabilidad, etc. A pesar de la escala reducida, los resultados obtenidos en este entorno proporcionaron información valiosa y corroboraron la factibilidad del diseño y el sistema propuesto. Es importante destacar que el uso de un actuador a escala de prueba no afectó la integridad de los procesos ni la validez de los datos recopilados, dado que el enfoque principal se centró en mencionar la finalidad específica del uso de este actuador en el contexto del estudio.

Una acotación significativa es que la comprobación de vías de la válvula y la bomba se la realizó con una Microbomba Skoocom y una Microválvula solenoide, mientras que el control del flujo de aire mediante dos pulsadores se lo realizó con una Microbomba Aimeliae y Microválvula solenoide.

Diseño final

Este procedimiento se centra en la implementación de un circuito de inflado y desinflado con tiempos controlados, utilizando una combinación de componentes electrónicos y un Arduino Nano. El objetivo principal es lograr la automatización precisa de este proceso, permitiendo el inflado y desinflado coordinado y controlado de un sistema neumático.

La microválvula solenoide y la microbomba se conectan en paralelo en el sistema neumático. La microbomba, esencial para el inflado, se alimenta desde el regulador de voltaje LM2596, que a su vez está conectado tanto a la batería como a la protoboard. El LM2596 se configura y regula a 5V, proporcionando una fuente de energía estable para los componentes. Se utilizan un MOSFET (IRF540) y un TIP 122 para el control de la microválvula y la microbomba, respectivamente, permitiendo manejar las corrientes y tensiones requeridas.

Una vez que la configuración física está en su lugar, se procede a la programación del Arduino Nano. Aquí, se establecen los valores de tiempo para el inflado y desinflado deseado. El Arduino actúa como el cerebro del sistema, coordinando la apertura y cierre de la microválvula y el encendido y apagado de la microbomba según los intervalos predefinidos.

La integración del módulo Bluetooth HC-05 agrega un nivel de control remoto y personalización al circuito. Se configura el módulo para permitir la comunicación con un dispositivo móvil. Esto ofrece la capacidad de ajustar los tiempos de inflado y desinflado de manera remota, lo que proporciona flexibilidad y adaptación a diferentes escenarios.

Se realizan pruebas para observar cómo el sistema coordina el inflado y desinflado según los tiempos definidos. Es posible que se requieran ajustes para lograr la sincronización precisa entre la microválvula y la microbomba. Estos ajustes se realizan de manera iterativa hasta que el circuito funcione de manera óptima, logrando un proceso coordinado y controlado.

En resumen, este procedimiento aborda la creación de un circuito de inflado y desinflado con tiempos controlados, utilizando componentes como la microválvula solenoide, la microbomba, el regulador LM2596, el MOSFET (IRF540), el TIP 122, el módulo Bluetooth HC-05 y el Arduino Nano. La combinación de programación, integración de módulos y pruebas iterativas asegura la eficacia y precisión del proceso, con aplicaciones potenciales en una variedad de contextos que requieren inflado y desinflado precisos y coordinados.

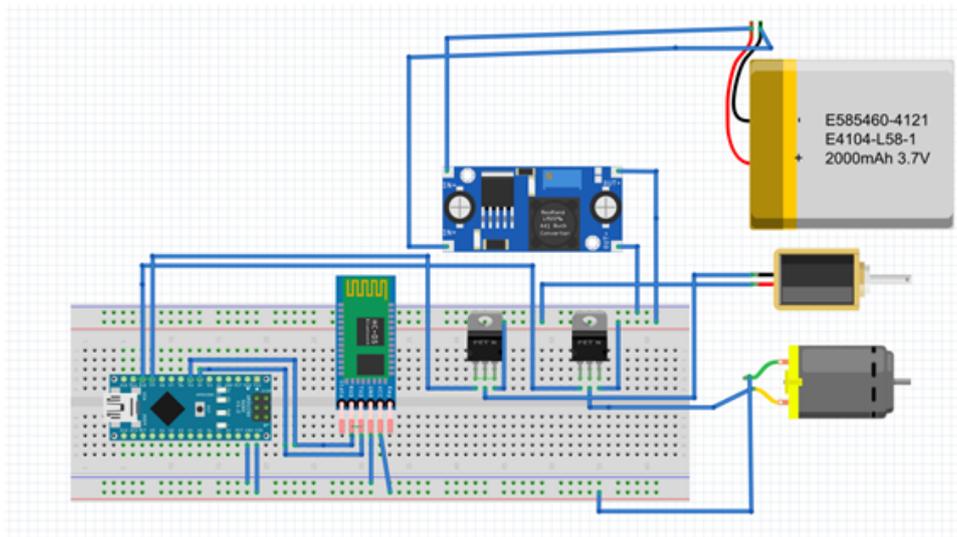


Figura 160. Circuito en el programa Fritzing [83].

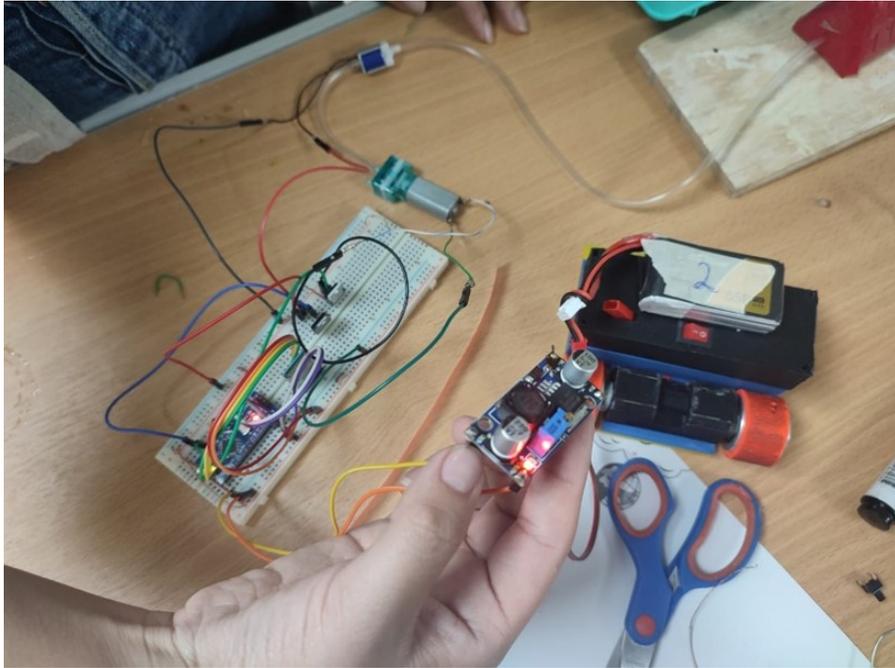


Figura 161. Circuito con el modulo bluetooth [83].

VI. RESULTADOS

La sección de resultados de este estudio se adentra en los aspectos fundamentales de la implementación y desarrollo del sistema propuesto. Aquí, se presentarán detalladamente los moldes impresos en 3D que sirvieron como base para la creación de los actuadores suaves. Además, se examinará cómo los cortes de patrones kirigami, que actúan como una piel que recubre los actuadores, influyen en su comportamiento y rendimiento. Asimismo, se analizará el circuito final que controla su funcionamiento. Estos elementos clave son fundamentales para comprender la efectividad y el rendimiento del sistema en su conjunto. A lo largo de esta sección, se ofrecerá una visión completa de los resultados obtenidos en el proceso de diseño y construcción, proporcionando una base sólida para la discusión y las conclusiones posteriores.

VI-A. Impresión de Piezas finales

En el conjunto de componentes fabricados mediante impresión 3D, se destacan elementos fundamentales que contribuyen a la estructura y funcionalidad de los actuadores suaves. Entre estas piezas, se encuentra el "lateral grueso", que proporciona estabilidad y soporte al sistema, la "varilla", que se diferencia al estar fabricada en material ABS y presenta un canal de aire vacío triangular en su interior, ofreciendo resistencia, rigidez y la posibilidad de transportar aire cuando es necesario. La "base" sirve como la plataforma de montaje para el conjunto, mientras que el "tornillo", la "tuerca" y la "arandela" desempeñan un papel crucial en la unión y ajuste de los componentes. La utilización de material TPU en la mayoría de estas piezas garantiza su flexibilidad y capacidad para adaptarse a las deformaciones generadas durante el funcionamiento de los actuadores. La selección y diseño de estas piezas se realiza cuidadosamente para garantizar la integridad y el rendimiento del sistema en su conjunto.

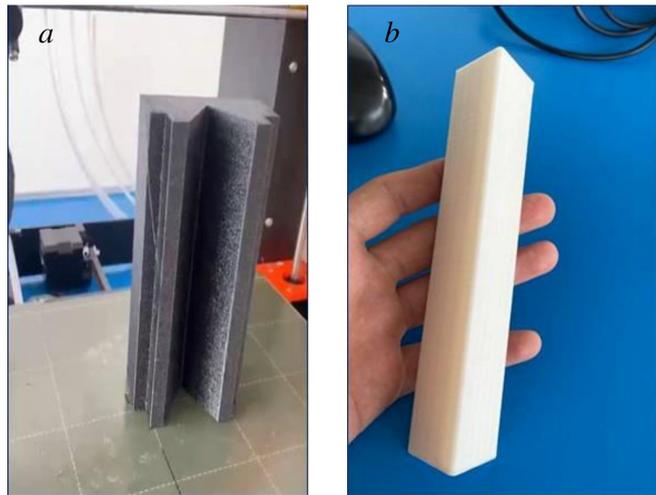


Figura 162. (a) Impresión del lateral grueso. (b) Varilla final. [84].

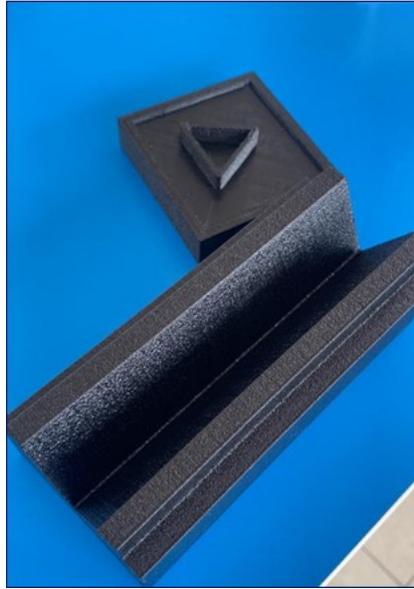


Figura 163. Lateral grueso y base final [84].



Figura 164. Piezas finales [84].

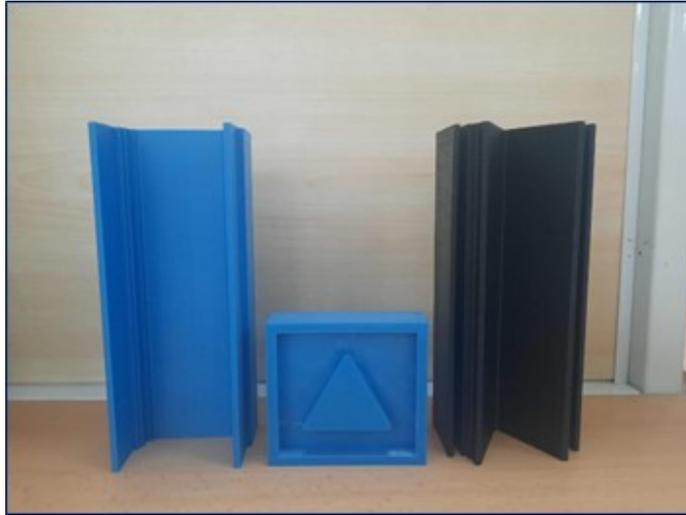


Figura 165. Piezas de recubrimiento finales [84].



Figura 166. Tornillo, arandela y tuerca final [84].

VI-B. Actuadores suaves finales

Los actuadores suaves finales, elaborados con el elastómero de silicona EcoFlex 00-30, representan la culminación de la construcción de estos sistemas. Su diseño incorpora un patrón interno de doble hélice destinado a alojar el hilo de Kevlar, que desempeña un papel fundamental en el proceso de inflamiento uniforme.

La presencia de este canal permite una distribución homogénea de la presión de aire, logrando que el actuador se infle de manera uniforme y controlada. La elección del material de silicona EcoFlex 0030 garantiza la flexibilidad y durabilidad requeridas para adaptarse a las variaciones de forma y movimiento que experimenta el actuador durante su funcionamiento, mientras que el diseño interno con el hilo de Kevlar optimiza su rendimiento y precisión en las deformaciones deseadas.



Figura 167. (a) Actuador suave y varilla. (b) Actuador suave#1 y manguera. [85].

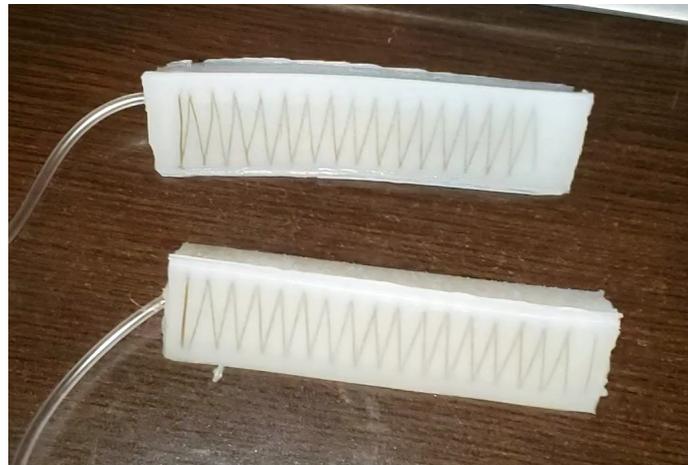


Figura 168. Actuador suave #2 [85].

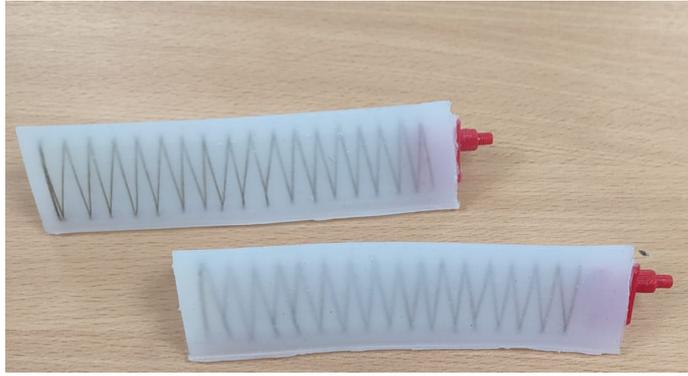


Figura 169. Actuador suave #1 y #2 con tornillo y arandela triangular [85].

VI-C. Corte y Diseño de Patrones Finales

A través de este trabajo de titulación se explicaron las ventajas de implementar distintos diseños de patrones kirigami mediante una piel adicional que recubre el actuador suave. Esta implementación mejora el rendimiento de locomoción del actuador dentro de su entorno de funcionamiento. Los tiempos de rendimiento durante el desplazamiento dependen del patrón seleccionado al momento de la prueba, ya que las estructuras en 3D resultantes de la piel Kirigami son las que interfieren para darle un mejor resultado a la locomoción. A continuación, se describen las diferencias que existen entre el diseño simulado mediante el software AUTOCAD y el resultado final al momento de realizar los cortes en el material.

VI-C1. Probetas de Una Celda:

Tabla XLIII
COMPARACIÓN DE PROBETA SIMULADA Y PROBETA REAL: PATRÓN LINEAL

Probeta Simulada	Probeta Real
Patrón: Lineal	
	
Comparación	
<p>Las medidas de la probeta lineal se definen previamente con una celda de 24 mm y 51 cortes en su longitud direccional. Esta especificación puede indicar que la probeta lineal se divide en 51 secciones iguales a lo largo de su longitud y cada sección tiene una medida de 24 mm.</p>	<p>Los cortes lineales y las medidas se replicaron con precisión en las láminas de poliéster. Esto indica que se logró una reproducción exacta de los cortes y las dimensiones en las láminas de poliéster, lo que implica que no hubo errores significativos en el proceso de corte y que se obtuvo una alta precisión en las medidas realizadas.</p>

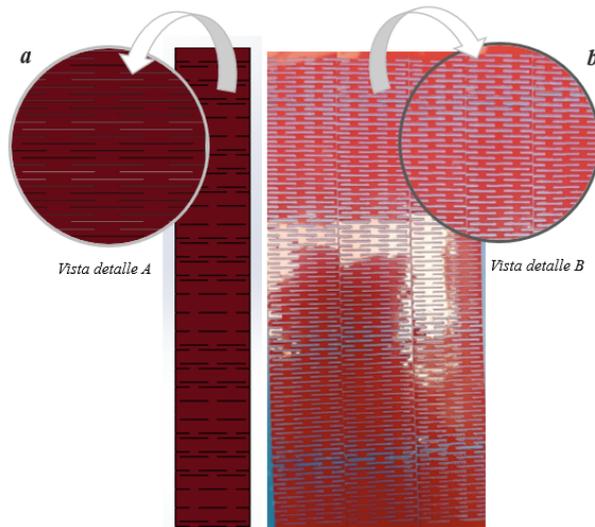
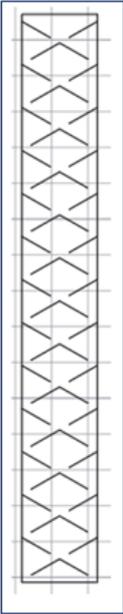


Figura 170. (a) Vista detalle A probeta simulada. (b) Vista detalle B probeta de corte [86].

Tabla XLIV
COMPARACIÓN DE PROBETA SIMULADA Y PROBETA REAL: PATRÓN TRIANGULAR

Probeta Simulada	Probeta Real
Patrón: Triangular	
	
Comparación	
<p>Las medidas de la probeta triangular se definen previamente con una celda de 20.78 mm y 13 cortes en su dirección longitudinal. Esto significa que la probeta triangular se divide en 13 secciones iguales a lo largo de su longitud y cada sección tiene una medida de 20.78 mm.</p>	<p>Se logró una alta precisión en las medidas realizadas, ya que los cortes triangulares y las dimensiones se replicaron con precisión en las láminas de poliéster. Esto indica que no hubo errores significativos en el proceso de corte y se obtuvo una reproducción exacta de los cortes y las medidas en las láminas de poliéster..</p>

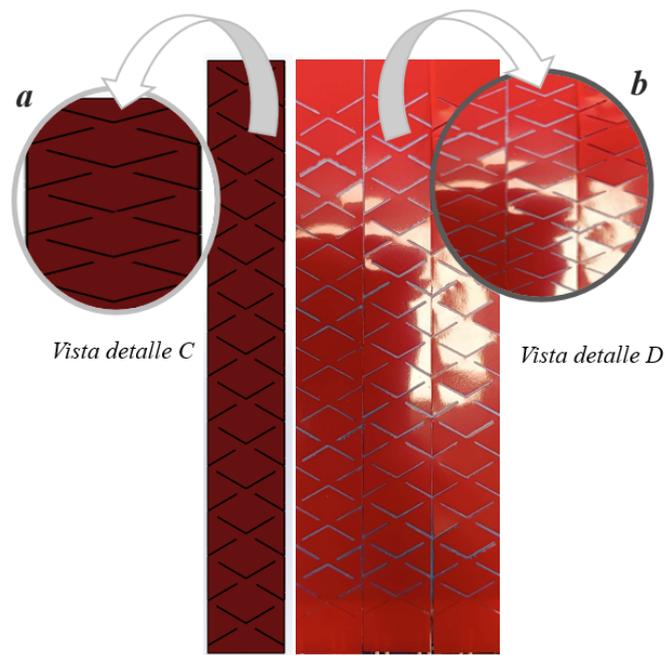
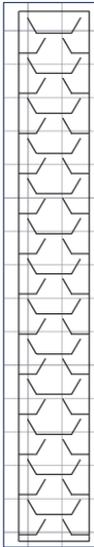


Figura 171. (a) Vista detalle C probeta simulada. (b) Vista detalle D probeta de corte [87].

Tabla XLV
COMPARACIÓN DE PROBETA SIMULADA Y PROBETA REAL: PATRÓN TRAPEZOIDAL

Probeta Simulada	Probeta Real
Patrón: Trapezoidal	
	
Comparación	
<p>La probeta trapezoidal tiene un tamaño de celda de 20.78 mm y la dirección a lo largo de la cual se divide depende de la cantidad de cortes verticales, en este caso 13. Estos cortes definen completamente las dimensiones de la probeta de prueba. En este patrón, el tamaño de la celda y los parámetros previamente establecidos están relacionados con los puntos que conforman la base de la celda, la cual define completamente la forma de la probeta trapezoidal.</p>	<p>Se logró una reproducción exacta de los cortes trapezoidales y las medidas en las láminas de poliéster, lo cual indica que no hubo errores significativos en el proceso de corte. Esto resultó en una alta precisión en las medidas realizadas y una reproducción precisa de las dimensiones en las láminas de poliéster.</p>

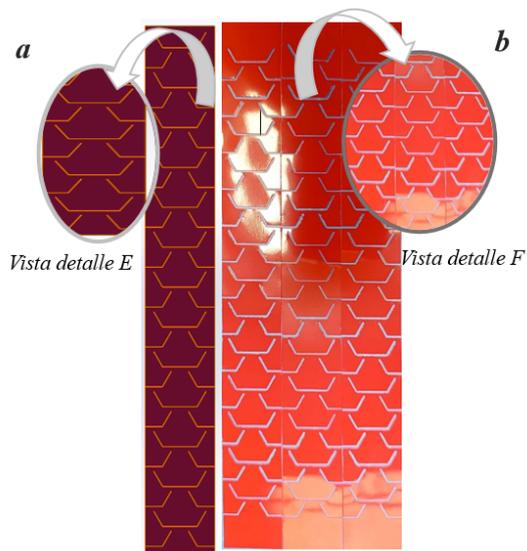
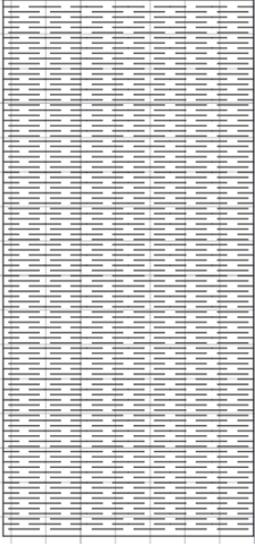
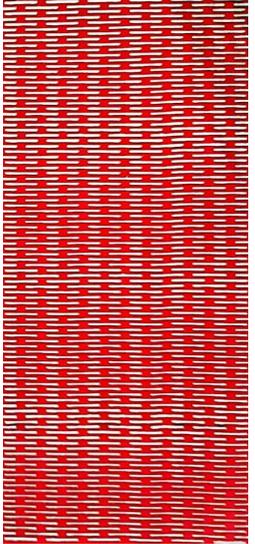


Figura 172. (a) Vista detalle E probeta simulada. (b) Vista detalle F probeta de corte [88].

VI-C2. *Probetas de Tres Celda:*

Probeta Simulada	Probeta Real
Patrón: Lineal	
	
Comparación	
<p>En el caso de la probeta lineal utilizada en las pruebas de deformación, el hecho de tener 6 celdas en su ancho y 51 cortes en su dirección longitudinal permite obtener una muestra representativa de la deformación en diferentes áreas de la probeta. Esto es importante porque nos permite evaluar la influencia del ancho de las probetas y las dimensiones en los resultados de las pruebas de la máxima fuerza, el límite de rotura y la capacidad de elongación del material. Al tener múltiples celdas y cortes, podemos obtener datos más precisos y confiables sobre cómo se comporta el material en diferentes secciones de la probeta.</p>	<p>La reproducción precisa de los cortes y medidas en las láminas de poliéster demuestra la alta precisión del proceso de corte. Esto es importante, ya que asegura que las dimensiones de las láminas sean idénticas a las de la probeta de 6 celdas. Además, esta precisión en las medidas es crucial para garantizar la confiabilidad y la exactitud de los resultados obtenidos en cualquier análisis o experimento realizado con las láminas de poliéster.</p>

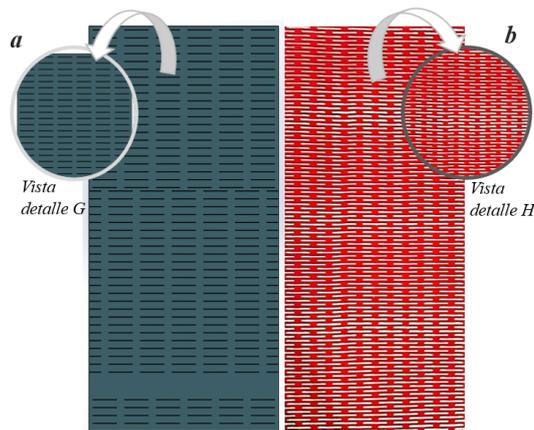
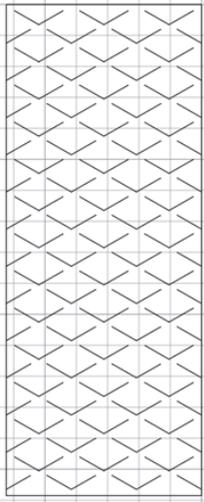
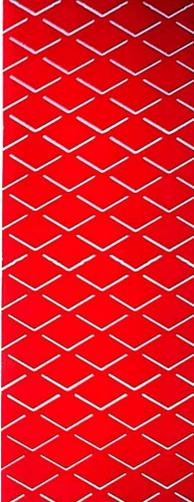


Figura 173. (a) Vista detalle G probeta simulada. (b) Vista detalle H probeta de corte [89].

Probeta Simulada	Probeta Real
Patrón: Triangular	
	
Comparación	
<p>La probeta triangular utilizada en las pruebas de deformación presenta 3 celdas en su ancho y 13 cortes en su dirección longitudinal. Esto nos permite obtener una representación completa de la deformación en diferentes áreas de la probeta. Este aspecto es fundamental, ya que nos permite evaluar cómo el ancho y las dimensiones de las probetas influyen en los resultados de las pruebas, como la fuerza máxima, el límite de rotura y la capacidad de elongación del material. Al contar con múltiples celdas y cortes, obtenemos datos más precisos y confiables sobre el comportamiento del material en diversas secciones de la probeta.</p>	<p>Los cortes realizados en la máquina de corte láser demostraron una alta precisión y exactitud. Este proceso de corte láser permite reproducir con gran precisión los cortes triangulares en la probeta de 3 celdas en las láminas de poliéster. La tecnología láser utilizada en el corte es altamente precisa y controlada, lo que garantiza que los cortes se realicen de manera uniforme y con una alta fidelidad a las dimensiones deseadas. Esto es crucial en pruebas de deformación y medidas en relación con el corte de haz de luz, ya que cualquier error en los cortes podría afectar significativamente los resultados y la precisión de las medidas.</p>

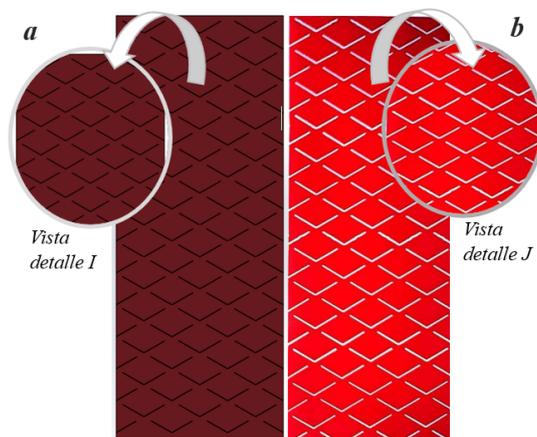
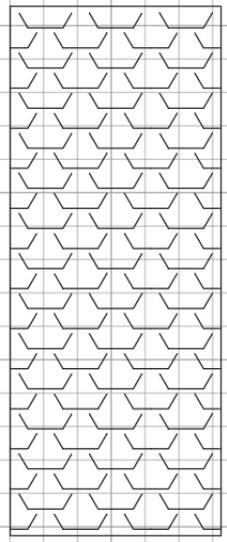


Figura 174. (a) Vista detalle I probeta simulada. (b) Vista detalle J probeta de corte [90].

Probeta Simulada	Probeta Real
Patrón: Trapezoidal	
 <p>A simulated trapezoidal pattern consisting of a grid of white lines forming a series of trapezoidal cells. The pattern is arranged in a regular, repeating grid.</p>	 <p>A real trapezoidal pattern, which is a photograph of a physical material. It shows a red background with white trapezoidal cells, matching the simulated pattern. There are some bright spots and slight variations in the pattern, indicating it is a real-world sample.</p>
Comparación	
<p>La probeta trapezoidal utilizada en las pruebas de deformación incluye tres celdas en su ancho y trece cortes en su dirección longitudinal. Esto proporciona una representación completa de la deformación en diferentes áreas de la probeta. Este aspecto es crucial, ya que nos permite evaluar cómo el ancho y las dimensiones de las probetas afectan los resultados de las pruebas, como la fuerza máxima, el límite de rotura y la capacidad de elongación del material.</p>	<p>Los cortes en la máquina de corte láser fueron precisos y garantizaron una reproducción exacta en las láminas de poliéster, lo que indica alta precisión y ausencia de errores significativos en el proceso. Esto permitió evaluar la deformación en diferentes áreas de la probeta trapezoidal, analizando el comportamiento del material en distintas secciones. Es crucial definir con precisión los puntos de corte para evitar cambios o errores durante la deformación.</p>

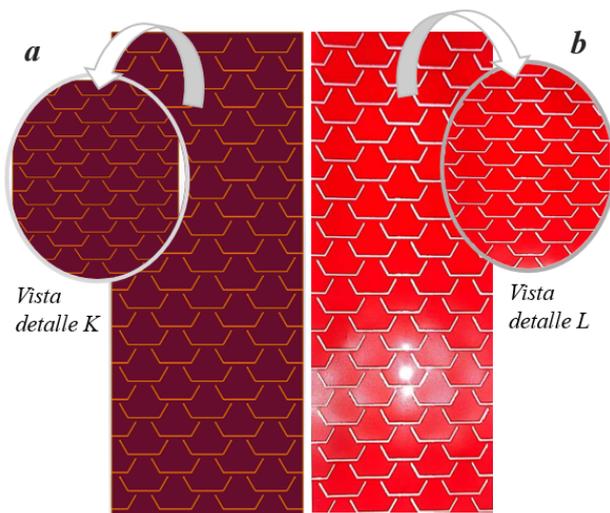


Figura 175. (a) Vista detalle K probeta simulada. (b) Vista detalle L probeta de corte [91].

VI-C3. *Piel de Recubrimiento para actuadores::*

Se proporciona un detalle de las características de cada uno de los tipos de piel utilizados para recubrir los actuadores finales. La cantidad de pieles utilizadas depende de los diferentes patrones diseñados, en este caso son tres: lineal, triangular y trapezoidal. Cada uno de estos patrones produce resultados distintos al comparar el tiempo de locomoción necesario para alcanzar las metas establecidas. Luego, en las tablas se describe el resultado final de la piel, incluyendo la calidad, las dimensiones reales y las dificultades encontradas durante el proceso de corte del material.

Tabla XLVI
PIEL DE RECUBRIMIENTO LINEAL

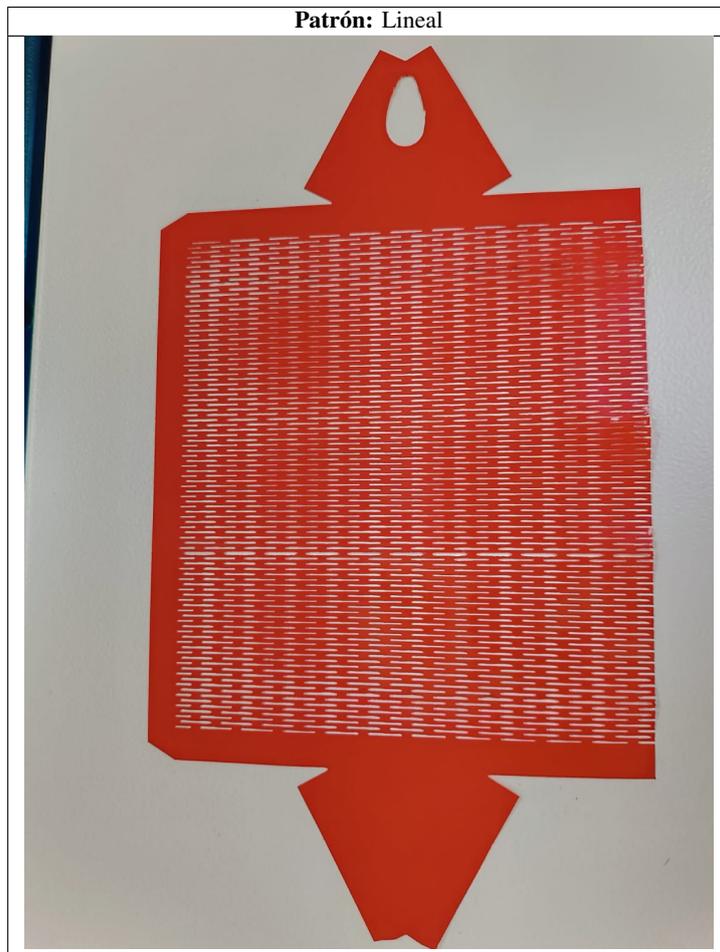


Tabla XLVII
COMPARACIÓN: PIEL DE RECUBRIMIENTO LINEAL

Dimensiones	Resultados
Ancho de Celda: 11 Columnas Dirección Longitudinal: 48 Cortes	La piel lineal obtenida en el proceso de corte se caracteriza por su precisión y ausencia de errores significativos. Esto asegura una reproducción exacta y de alta calidad en el material cortado.

Tabla XLVIII
PIEL DE RECUBRIMIENTO TRIANGULAR

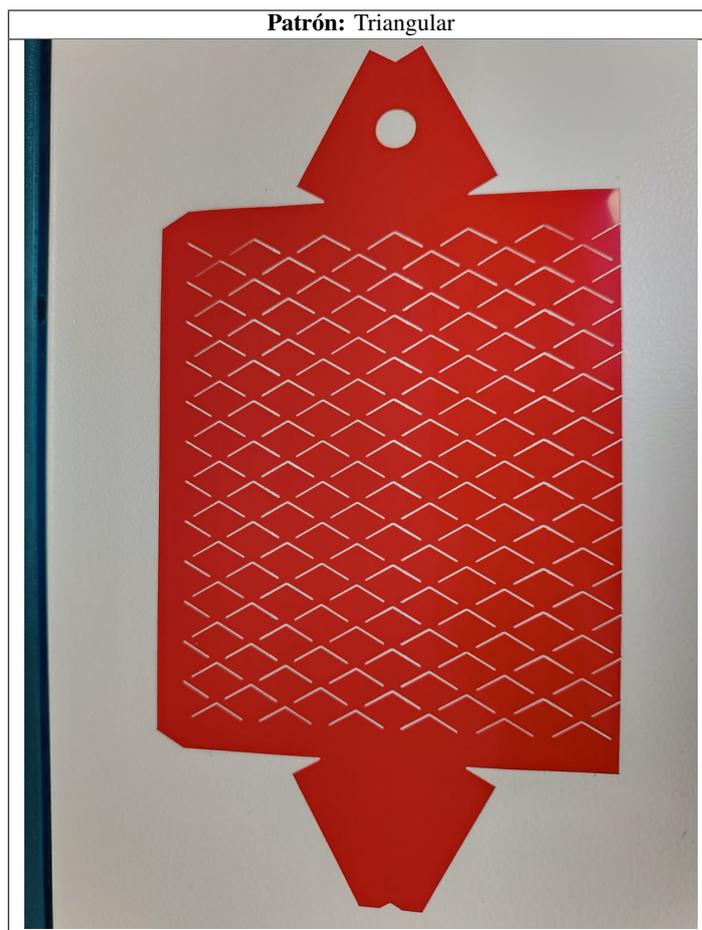


Tabla XLIX
COMPARACIÓN: PIEL DE RECUBRIMIENTO TRIANGULAR

Dimensiones	Resultados
Ancho de Celda: 6 Columnas Dirección Longitudinal: 12 Cortes	La precisión y la ausencia de errores significativos en el proceso de corte garantizan una reproducción exacta y de alta calidad de la piel triangular. Esto asegura que el material cortado sea fiel a las dimensiones y formas deseadas, proporcionando resultados consistentes y confiables.

Tabla L
PIEL DE RECUBRIMIENTO TRAPEZOIDAL



Tabla LI
COMPARACIÓN: PIEL DE RECUBRIMIENTO TRAPEZOIDAL

Dimensiones	Resultados
Ancho de Celda: 6 Columnas Dirección Longitudinal: 12 Cortes	La precisión en el corte de patrones trapezoidales no solo asegura que el material se ajuste correctamente a las dimensiones y formas deseadas, sino que también puede tener un impacto significativo en el rendimiento y la eficiencia de los actuadores. Al garantizar un ajuste perfecto, se reduce la fricción y la resistencia durante el movimiento, lo que resulta en un tiempo de desplazamiento más rápido y una mayor precisión en las posiciones finales.

VI-D. Resultados del revestimiento de la piel Kirigami en actuadores

El actuador suave se encuentra recubierto por una piel kirigami de patrón trapezoidal. Este diseño combina la flexibilidad del actuador suave con la versatilidad de la piel kirigami. Los cortes en forma de trapecios en la piel permiten cambios controlados en la forma y el tamaño del actuador cuando se aplica presión o fuerza externa. Esta combinación ofrece un potencial significativo para aplicaciones que van desde la robótica adaptable hasta dispositivos biomédicos innovadores.



Figura 176. Revestimiento de piel Kirigami con un patrón trapezoidal [92].

El actuador suave se encuentra revestido por completo con una piel kirigami que exhibe un intrigante patrón de corte con formas trapezoidales y triangulares. Esta innovadora piel le confiere al actuador una flexibilidad excepcional y la capacidad de cambiar su forma y tamaño de manera controlada cuando se aplica presión. Los cortes trapezoidales y triangulares permiten adaptar el rendimiento del actuador a una variedad de aplicaciones, desde la manipulación delicada en robótica hasta sistemas de agarre que se ajustan de forma automática a diferentes objetos.



Figura 177. Revestimiento de la piel Kirigami con un patrón triangular y trapezoidal [92].

El acudador suave se encuentra revestido por completo con una piel kirigami que posee un patrón lineal. A lo largo de su estructura, se pueden apreciar segmentos rectilíneos que permiten una expansión y contracción lineal controlada.



Figura 178. Revestimiento de la piel Kirigami con un patrón triangular, trapezoidal y lineal [92].

VI-E. Circuito Final

En esta etapa crucial, se logra la integración de los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema, permitiendo el desplazamiento independiente y coordinado del carrito de tres pisos. Cada nivel del carrito desempeña un papel específico, contribuyendo a la funcionalidad global del sistema. En el primer piso del carrito se aloja una batería de 3 celdas, que sirve como fuente de energía para alimentar los distintos componentes del circuito. Esta batería se dimensiona cuidadosamente para asegurar una duración adecuada de la energía durante las operaciones del sistema, lo que resulta fundamental para un desempeño fluido y consistente.

En el segundo piso, se ubican la microbomba y la microválvula solenoide, componentes esenciales para la operación neumática del mecanismo. Estos elementos son conectados en paralelo y controlados por el circuito electrónico en el tercer nivel. La microbomba garantiza el suministro adecuado de aire a los actuadores neumáticos, mientras que la microválvula regula la dirección del flujo de aire, permitiendo el inflado y desinflado controlado de los actuadores según sea necesario.

El tercer piso del carrito alberga el corazón electrónico del sistema. Aquí, se encuentran el Arduino Nano, un MOSFET (Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor), un TIP (Transistor de Unión Bipolar), un switch y un módulo Bluetooth HC-05. Estos componentes trabajan en conjunto para controlar y coordinar las operaciones del sistema. El Arduino Nano actúa como el cerebro del sistema, ejecutando el código programado que define las secuencias de inflado y desinflado, así como la comunicación con el módulo Bluetooth para el control remoto.

El MOSFET y el TIP cumplen la función de amplificar las señales de control generadas por el Arduino Nano, permitiendo un mayor flujo de corriente hacia la microbomba y la microválvula. El switch ofrece una forma de encender y apagar el sistema de manera conveniente, mientras que el módulo Bluetooth HC-05 agrega una dimensión de control remoto, permitiendo a los usuarios ajustar las secuencias y tiempos de inflado y desinflado desde dispositivos móviles compatibles.

Cada nivel del carrito desempeña un papel crucial, desde la provisión de energía hasta el control electrónico y la comunicación inalámbrica. La integración de estos componentes representa un hito importante en la realización de los objetivos planteados en este trabajo de tesis, abriendo la puerta a futuras aplicaciones y desarrollos en el ámbito de los sistemas mecatrónicos y la automatización.

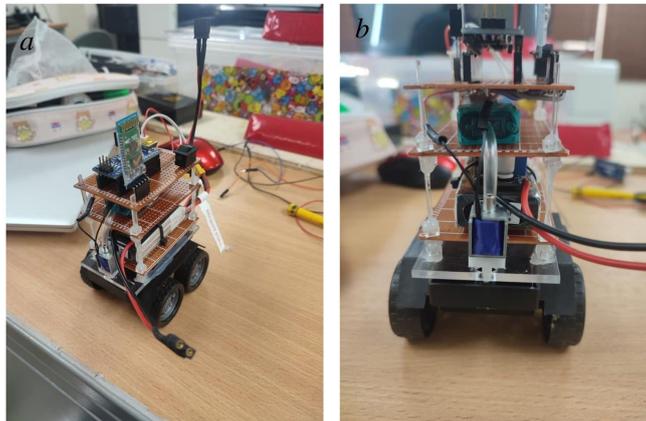


Figura 179. (a) Válvula solenoide colocada en una posición favorable. (b) Circuito final [93].

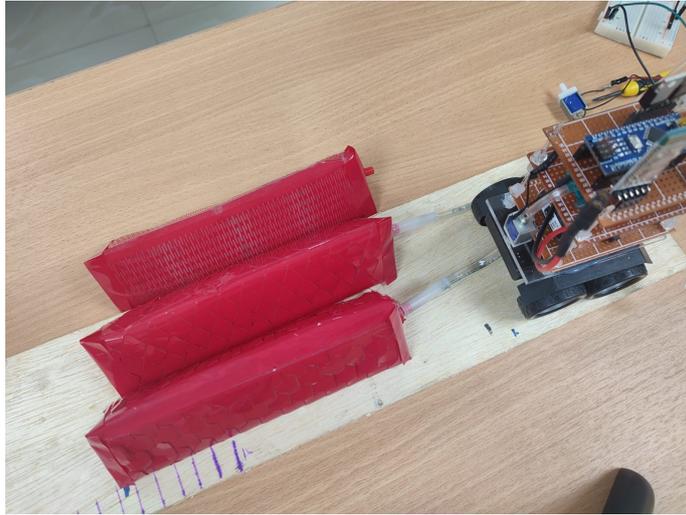


Figura 180. Actuador con piel Kirigami de patrón trapezoidal, lineal y triangular con la implementación del circuito [93].

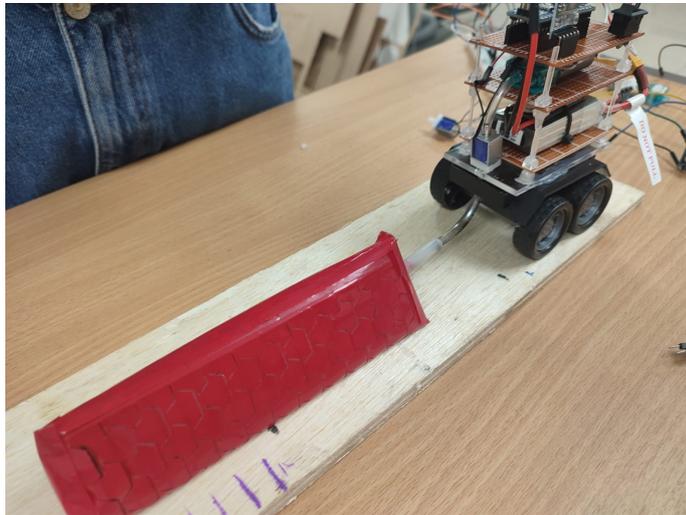


Figura 181. Actuador con piel Kirigami de patrón trapezoidal con la implementación del circuito [93].

Después de observar el funcionamiento del circuito dentro de su entorno de trabajo, se puede llegar a la conclusión de que el diseño puede generar problemas debido a la distribución del peso de los componentes, a la altura y fragilidad de la estructura que sirve de soporte. Sin embargo, el factor más preocupante es que los componentes electrónicos quedan expuestos a diversos agentes como líquidos, grasa, entre otros, lo cual puede afectar el circuito.

Primer Modelo

Se diseñó la base de un carro con el objetivo de colocar la batería y el módulo LM2596 en el interior, lo más cercano al piso posible, para alimentar el actuador y reducir el esfuerzo del movimiento debido al peso. Además, se realizaron extrusiones de cortes en los laterales de la base para conectar y monitorear el circuito. En la parte superior de la base se colocó una tapa para cerrar esta sección del circuito, que se encarga principalmente de la alimentación y regulación. En la parte superior se ubicaron el Arduino Nano, el tip, el MOSFET, el Bluetooth y el interruptor de encendido y apagado del circuito.

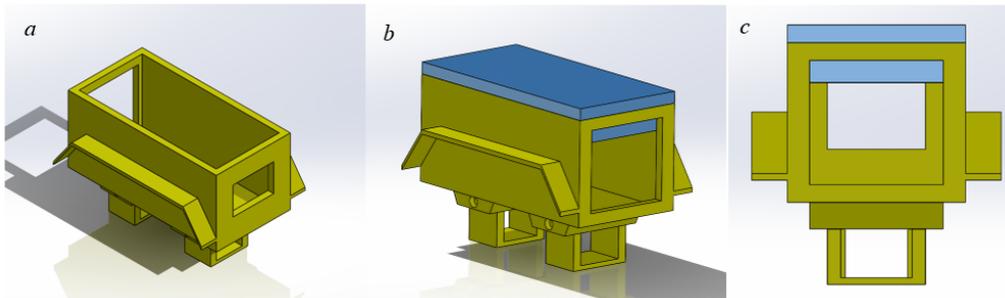


Figura 182. (a) Base del carro. (b) Ensamblaje del Modelo #1. (c) Vista Lateral del ensamblaje [94].

Se imprime el diseño en material TPU, ya que es más ligero y beneficia al actuador al reducir su carga de trabajo. Luego, se lleva el circuito y sus componentes a esta nueva base o estructura, que es ventajosa en términos de altura y material para evitar la fragilidad. Sin embargo, aún existen partes del circuito que siguen expuestas.

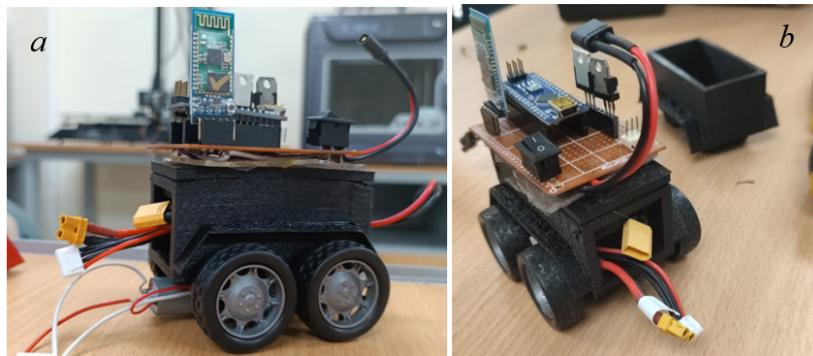


Figura 183. (a) Circuito final montado en la nueva base. (b) Cortes necesarios para el monitoreo del circuito [94].

Se lleva el circuito ya montado al entorno de trabajo para comprobar su funcionamiento y realizar ajustes en el molde en caso de que se presente algún problema. Este proceso nos permite verificar que todos los componentes del circuito están trabajando correctamente y, en caso de ser necesario, realizar modificaciones en el diseño del molde para solucionar cualquier inconveniente que pueda surgir.



Figura 184. (a) Circuito final montado en la nueva base. (b) Cortes necesarios para el monitoreo del circuito [94].

Modelo Final

Finalmente, se toma la decisión de colocar el circuito completo dentro de la base del carro para evitar cualquier problema causado por el circuito expuesto. Se realiza un rediseño tanto de la base del carro como del modelo para ampliar y mejorar la distribución del peso con esta nueva idea.

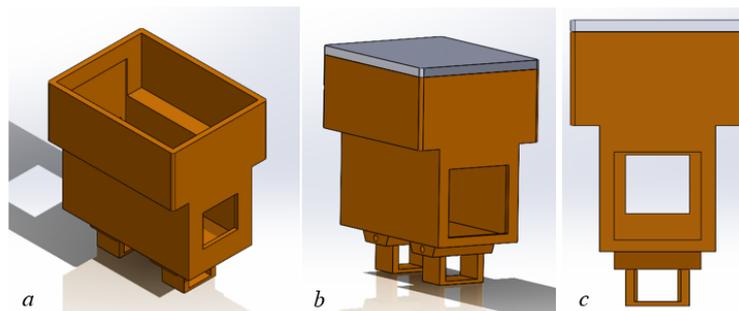


Figura 185. (a) Circuito final montado en la nueva base. (b) Cortes necesarios para el monitoreo del circuito [95].



Figura 186. Circuito Final diseño final [95].

VI-G. Registro de tiempo de desplazamiento del actuador

Tabla LII
PATRÓN LINEAL - TIEMPOS DE LOCOMOCIÓN

Patrón Lineal	
Superficie: Lisa sin Rugosidades	
Medidas de Distancias (cm)	Tiempo (min)
1 cm	10 min
2 cm	17 min
Observaciones:	
El desplazamiento realizado es bastante limitado, ya que el actuador no tiene la capacidad de flexionar los cortes hacia una estructura en 3D, lo que restringe el movimiento.	



Figura 187. Actuador cubierto con una superficie kirigami que presenta un patrón lineal[95].

Tabla LIII
PATRÓN TRIANGULAR - TIEMPOS DE LOCOMOCIÓN

Patrón Triangular		
Superficie: Lisa sin Rugosidades		
Medidas de Distancias (cm)	Tiempo (min)	Ciclos de Inflado
1 cm	1:20 min	6 ciclos
2 cm	2 min	6 ciclos
3 cm	3 min	6 ciclos
4 cm	3:30 min	6 ciclos
5 cm	3:45 min	6 ciclos
6 cm	4:20 min	6 ciclos
7 cm	6 min	7 ciclos
8 cm	7 min	8 ciclos
Observaciones:		
El patrón triangular se caracteriza por ser significativamente más rápido que el patrón lineal en términos de tiempo de locomoción. Sin embargo, durante las pruebas realizadas, se encontró que su desplazamiento no era completamente recto. Esta falta de precisión en el movimiento afectaba el rendimiento del actuador en su superficie de desplazamiento.		



Figura 188. Actuador cubierto con una superficie kirigami que presenta un patrón triangular[95].

Tabla LIV
PATRÓN TRAPEZOIDAL - TIEMPOS DE LOCOMOCIÓN

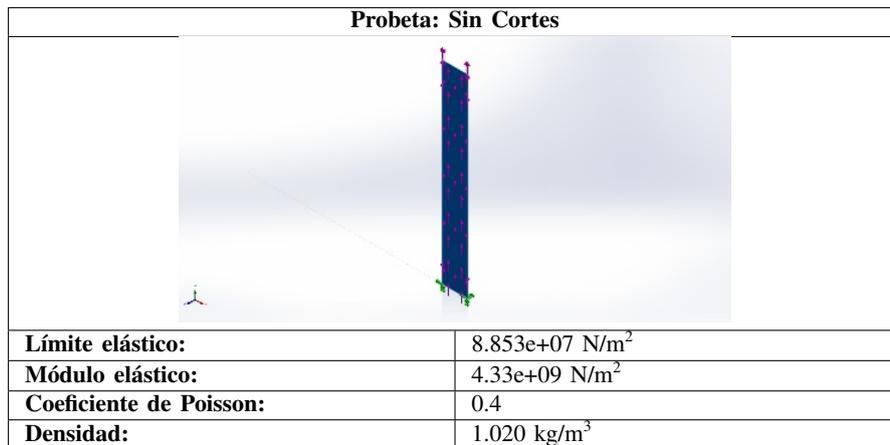
Patrón Trapezoidal		
Superficie: Lisa sin Rugosidades		
Medidas de Distancias (cm)	Tiempo (min)	Ciclos de Inflado
1 cm	1:18 min	6 ciclos
2 cm	1:35 min	5 ciclos
3 cm	2 min	6 ciclos
4 cm	2:50 min	6 ciclos
5 cm	3:25 min	6 ciclos
6 cm	4:10 min	6 ciclos
7 cm	5:30 min	7 ciclos
8 cm	6:10 min	8 ciclos
Observaciones:		
El patrón trapezoidal es ligeramente más rápido que el patrón triangular, ya que su desplazamiento es rectilíneo y no se desvía, lo que ayuda a reducir el tiempo de desplazamiento.		



Figura 189. Actuador cubierto con una superficie kirigami que presenta un patrón trapezoidal[95].

VI-H. Resultados de Simulación de FEM

VI-H1. Resultados de Simulación de FEM-Patrón Sin Corte:



Tensión

El criterio de Von Mises es una forma común de representar las tensiones en el análisis de elementos finitos debido a su capacidad para evaluar la resistencia del material frente a la deformación plástica. Este criterio se utiliza para determinar si el material está dentro de los límites de resistencia y si es probable que falle.

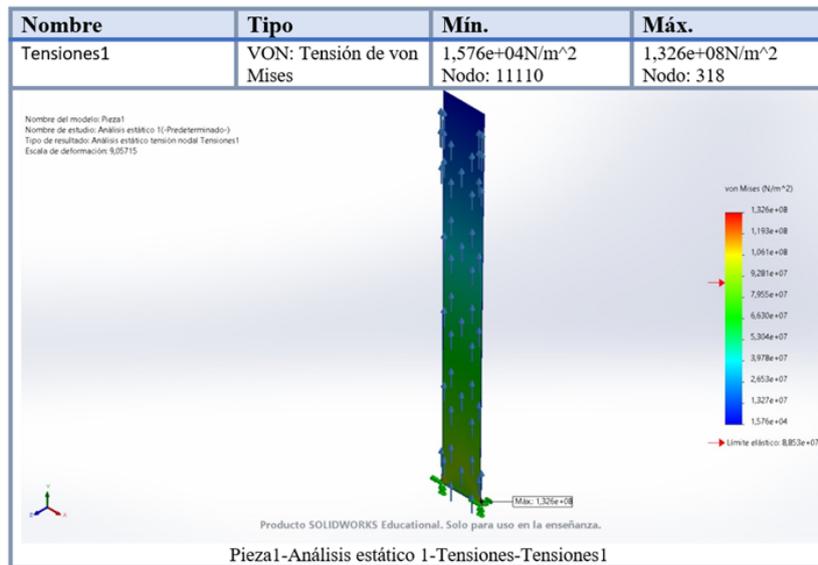


Figura 190. Análisis Estático - Tensiones [96].

La tensión de von Mises es una medida de la resistencia de un material a la deformación plástica. En este caso, se proporcionan dos valores: el mínimo es de $1,576 \times 10^4, N/m^2$ y el máximo es de $1,326 \times 10^8, N/m^2$. Estos valores indican el rango de tensiones en el cual el material puede experimentar deformación plástica.

Desplazamiento

En el análisis de elementos finitos en SolidWorks, los desplazamientos se refieren a la cantidad de movimiento que experimenta un componente o ensamblaje en respuesta a las cargas aplicadas. Los desplazamientos pueden ser grandes o pequeños, dependiendo de la magnitud de las cargas y la rigidez del material.

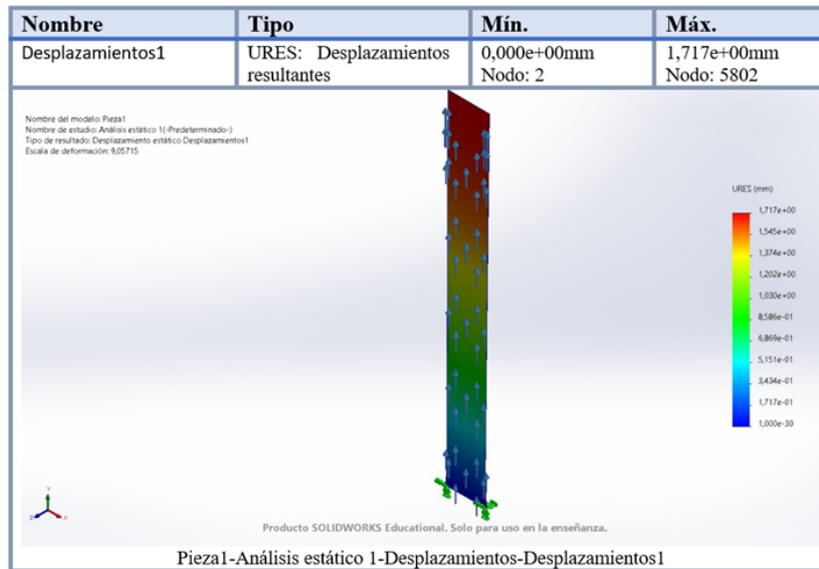


Figura 191. Análisis Estático - Desplazamiento [96].

Los desplazamientos resultantes (URES) son valores que indican los desplazamientos mínimos y máximos en milímetros en diferentes nodos. En este caso específico, el desplazamiento mínimo es de $0,000 \times 10^0$ mm en el Nodo 2, lo que significa que en ese nodo no hay desplazamiento o que el desplazamiento es insignificante. Por otro lado, el desplazamiento máximo es de $1,717 \times 10^0$ mm en el Nodo 5802, lo que indica que en ese nodo se produce el mayor desplazamiento entre todos los nodos analizados.

Estos valores son importantes en el análisis de estructuras y pueden utilizarse para evaluar la estabilidad y el comportamiento de una estructura bajo carga. Los desplazamientos resultantes nos dan una idea de la deformación y la flexibilidad de la estructura en diferentes puntos. En general, cuanto mayor sea el desplazamiento, mayor será la deformación experimentada por la estructura en ese punto específico.

Deformaciones Unitarias

La deformación unitaria en SolidWorks se refiere a la proporción de cambio en longitud con respecto a la longitud original de un material. Es una cantidad sin dimensiones que se utiliza para medir la cantidad de deformación experimentada por un componente o ensamblaje bajo la aplicación de cargas.

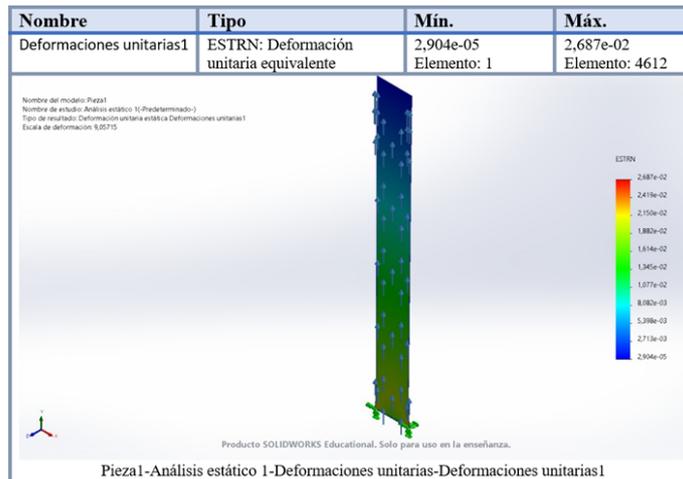


Figura 192. Análisis Estático - Deformaciones Unitarias [96].

Las deformaciones unitarias equivalentes muestran los valores para el elemento 1 y el elemento 4612. Para el elemento 1, la deformación unitaria equivalente es de $2,904 \times 10^{-5}$, lo que indica una deformación relativamente baja. Para el elemento 4612, la deformación unitaria equivalente es de $2,687 \times 10^{-2}$, lo que indica una deformación significativa, aproximadamente del $6,21 \times 10^{-4} \%$.

Obtención del valor de la deformación significativa:

Para el Elemento 1:

$$\text{Porcentaje de Deformación Significativa (Elemento 1)} = \frac{2,904 \times 10^{-5}}{4,33 \times 10^9} \times 100 \approx 6,71 \times 10^{-7} \% \quad (1)$$

Para el Elemento 4612:

$$\text{Porcentaje de Deformación Significativa (Elemento 4612)} = \frac{2,687 \times 10^{-2}}{4,33 \times 10^9} \times 100 \approx 6,21 \times 10^{-4} \% \quad (2)$$

Estos cálculos te darán el porcentaje de deformación significativa para cada elemento. Como puedes ver, el Elemento 4612 tiene una deformación significativa en comparación con el Elemento 1.

VI-H2. Resultados de Simulación de FEM Una Celda-Patrón Lineal:

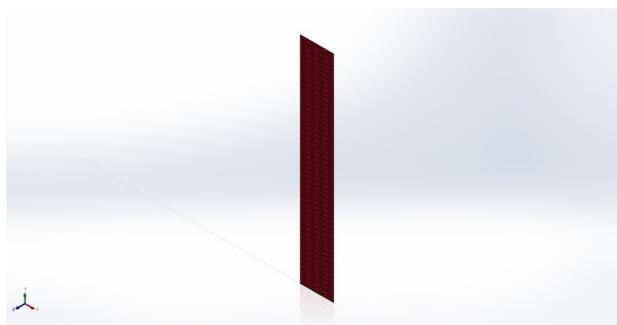


Figura 193. Registro FEM Una Celda de Patrón Lineal [97].

Tensión

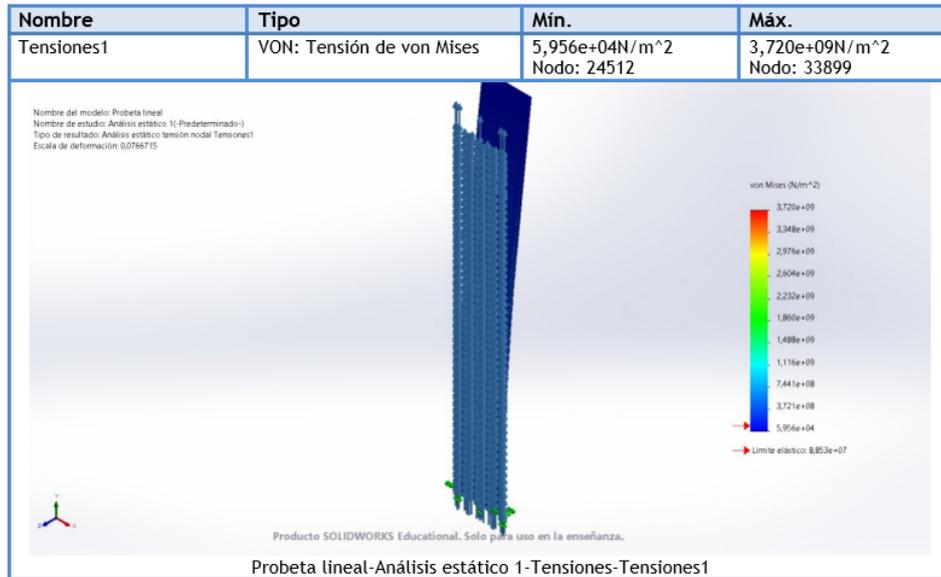


Figura 194. Análisis Estático Una Celda Lineal - Tensiones [97].

Un valor mínimo de tensión de von Mises de $5,956 \times 10^4, \text{N/m}^2$ en el nodo 24512 implica que ese punto experimenta la menor magnitud de tensión equivalente en comparación con otros puntos. Por otro lado, un valor máximo de $3,720 \times 10^9, \text{N/m}^2$ en el nodo 33899 indica que ese punto experimenta la mayor magnitud de tensión equivalente en comparación con otros puntos.

Desplazamiento

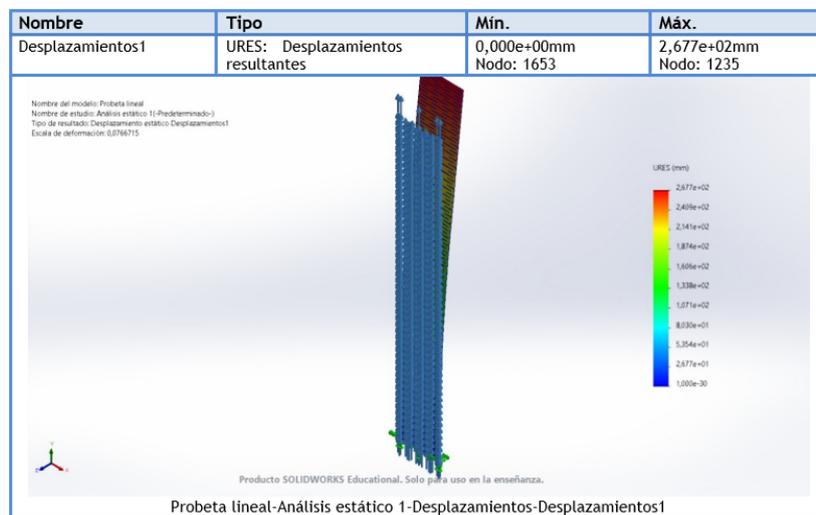


Figura 195. Análisis Estático Una Celda Lineal - Desplazamiento [97].

Los valores proporcionados corresponden a los desplazamientos resultantes en dos nodos específicos del material. El desplazamiento mínimo de $0,000 \times 10^0 \text{ mm}$ en el Nodo 1653 indica que ese punto no presenta ningún desplazamiento o deformación bajo la carga aplicada. Por otro lado, el desplazamiento máximo de $2,677 \times 10^2 \text{ mm}$

en el Nodo 1235 indica que ese punto experimenta el mayor desplazamiento o deformación en comparación con otros puntos del material.

Deformaciones Unitarias

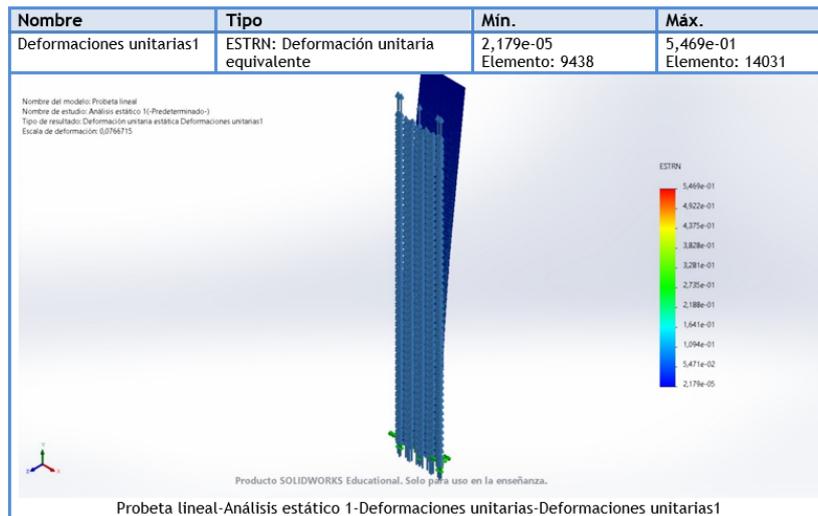


Figura 196. Análisis Estático Una Celda Lineal - Deformaciones Unitarias [97].

La deformación unitaria equivalente es una medida de la deformación acumulada en un material. En el elemento 9438, se observa una deformación mínima de $2,18 \times 10^{-2}$, mientras que en el elemento 14031 se alcanza una deformación máxima de $5,47 \times 10^2$.

VI-H3. Resultados de Simulación de FEM Tres Celdas-Patrón Lineal:

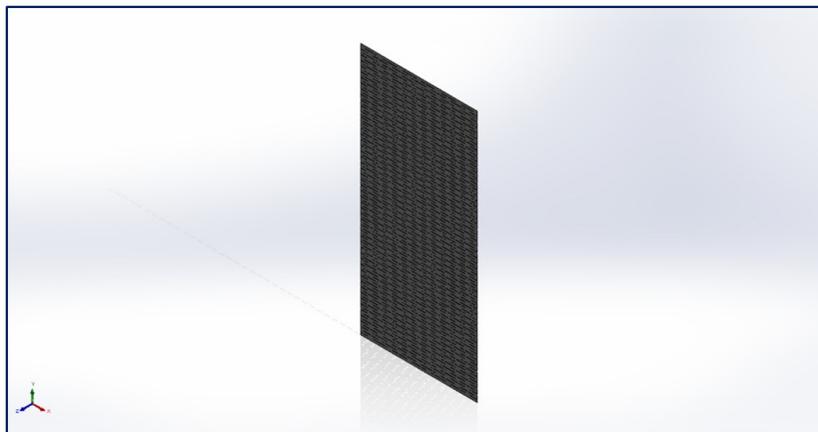


Figura 197. Registro FEM Tres Celdas de Patrón Lineal [98].

Tensión

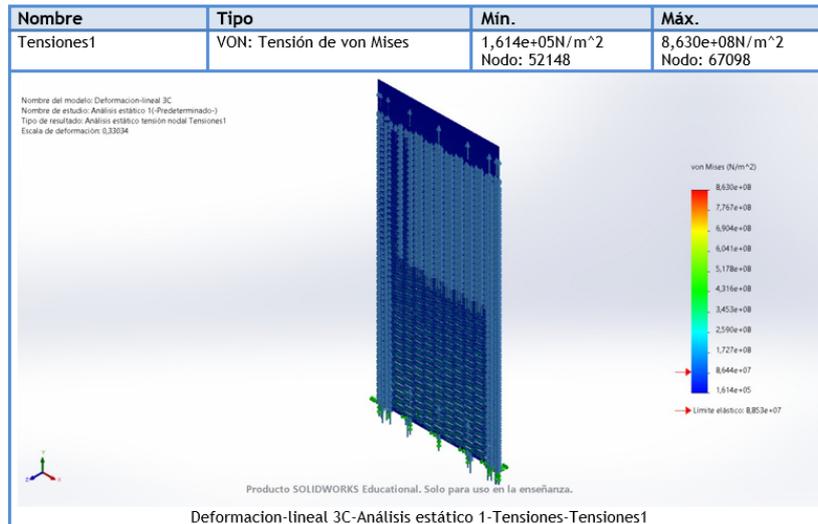


Figura 198. Análisis Estático Tres Celdas Lineal - Tensiones [98].

En el caso específico mencionado, se ha observado que en el nodo 52148 del material se ha registrado una tensión mínima de $1,614 \times 10^5$, N/m², lo cual indica que en esa ubicación la tensión es relativamente baja. Por otro lado, en el nodo 67098 se ha alcanzado una tensión máxima de $8,630 \times 10^8$, N/m², lo cual indica que en esa zona del material la tensión es significativamente más alta.

Esta información es importante para evaluar la resistencia del material en diferentes puntos y determinar si se encuentra dentro de los límites de resistencia permitidos.

Desplazamiento

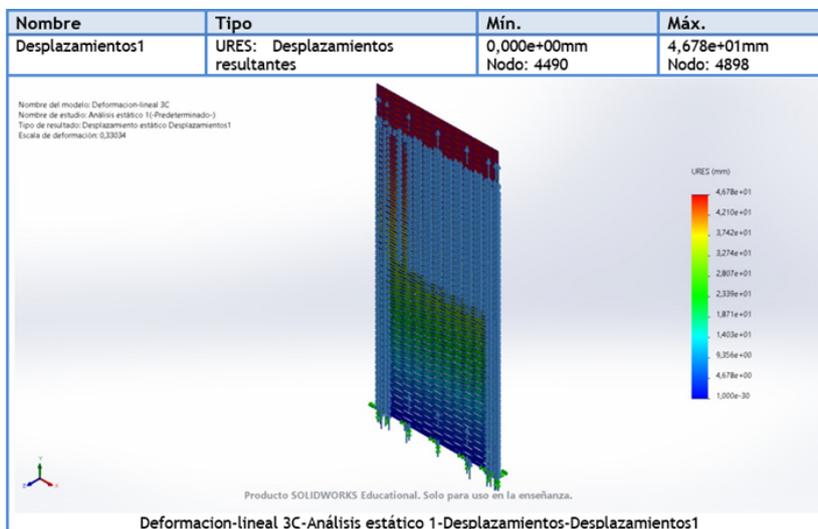


Figura 199. Análisis Estático Tres Celdas Lineal - Desplazamiento [98].

En cuanto a los desplazamientos resultantes (URES), se ha registrado un desplazamiento mínimo de $0,000 \times 10^0$ mm en el Nodo 4490, lo cual indica que no hubo ningún desplazamiento en esa ubicación. Por otro lado, se ha

registrado un desplazamiento máximo de $4,678 \times 10^1$ mm en el Nodo 4898, lo cual indica un desplazamiento significativo en esa zona del material.

Deformaciones Unitarias

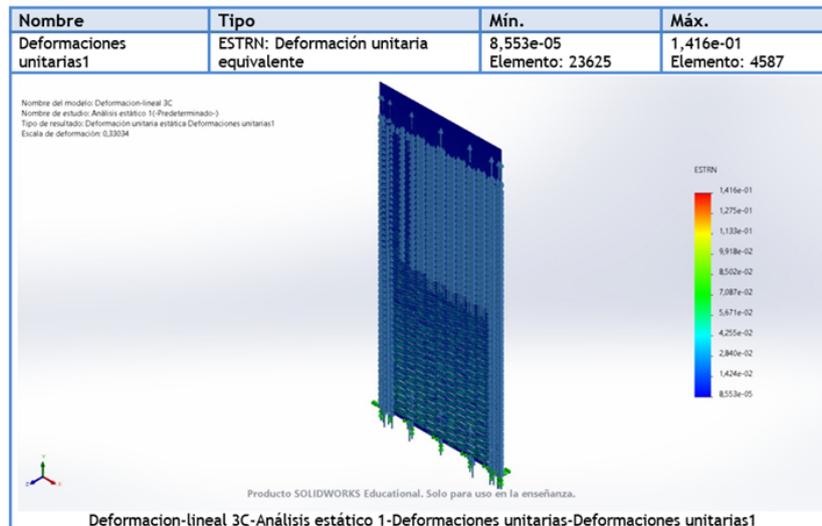


Figura 200. Análisis Estático Tres Celdas Lineal - Deformaciones Unitarias [98].

La deformación unitaria equivalente (ESTRN), en el caso del elemento 23625, se ha registrado una deformación mínima de $8,55 \times 10^{-2}$. Esto significa que en ese punto del material, la deformación experimentada es relativamente pequeña. Por otro lado, en el elemento 4587, se ha registrado una deformación máxima de $1,42 \times 10^2$. Esto indica que en ese punto específico del material, la deformación es significativamente mayor.

VI-H4. Comparación de resultados de FEM - Patrón Lineal: Una Celda y Tres Celdas:

Comparación de Resultados de Tensión:

Tabla LV
TENSION MÍNIMA DE VON MISES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES

Configuración	Tensión mínima de von Mises (N/m ²)
Una Celda	$5,956 \times 10^4$ N/m ²
Tres Celdas	$1,614 \times 10^5$ N/m ²

En este caso, la tensión mínima de von Mises es mayor en el patrón lineal de tres celdas en comparación con el patrón de una celda. Esto podría deberse a la interacción entre las celdas que aumenta la carga en ciertos nodos.

Tabla LVI
TENSION MÁXIMA DE VON MISES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES

Configuración	Tensión máxima de von Mises (N/m ²)
Una Celda	$3,720 \times 10^9$ N/m ²
Tres Celdas	$8,630 \times 10^8$ N/m ²

La tensión máxima de von Mises es mucho menor en el patrón lineal de tres celdas en comparación con el patrón de una celda. Esto podría sugerir que la distribución de la carga entre las tres celdas está resultando en una menor concentración de tensiones en los nodos críticos.

En general, la comparación indica que el patrón lineal de tres celdas está experimentando menores tensiones máximas pero mayores tensiones mínimas de von Mises en comparación con el patrón de una celda. Esto podría ser el resultado de cómo las celdas interactúan entre sí y cómo se distribuyen las cargas en la estructura.

Comparación de Resultados de Desplazamientos Resultantes:

Tabla LVII
DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS

Configuración	Desplazamiento Máximo
Patrón de Una Celda (Nodo 1235)	$2,677 \times 10^2$ mm
Patrón de Tres Celdas (Nodo 4898)	$4,678 \times 10^1$ mm

En esta comparación, el patrón de tres celdas muestra un desplazamiento máximo considerablemente menor en el nodo 4898 en comparación con el patrón de una celda en el nodo 1235. Esto sugiere que la configuración de tres celdas está experimentando una deformación máxima menor en relación con el patrón de una celda.

Tabla LVIII
DESPLAZAMIENTOS MÍNIMOS

Configuración	Desplazamiento Mínimo
Patrón de Una Celda (Nodo 1653)	$0,000 \times 10^0$ mm
Patrón de Tres Celdas (Nodo 4490)	$0,000 \times 10^0$ mm

Los desplazamientos mínimos son iguales en ambos patrones y nodos. Esto podría indicar que estos nodos están fijos o restringidos en alguna forma, lo que resulta en un desplazamiento mínimo de cero.

En resumen, los desplazamientos máximos son significativamente menores en el patrón de tres celdas en comparación con el patrón de una celda. Esto sugiere que la configuración de tres celdas está experimentando una deformación máxima menor. Los desplazamientos mínimos son iguales en ambos patrones, lo que podría indicar restricciones en esos nodos.

Comparación de Resultados de Deformación Unitaria Equivalente:

En ambos patrones, las deformaciones unitarias equivalentes (ESTRN) se miden en términos de magnitud de deformación.

Tabla LIX
DEFORMACIONES MÁXIMAS

Configuración	Deformación Máxima
Patrón de Una Celda (Elemento 14031)	$5,47 \times 10^2$
Patrón de Tres Celdas (Elemento 4587)	$1,42 \times 10^2$

La deformación máxima en el patrón de una celda (Elemento 14031) es considerablemente mayor en comparación con el patrón de tres celdas (Elemento 4587). Esto indica que el patrón de una celda está experimentando deformaciones más altas en ese elemento específico.

Tabla LX
DEFORMACIONES MÍNIMAS

Configuración	Deformación Mínima
Patrón de Una Celda (Elemento 9438)	$2,18 \times 10^{-2}$
Patrón de Tres Celdas (Elemento 23625)	$8,55 \times 10^{-2}$

La deformación mínima en el patrón de una celda (Elemento 9438) es menor en comparación con el patrón de tres celdas (Elemento 23625). Esto podría indicar que la configuración de una celda experimenta deformaciones mínimas menores en ese elemento específico.

En resumen, los resultados muestran que el patrón de una celda tiene deformaciones máximas más altas, pero deformaciones mínimas más bajas en comparación con el patrón de tres celdas. Las diferencias en las deformaciones pueden deberse a la distribución de carga y restricciones en las diferentes configuraciones.

VI-H5. Resultados de Simulación de FEM Una Celda - Patrón Triangular:

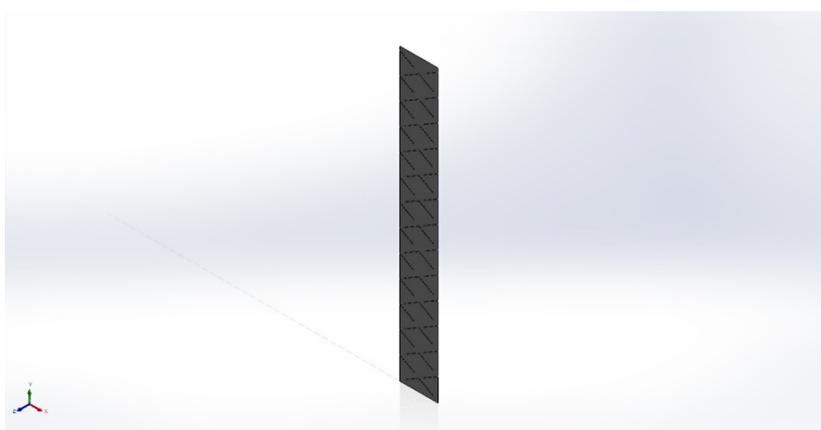


Figura 201. Registro FEM Una Celda de Patrón Triangular [99].

Tensión

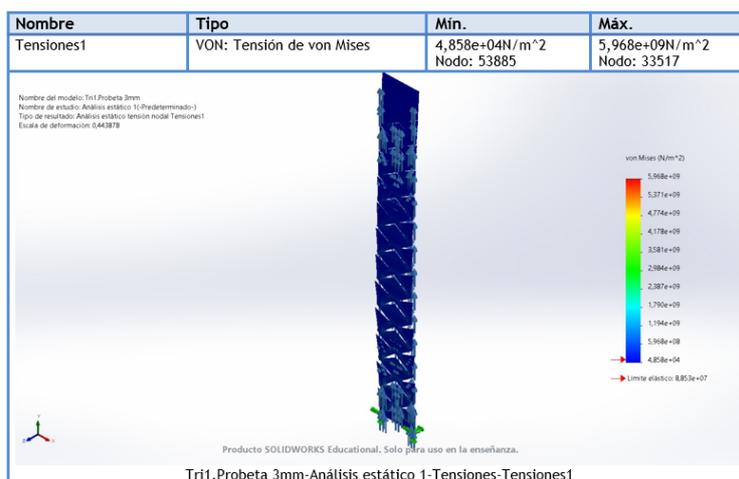


Figura 202. Análisis Estático Una Celda Triangular - Tensiones [99].

En el análisis de las tensiones de Von Mises, se observa que la tensión mínima en el nodo 53885 es de $4,858 \times 10^4 \text{ N/m}^2$, lo cual está muy por debajo del límite elástico del material ($8,853 \times 10^7 \text{ N/m}^2$). Esto indica que en este nodo en particular, el material está experimentando una carga relativamente baja en comparación con su capacidad para resistir deformaciones permanentes.

Por otro lado, se identifica que la tensión máxima de Von Mises en el nodo 33517 es de $5,968 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, lo cual es significativamente más alto que el límite elástico del material. Esta situación plantea un posible riesgo, ya que sobrepasar el límite elástico puede ocasionar deformaciones permanentes o incluso fallas en el material.

Desplazamiento

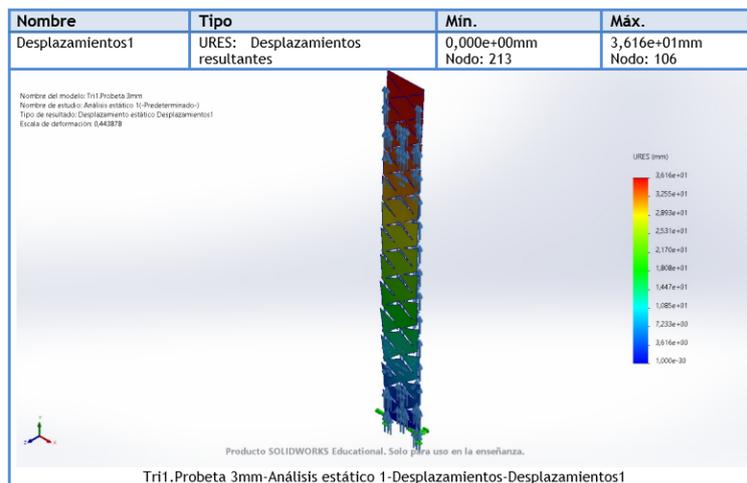


Figura 203. Análisis Estático Una Celda Triangular - Desplazamiento [99].

En el análisis de los desplazamientos resultantes, se han obtenido los siguientes resultados para los nodos 213 y 106:

Desplazamiento mínimo (Nodo 213) : 0,000 mm.

Este valor indica que el nodo está fijo o restringido, lo que implica que no hay deformación en este punto de la estructura.

Desplazamiento máximo (Nodo 106) : $3,616 \times 10^1$ mm.

Esta magnitud indica que el nodo ha experimentado un desplazamiento debido a las cargas aplicadas. El valor obtenido se encuentra dentro de los rangos esperados según las propiedades mecánicas y las condiciones de carga.

En resumen, se puede concluir que el nodo 213 no presenta desplazamiento alguno, lo cual sugiere que está restringido o fijo. Por otro lado, el nodo 106 muestra un desplazamiento máximo de $3,616 \times 10^1$ mm, lo cual indica que tiene mayor libertad para desplazarse bajo las cargas aplicadas.

Deformaciones Unitarias

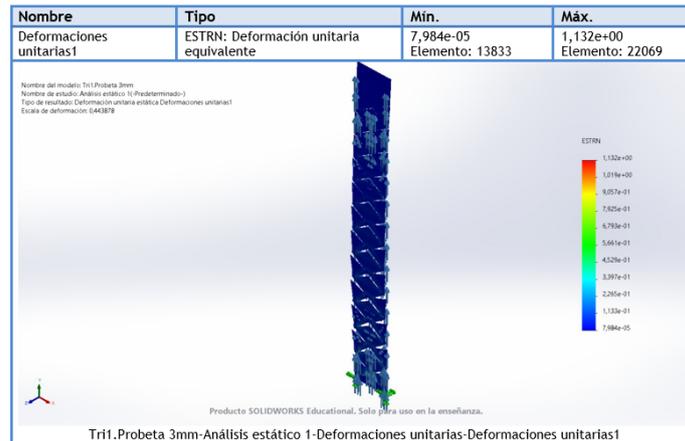


Figura 204. Análisis Estático Una Celda Triangular - Deformaciones Unitarias [99].

Deformación Mínima (Elemento 13833): $7,98 \times 10^{-2}$

La deformación mínima en el elemento 13833 es relativamente baja en comparación con el límite elástico del material. Esto sugiere que el elemento está experimentando una deformación que se encuentra por debajo de su capacidad de provocar deformaciones permanentes.

Deformación Máxima (Elemento 22069): $1,13 \times 10^3$

La deformación máxima en el elemento 22069 es significativamente alta en relación con el límite elástico del material. Esta situación podría ser crítica, ya que la deformación es considerablemente mayor en comparación con la capacidad del material para soportar deformaciones permanentes.

Los resultados indican que el elemento 22069 está experimentando una deformación máxima que excede sustancialmente el límite elástico del material. Esto podría indicar un riesgo de deformación plástica o fallo en esa zona. Por otro lado, el elemento 13833 tiene una deformación mínima que se encuentra dentro de los límites seguros de deformación elástica.

VI-H6. Resultados de Simulación de FEM Tres Celdas - Patrón Triangular:

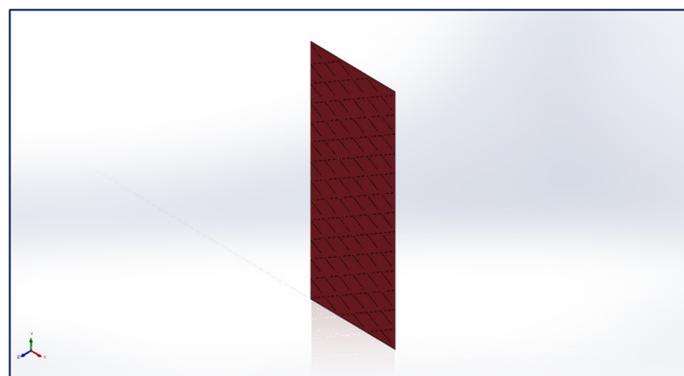


Figura 205. Registro FEM Tres Celdas de Patrón Triangular [100].

Tensión

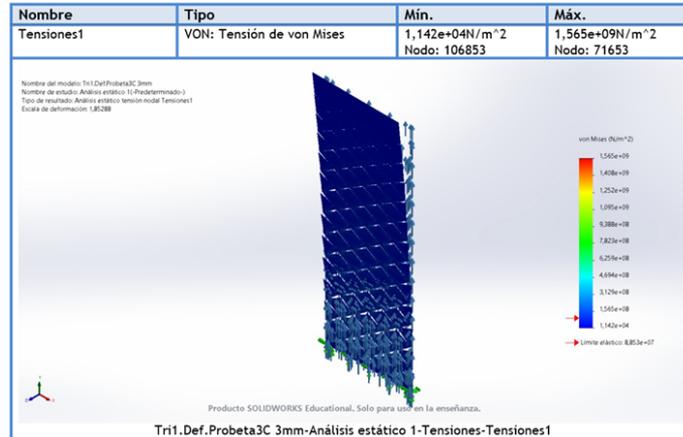


Figura 206. Análisis Estático Tres Celdas Triangular - Tensiones [100].

Tensión Mínima de Von Mises (Nodo 106853): $1,142 \times 10^4 \text{ N/m}^2$

La tensión mínima se encuentra significativamente por debajo del límite elástico del material ($8,853 \times 10^7 \text{ N/m}^2$). Esto indica que el material en el nodo 106853 está experimentando una carga relativamente baja en comparación con su capacidad para resistir deformaciones permanentes.

Tensión Máxima de Von Mises (Nodo 71653): $1,565 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

La tensión máxima supera el límite elástico del material. Esta situación puede ser crítica, ya que superar el límite elástico puede provocar deformaciones permanentes o incluso fallos en el material.

En resumen, la tensión mínima en el nodo 106853 está por debajo del límite elástico, lo que indica una carga relativamente baja en ese punto. Sin embargo, la tensión máxima en el nodo 71653 supera significativamente el límite elástico, lo que puede indicar una situación problemática en términos de deformación o fallo.

Desplazamiento

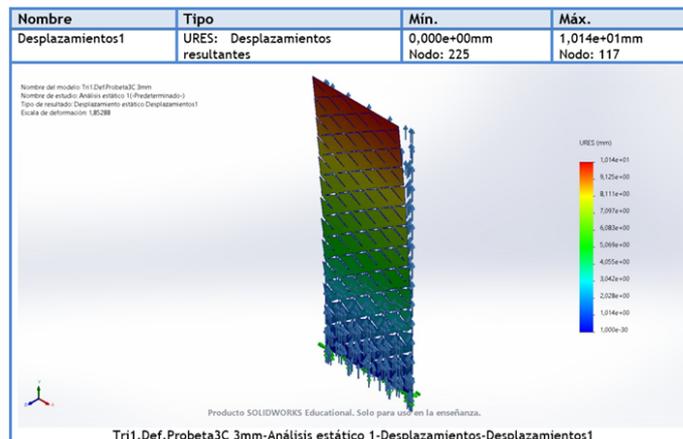


Figura 207. Análisis Estático Tres Celdas Triangular - Desplazamiento [100].

Desplazamiento Mínimo (Nodo 225): 0,000 mm

El nodo 225 no experimenta ningún desplazamiento, lo que podría indicar que este nodo está fijo o restringido en alguna forma. No hay deformación en este nodo.

Desplazamiento Máximo (Nodo 117): 1,014 mm

El nodo 117 experimenta un desplazamiento máximo de 1,014 mm. Esto indica que este nodo se ha movido en esta cantidad debido a las cargas aplicadas. El desplazamiento está dentro de la magnitud esperada para las propiedades mecánicas y las condiciones de carga.

En resumen, el nodo 225 no experimenta desplazamiento alguno, mientras que el nodo 117 se desplaza en 1,014 mm como máximo. Esto podría sugerir que el nodo 225 está fijo o restringido, mientras que el nodo 117 es más libre para desplazarse bajo las cargas aplicadas.

Deformaciones Unitarias

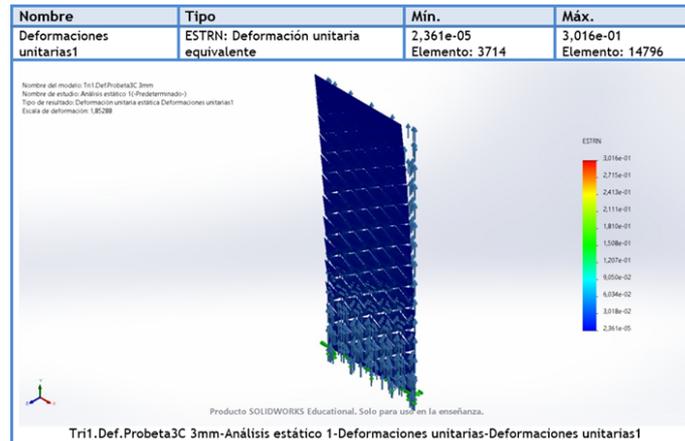


Figura 208. Análisis Estático Tres Celdas Triangular - Deformaciones Unitarias [100].

Elemento 3714 - Deformación Mínima: $2,36 \times 10^{-2}$

La deformación mínima en el elemento 3714 es relativamente baja en comparación con el límite elástico del material. Esto sugiere que el elemento está experimentando una deformación que se encuentra por debajo de su capacidad para provocar deformaciones permanentes.

Elemento 14796 - Deformación Máxima: $3,02 \times 10^2$

La deformación máxima en el elemento 14796 es significativamente alta en relación con el límite elástico del material. Esto podría indicar una situación problemática, ya que la deformación excede considerablemente la capacidad del material para soportar deformaciones permanentes.

En resumen, el elemento 3714 tiene una deformación mínima que está dentro de los límites seguros de deformación elástica. Por otro lado, el elemento 14796 muestra una deformación máxima que excede considerablemente el límite elástico del material.

VI-H7. Comparación de resultados de FEM - Patrón Triangular: Una Celda y Tres Celdas:

Comparación de Resultados de Tensión:

Tabla LXI
TENSION MÍNIMA DE VON MISES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES

Configuración	Tensión mínima de von Mises (N/m ²)
Una Celda (Nodo 53885)	$4,858 \times 10^4$ N/m ²
Tres Celdas (Nodo 106853)	$1,142 \times 10^4$ N/m ²

La tensión mínima en el patrón de tres celdas es ligeramente menor que en el patrón de una celda. Ambas tensiones mínimas son mucho más bajas que el límite elástico del material.

Tabla LXII
TENSION MÁXIMA DE VON MISES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES

Configuración	Tensión máxima de von Mises (N/m ²)
Una Celda (Nodo 33517)	$5,968 \times 10^9$ N/m ²
Tres Celdas (Nodo 71653)	$1,565 \times 10^9$ N/m ²

La tensión máxima en el patrón de una celda es significativamente más alta que en el patrón de tres celdas. Ambas tensiones máximas superan el límite elástico del material, siendo la del patrón de una celda mucho mayor.

Los resultados indican que el patrón de tres celdas tiene una tensión máxima menor en comparación con el patrón de una celda. Sin embargo, ambas configuraciones muestran tensiones máximas que superan el límite elástico del material, lo que podría indicar situaciones de deformación plástica o incluso fallo.

Comparación de Resultados de Desplazamientos resultantes:

Tabla LXIII
DESPLAZAMIENTOS MÍNIMOS

Configuración	Desplazamiento Mínimo
Patrón de Una Celda (Nodo 213)	$0,000 \times 10^0$ mm
Patrón de Tres Celdas (Nodo 225)	$0,000 \times 10^0$ mm

En ambos patrones de configuración (una celda y tres celdas), los desplazamientos mínimos son cero en sus respectivos nodos. Esto podría sugerir que estos nodos están fijos o restringidos, lo que impide cualquier movimiento bajo las condiciones de carga.

Tabla LXIV
DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS

Configuración	Desplazamiento Máximo
Patrón de Una Celda (Nodo 106)	$3,616 \times 10^1$ mm
Patrón de Tres Celdas (Nodo 117)	$1,014 \times 10^1$ mm

En el patrón de una celda (Nodo 106), el desplazamiento máximo es de $3,616 \times 10^1$ mm. Esto indica un nivel significativo de deformación en respuesta a las cargas aplicadas. En el patrón de tres celdas (Nodo 117), el desplazamiento máximo es de $1,014 \times 10^1$ mm. Si bien es menor que en el patrón de una celda, sigue siendo una deformación considerable.

En resumen, los resultados muestran que ambos patrones de configuración presentan desplazamientos mínimos nulos, lo que sugiere nodos fijos o restringidos. Sin embargo, los desplazamientos máximos varían: el patrón de una celda tiene una deformación mayor en comparación con el patrón de tres celdas. Esto podría deberse a diferentes configuraciones de carga o restricciones en las celdas.

Comparación de Resultados de Deformación unitaria equivalente:

Tabla LXV
DEFORMACIONES MÍNIMAS

Configuración	Deformación Mínima
Patrón de Una Celda (Elemento 13833)	$7,98 \times 10^{-2}$
Patrón de Tres Celdas (Elemento 3714)	$2,36 \times 10^{-2}$

La deformación mínima en el patrón de una celda es mayor que en el patrón de tres celdas. Ambas deformaciones mínimas están por debajo del límite elástico del material, lo que indica que los elementos están experimentando deformaciones elásticas.

Tabla LXVI
DEFORMACIONES MÁXIMAS

Configuración	Deformación Máxima
Patrón de Una Celda (Elemento 22069)	$1,13 \times 10^3$
Patrón de Tres Celdas (Elemento 14796)	$3,02 \times 10^2$

La deformación máxima en el patrón de una celda es mucho mayor que en el patrón de tres celdas. Sin embargo, la deformación máxima del patrón de una celda excede significativamente el límite elástico, lo que podría indicar deformación plástica o incluso fallo.

Los resultados muestran que la deformación mínima es mayor en el patrón de una celda en comparación con el patrón de tres celdas. Además, la deformación máxima en el patrón de una celda supera ampliamente el límite elástico del material.

VI-H8. Resultados de Simulación de FEM Una Celda - Patrón Trapezoidal:

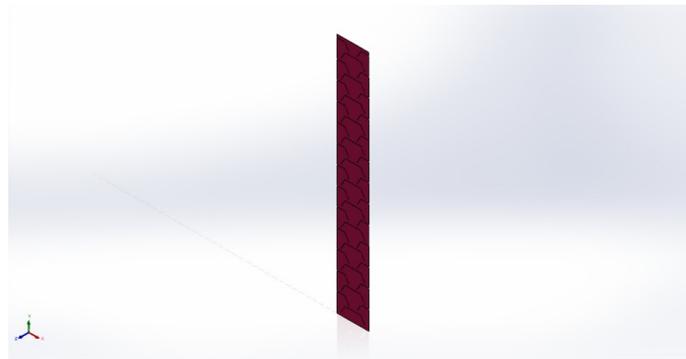


Figura 209. Registro FEM Una Celda de Patrón Trapezoidal [101].

Tensión

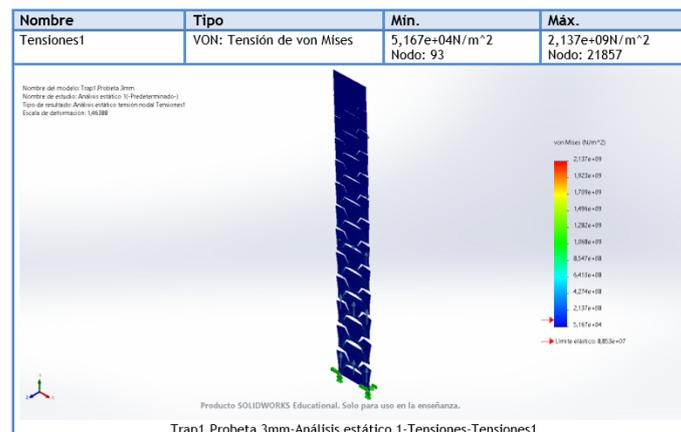


Figura 210. Análisis Estático Una Celda Trapezoidal - Tensiones [101].

Tensión Mínima de Von Mises (Nodo 93): $5,167 \times 10^4 \text{ N/m}^2$

La tensión mínima en el Nodo 93 es significativamente inferior al límite elástico del material. Esto indica que el elemento en este nodo está experimentando una carga que no compromete su integridad estructural. La tensión es bien tolerada por el material y se encuentra dentro de un rango seguro, lo que sugiere que el elemento conserva su comportamiento elástico sin riesgo inmediato de deformación permanente o falla.

Tensión Mínima de Von Mises (Nodo 21857): $2,137 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

La tensión máxima en el Nodo 21857 es significativamente superior al límite elástico del material. Esto indica que el elemento en este nodo está experimentando una carga que se acerca o incluso supera su capacidad para mantener deformaciones elásticas. Esta situación es una señal de advertencia y sugiere que el material está en riesgo de sufrir deformación plástica o incluso fallo si la carga continúa aumentando.

El análisis de las tensiones en estos nodos destaca la importancia de evaluarlas en relación con las propiedades mecánicas del material. Mientras que la tensión en el Nodo 93 es segura y se encuentra dentro de los límites elásticos, la tensión en el Nodo 21857 es preocupante y necesita una evaluación más profunda.

Desplazamiento

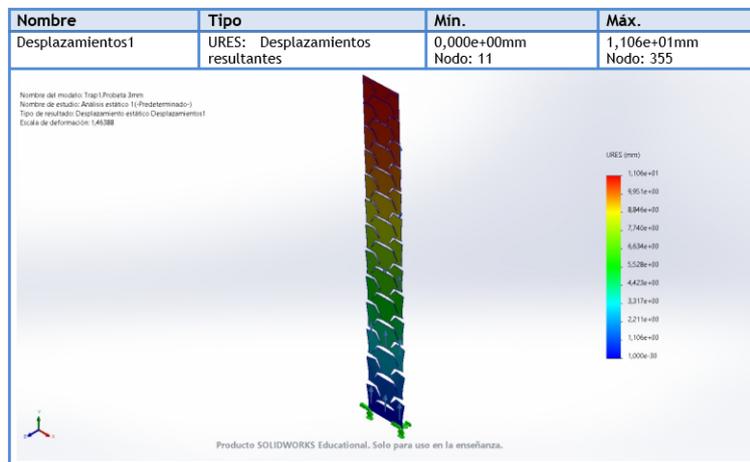


Figura 211. Análisis Estático Una Celda Trapezoidal - Desplazamiento [101].

Desplazamiento Mínimo (Nodo 11): $0,000 \times 10^0 \text{ mm}$

El desplazamiento mínimo de cero en el Nodo 11 sugiere que este nodo está fijo o restringido, lo que significa que no ha experimentado movimiento bajo las condiciones de carga. No se ha producido deformación en este nodo.

Desplazamiento Máximo (Nodo 355): $1,106 \times 10^1 \text{ mm}$ (11,06 mm)

El desplazamiento máximo de 11,06 mm en el Nodo 355 indica que este nodo ha experimentado una deformación considerable debido a las fuerzas aplicadas. Este valor de desplazamiento debe evaluarse en función del tamaño y la función de la estructura para determinar si es aceptable y seguro.

Los desplazamientos resultantes indican que uno de los nodos (Nodo 11) no ha experimentado ninguna deformación, mientras que otro nodo (Nodo 355) ha sufrido una deformación máxima de 11,06 mm. Es importante evaluar esta deformación en relación con las propiedades mecánicas del material [71]. Aunque el desplazamiento en el Nodo 11 parece ser aceptable, es necesario considerar si el desplazamiento en el Nodo 355 se encuentra dentro de una deformación aceptable, sin comprometer la estructura.

Deformaciones Unitarias

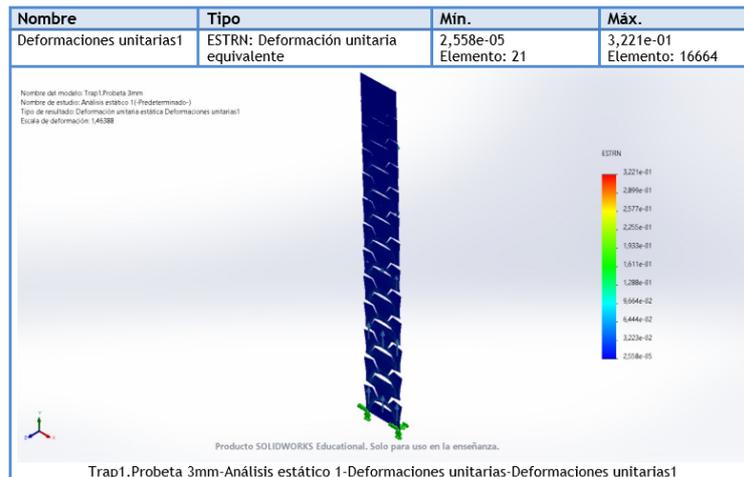


Figura 212. Análisis Estático Una Celda Trapezoidal - Deformaciones Unitarias [101].

Deformación Mínima (Elemento 21): $2,558 \times 10^{-5}$

La deformación mínima en el Elemento 21 es extremadamente pequeña y está muy por debajo del límite elástico del material. Esto indica que el elemento está experimentando una carga que apenas afecta su forma, lo que sugiere un comportamiento elástico lineal en respuesta a las fuerzas aplicadas.

Deformación Máxima (Elemento 16664): $3,221 \times 10^{-1}$

La deformación máxima en el Elemento 16664 es mayor pero aún se encuentra por debajo del límite elástico del material. Sin embargo, esta deformación es más significativa en comparación con la deformación mínima. Esto podría sugerir que el elemento está experimentando cargas más intensas y se está deformando más en respuesta a esas cargas.

Las deformaciones unitarias equivalentes muestran que ambos elementos están dentro del rango elástico del material. El Elemento 21 experimenta una deformación mínima insignificante, mientras que el Elemento 16664 experimenta una deformación máxima mayor pero todavía elástica.

VI-H9. Resultados de Simulación de FEM Tres Celdas - Patrón Trapezoidal:

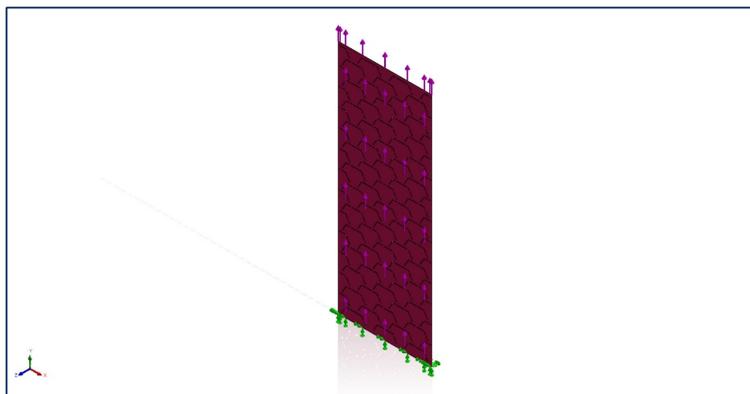


Figura 213. Registro FEM Tres Celdas de Patrón Trapezoidal [102].

Tensión

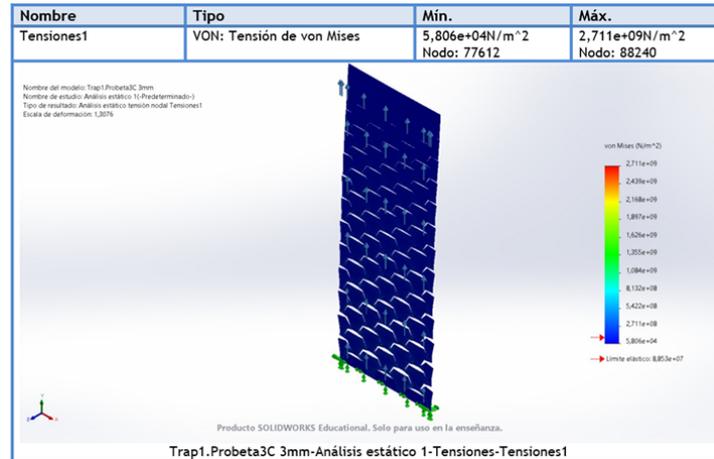


Figura 214. Análisis Estático Tres Celdas Trapezoidal - Tensiones [102].

Tensión Mínima (Nodo 77612): $5,806 \times 10^4 \text{ N/m}^2$

La tensión mínima en el Nodo 77612 es significativamente menor que el límite elástico del material. Esto indica que el nodo está experimentando una carga que está muy por debajo de su capacidad para mantener deformaciones elásticas. No hay riesgo inmediato de deformación permanente o falla en este nodo.

Tensión Máxima (Nodo 88240): $2,711 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

La tensión máxima en el Nodo 88240 es considerablemente mayor que el límite elástico del material. Esto sugiere que el nodo está sometido a una carga que se acerca o incluso supera su capacidad para mantener deformaciones elásticas. Existe un riesgo potencial de deformación plástica o fallo en este nodo si la carga sigue aumentando.

En resumen, los resultados de tensión de von Mises indican que uno de los nodos (Nodo 77612) está experimentando cargas seguras y se encuentra dentro del rango elástico del material. Por otro lado, el otro nodo (Nodo 88240) está sometido a cargas significativas que podrían exceder sus límites elásticos.

Desplazamiento

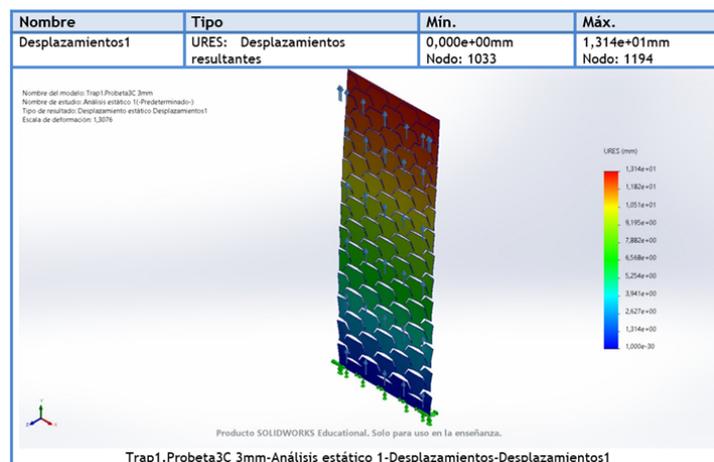


Figura 215. Análisis Estático Tres Celdas Trapezoidal - Desplazamiento [102].

Desplazamiento Mínimo (Nodo 1033): $0,000 \times 10^0$ mm

El desplazamiento mínimo en el Nodo 1033 indica que este nodo está fijo o restringido en su posición bajo las condiciones de carga. No ha habido movimiento ni deformación en este nodo.

Desplazamiento Máximo (Nodo 1194): $1,314 \times 10^1$ mm

El desplazamiento máximo de 13,14 mm en el Nodo 1194 implica que este nodo ha experimentado una deformación considerable debido a las fuerzas aplicadas. La magnitud del desplazamiento sugiere que el nodo se ha movido significativamente en respuesta a las cargas.

En resumen, los desplazamientos resultantes muestran que mientras un nodo (Nodo 1033) permanece fijo sin deformación, otro nodo (Nodo 1194) ha experimentado una deformación máxima de 13,14 mm

Deformaciones Unitarias

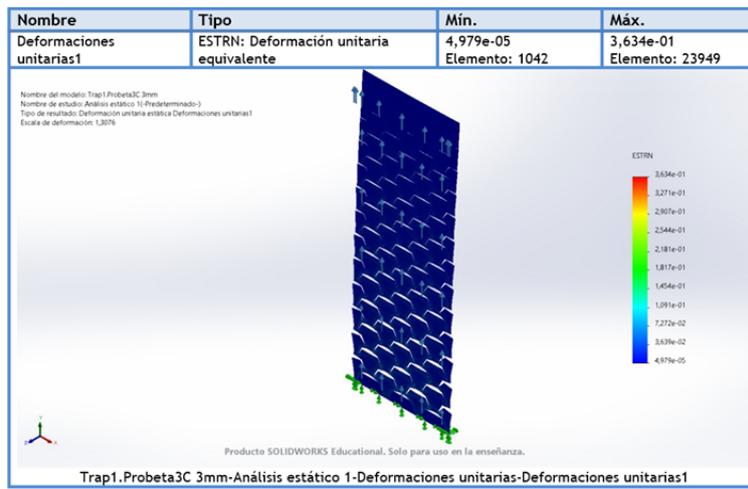


Figura 216. Análisis Estático Tres CeldasTrapezoidal - Deformaciones Unitarias [102].

Deformación Mínima (Elemento 1042): $4,979 \times 10^{-5}$

La deformación mínima en el Elemento 1042 es muy pequeña y se encuentra muy por debajo del límite elástico del material. Esto indica que el elemento está experimentando una carga que apenas afecta su forma y que se mantiene dentro del rango elástico del material.

Deformación Máxima (Elemento 23949): $3,634 \times 10^{-1}$ (0.3634)

La deformación máxima en el Elemento 23949 es más significativa en comparación con la deformación mínima, pero todavía se encuentra por debajo del límite elástico del material. Sin embargo, esta deformación es considerable y sugiere que el elemento ha experimentado una deformación notable debido a las fuerzas aplicadas.

En resumen, los resultados de deformación unitaria equivalente indican que ambos elementos están dentro del rango elástico del material. La deformación en el Elemento 1042 es mínima, lo que sugiere que la carga aplicada no afecta significativamente su integridad. La deformación en el Elemento 23949 es mayor pero aún elástica.

Comparación de Resultados de Tensión:

Tabla LXVII
TENSION MÍNIMA DE VON MISES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES

Configuración	Tensión mínima de von Mises (N/m ²)
Una Celda (Nodo 93)	$5,167 \times 10^4$ N/m ²
Tres Celdas (Nodo 77612)	$5,806 \times 10^4$ N/m ²

Ambas configuraciones muestran tensiones mínimas que están por encima del límite elástico del material. Esto implica que los nodos en ambas configuraciones se encuentran dentro del rango elástico, y no se espera deformación plástica. La configuración de tres celdas tiene una tensión mínima ligeramente mayor en comparación con la configuración de una celda.

Tabla LXVIII
TENSION MÁXIMA DE VON MISES EN DIFERENTES CONFIGURACIONES

Configuración	Tensión máxima de von Mises (N/m ²)
Una Celda (Nodo 21857)	$2,137 \times 10^9$ N/m ²
Tres Celdas (Nodo 88240)	$2,711 \times 10^9$ N/m ²

En ambas configuraciones, las tensiones máximas son significativamente altas y están cerca o superan los límites elásticos del material. Esto sugiere la posibilidad de deformación plástica o incluso fallo en las zonas con tensiones máximas. La configuración de tres celdas muestra una tensión máxima ligeramente mayor en comparación con la configuración de una celda.

Los resultados indican que ambas configuraciones experimentan tensiones máximas cercanas a los límites elásticos del material. Aunque los valores mínimos están dentro del rango elástico, es importante prestar atención a las tensiones máximas para evitar deformaciones permanentes o fallos.

Comparación de Resultados de Desplazamientos resultantes:

Tabla LXIX
DESPLAZAMIENTOS MÍNIMOS

Configuración	Desplazamiento Mínimo
Patrón de Una Celda (Nodo 11)	$0,000 \times 10^0$ mm
Patrón de Tres Celdas (Nodo 1033)	$11,06 \times 10^0$ mm

En ambos patrones, el desplazamiento mínimo es el mismo: $0,000 \times 10^0$ mm. Esto sugiere que hay restricciones o apoyos rígidos en los nodos 11 y 1033 que impiden cualquier desplazamiento medible en esas ubicaciones.

Tabla LXX
DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS

Configuración	Desplazamiento Máximo
Patrón de Una Celda (Nodo 355)	11,06 mm
Patrón de Tres Celdas (Nodo 1194)	13,14 mm

En el patrón de una celda, el desplazamiento máximo es 11,06 mm en el Nodo 355. En el patrón de tres celdas, el desplazamiento máximo es 13,14 mm en el Nodo 1194. Aquí, el patrón de tres celdas muestra un desplazamiento máximo ligeramente mayor que el patrón de una celda.

Ambos patrones de celdas tienen un desplazamiento mínimo igual a cero, lo que sugiere restricciones en esos nodos. Sin embargo, en términos de desplazamiento máximo, el patrón de tres celdas muestra un valor ligeramente mayor en comparación con el patrón de una celda.

Comparación de Resultados de Deformación unitaria equivalente:

Tabla LXXI
DEFORMACIONES MÍNIMAS

Configuración	Deformación Mínima
Patrón de Una Celda (Elemento 21)	$2,558 \times 10^{-5}$
Patrón de Tres Celdas (Elemento 1042)	$4,979 \times 10^{-5}$

La configuración de tres celdas presenta una deformación mínima ligeramente mayor que la configuración de una celda. Ambas deformaciones mínimas indican respuestas predominantemente elásticas en las áreas evaluadas.

Tabla LXXII
DEFORMACIONES MÁXIMAS

Configuración	Deformación Máxima
Patrón de Una Celda (Elemento 16664)	$3,221 \times 10^{-1}$
Patrón de Tres Celdas (Elemento 23949)	$3,634 \times 10^{-1}$

Ambas configuraciones muestran deformaciones máximas comparables en las áreas evaluadas. Las deformaciones máximas indican la presencia de deformación plástica bajo las condiciones de carga y geometría actuales.

En ambas comparaciones, las diferencias en las deformaciones unitarias equivalentes son relativamente pequeñas entre las configuraciones de una celda y tres celdas. Esto sugiere que, en las ubicaciones evaluadas, la geometría de la celda no tiene un impacto significativo en las deformaciones registradas.

VI-I. Resultados de ensayos de tracción

Análisis de los datos obtenidos

En el contexto del estudio, se incluyó una probeta sin cortes que representa el material en su estado original, sin patrones de corte o deformaciones predefinidas. Esta probeta es esencial para establecer una referencia sólida y comprender las propiedades mecánicas fundamentales del material. A través de pruebas meticulosas, se registró datos cruciales que incluyen la fuerza máxima que el material puede soportar, el módulo elástico que describe su capacidad de recuperación, y la tensión máxima experimentada. Además, hemos observado cómo se comporta en términos de desplazamiento y deformación bajo cargas variables. Estos resultados proporcionarán una base sólida para comparar y contrastar con otras probetas que presentan patrones de corte específicos, lo que nos permitirá analizar cómo estos patrones influyen en las propiedades del material y su capacidad de adaptación.

En general, todas las probetas comparten un patrón de "Sin corte", lo que sugiere que no se aplicaron cortes o modificaciones en la forma de las probetas antes de realizar las pruebas de tracción. Las probetas tienen una anchura constante de 20,78 mm y una longitud calibrada de 100 mm.

Las propiedades mecánicas medidas incluyen:

- LE1_Fuerza: Representa la fuerza aplicada a la probeta en la primera etapa de la prueba. Las magnitudes varían para cada probeta, indicando que diferentes niveles de fuerza fueron necesarios para iniciar la deformación.
- Rotura_Fuerza: Es la fuerza máxima que una probeta puede soportar antes de fracturarse. Las magnitudes varían significativamente entre las probetas, lo que sugiere variabilidad en la resistencia de los materiales.
- Modulo elástico: Es una medida de la rigidez del material. Cuanto mayor sea el valor, más rígido es el material.
- Max_Fuerza: Representa la máxima fuerza aplicada a la probeta antes de la rotura. Las variaciones indican diferentes niveles de resistencia al desgaste.
- Max_Desplazamiento: Es la máxima deformación que experimenta la probeta antes de la rotura. Las variaciones indican diferentes niveles de ductilidad y flexibilidad de los materiales.
- Tension máxima: Es la máxima tensión que alcanza la probeta antes de la rotura. Las variaciones indican diferentes comportamientos de resistencia.
- Rotura_tension: Es la tensión en el punto de rotura de la probeta. Valores negativos pueden indicar una falta de adherencia adecuada en la superficie de rotura.
- Máxima deformación: Indica el porcentaje de deformación máxima que la probeta puede soportar antes de la rotura. Las variaciones reflejan diferentes niveles de ductilidad y maleabilidad.

Probeta#1 Sin cortes

Esta probeta presenta una fuerza máxima de 70.43 N, un módulo elástico de 5895.10 N/mm² y una máxima deformación del 28.78 %. Se observa que la rotura de la probeta ocurrió a una fuerza muy baja de 0.14 N, lo que indica una fragilidad inusual en este caso.

Tabla LXXIII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#1 SIN CORTES

Probeta#1	
Tipo de patrón	Sin corte
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
LE1_Fuerza	70,4289 N
Rotura_Fuerza	0,14305 N
Módulo elástico	5895,10 N/mm ²
Max_Fuerza	163,698 N
Max_Desplazamiento	28,7763 mm
Rotura_Desplazamiento	29,4513 mm
LE1_Desplazamiento	1,39293 mm
Tensión máxima	157,553 Mpa
Rotura_tensión	0,13768 N/mm ²
Máxima tensión	157,554 N/mm ²
Máxima deformación	28,78 %
LE1_Tensión	67,7852 N/mm ²
LE1_Deformación	1,39 %
Pend_Standard	61,2501 N/mm

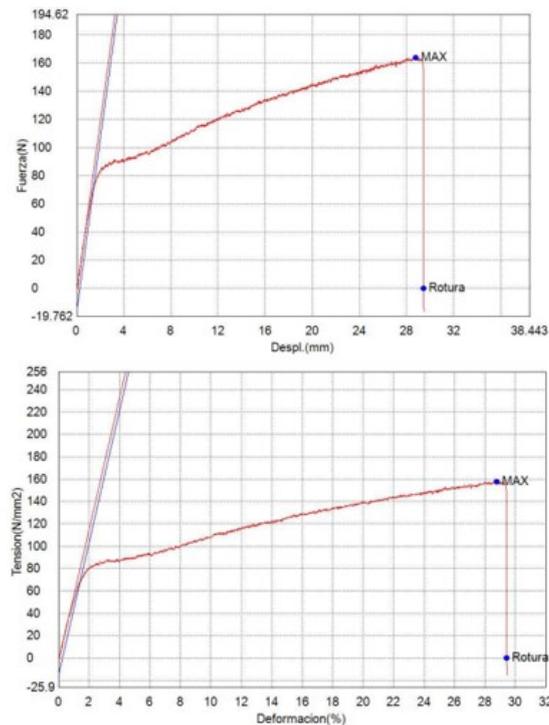


Figura 217. Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#1[103]

Probeta#2 Sin cortes

En esta probeta, la fuerza máxima es de 71.00 N, con un módulo elástico de 4830.24 N/mm² y una máxima deformación del 14.29 %. La rotura de la probeta ocurrió a una fuerza significativamente mayor de 4.34 N en comparación con la probeta #1.

Tabla LXXIV
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#2 SIN CORTES

Probeta#2	
Tipo de patrón	Sin corte
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
LE1_Fuerza	71,0011 N
Rotura_Fuerza	4,33922 N
Módulo elástico	4830,24 N/mm ²
Max_Fuerza	124,550 N
Max_Desplazamiento	14,2929 mm
Rotura_Desplazamiento	14,5753 mm
LE1_Desplazamiento	1,68461 mm
Tensión máxima	119,875 Mpa
Rotura_tensión	4,17634 N/mm ²
Máxima tensión	119,875 N/mm ²
Máxima deformación	14,29 %
LE1_Tensión	8,3360 N/mm ²
LE1_Deformación	1,68 %
Pend_Standard	50,1862 N/mm

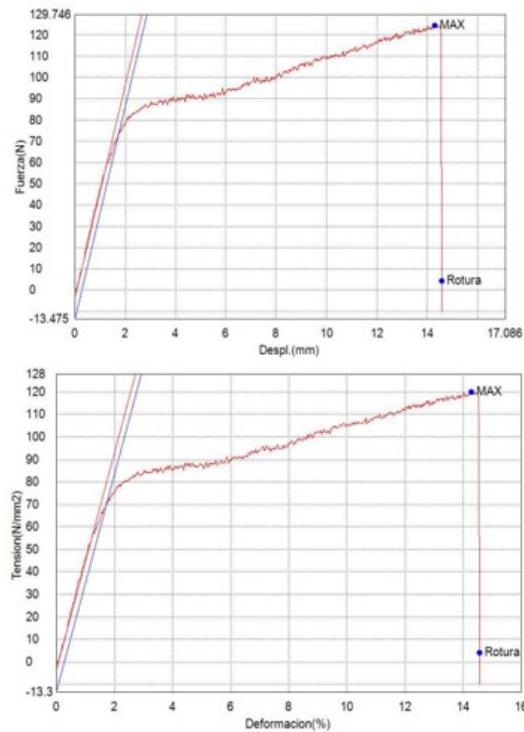


Figura 218. Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#2[103]

Probeta#3 Sin cortes

La probeta #3 muestra una fuerza máxima de 85.74 N, un módulo elástico de 4021.27 N/mm² y una máxima deformación del 21.96 %. Notablemente, la rotura de esta probeta se registró con una fuerza negativa de -3.10 N, lo que sugiere una posible falla en el proceso de medición o una respuesta atípica.

Tabla LXXV
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#3 SIN CORTES

Probeta#3	
Tipo de patrón	Sin corte
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
LE1_Fuerza	85,7353 N
Rotura_Fuerza	-3,09944 N
Módulo elástico	4021,27 N/mm ²
Max_Fuerza	155,067 N
Max_Desplazamiento	21,9556 mm
Rotura_Desplazamiento	22,3832 mm
LE1_Desplazamiento	2,26793 mm
Tensión máxima	149,246 Mpa
Rotura_tensión	-2,98310 N/mm ²
Máxima tensión	149,247 N/mm ²
Máxima deformación	21,96 %
LE1_Tensión	85,5172 N/mm ²
LE1_Deformación	2,27 %
Pend_Standard	41,7810 N/mm

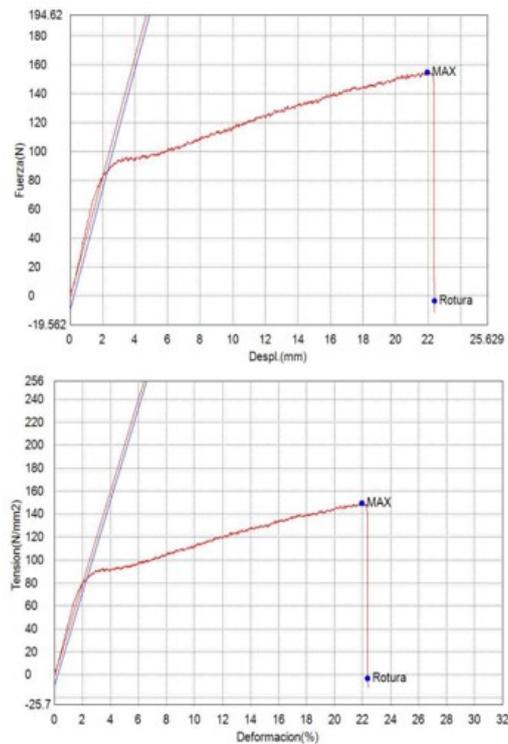


Figura 219. Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#3[103]

Probeta#4 Sin cortes

Finalmente, la probeta #4 exhibe una fuerza máxima de 66.52 N, un módulo elástico de 5326.45 N/mm² y una máxima deformación del 45.66 %. La rotura ocurrió a una fuerza de 6.06 N, siendo esta probeta la que requirió la mayor fuerza para romperse entre todas.

Tabla LXXVI
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#4 SIN CORTES

Probeta#4	
Tipo de patrón	Sin corte
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
LE1_Fuerza	66,5188 N
Rotura_Fuerza	6,05583 N
Módulo elástico	5326,45 N/mm ²
Max_Fuerza	182,581 N
Max_Desplazamiento	45,6596 mm
Rotura_Desplazamiento	46,6512 mm
LE1_Desplazamiento	1,41794 mm
Tensión máxima	175,728 Mpa
Rotura_tensión	5,82852 N/mm ²
Máxima tensión	175,728 N/mm ²
Máxima deformación	45,66 %
LE1_Tensión	64,0219 N/mm ²
LE1_Deformación	1,42 %
Pend_Standard	55,3418 N/mm

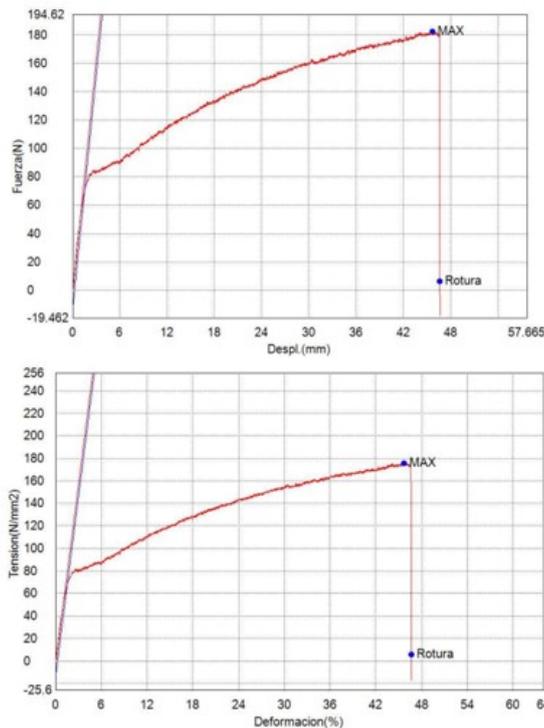


Figura 220. Gráfico de fuerza y tensión de la probeta sin corte#4[103]

Basados en los resultados, se puede concluir que las propiedades mecánicas de las probetas no varían tanto entre ellas. En la subsección “Simulación para la obtención de datos técnicos del material” se especifica un valor el cual es de 4.33Gpa este valor es el que en investigaciones anteriores fue validado. Entonces en base a ese valor se puede obtener una mejor conclusión e interpretación de los resultados que se obtuvo en la máquina de ensayos.

Comparando los valores transformados de módulo elástico con el dato correcto de 4.33 GPa, podemos observar lo siguiente:

Tabla LXXVII
MODULO ELÁSTICO DE PROBETAS

Probeta#1	5.89510 GPa
Probeta#2	4.83024 GPa
Probeta#3	4.02127 GPa
Probeta#4	5.32645 Gpa

En comparación con este valor es evidente que las probetas #1 y #4 tienen valores más altos que el valor correcto, mientras que las probetas #2 y #3 tienen valores más bajos. Esto podría indicar que las probetas #1 y #4 son más rígidas de lo esperado, mientras que las probetas #2 y #3 son menos rígidas.

Patrón lineal

El presente estudio se enfoca en la realización de ensayos de tracción en tres probetas lineales, denotadas como probeta #1, probeta #2 y probeta #3. Cada una de estas probetas fue sometida a una evaluación minuciosa para determinar sus características mecánicas y su respuesta frente a cargas de tracción.

Probeta#1 del Patrón Lineal: 2 celdas

La probeta #1 se caracterizó por la utilización de dos celdas en el ensayo de tracción. La geometría comprendió una anchura de 24 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 8,29697 N, acompañada por un desplazamiento máximo de 218,860 mm. Este conjunto de parámetros condujo a una deformación máxima del material del 218,86 %. La considerable magnitud de la deformación indica una notoria extensión antes de la ruptura. La probeta #1 exhibió una respuesta mecánica sobresaliente, destacándose por su elevada resistencia y capacidad de deformación.

Tabla LXXVIII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#1 CON UN PATRÓN LINEAL

Probeta#1	
Tipo de patrón	Lineal
Número de celdas	2
Anchura	24 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	8.29697 N
Máximo desplazamiento	218.860 mm
Máxima deformación	218.86 %

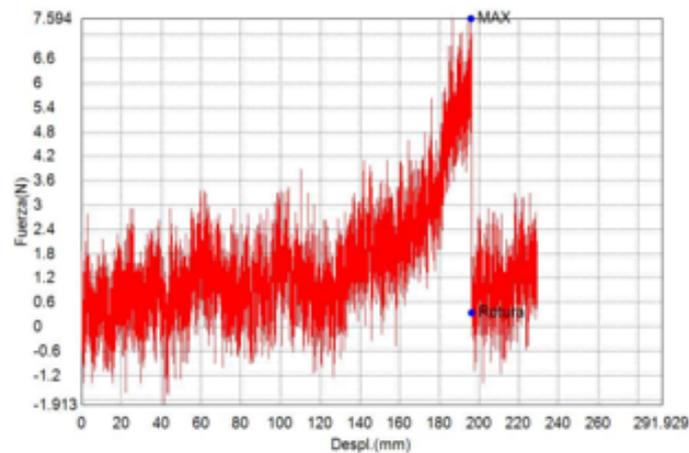


Figura 221. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón lineal de 2 celdas [103]

Probeta#2 del Patrón Lineal: 2 celdas

La probeta #2 también se sometió a un ensayo con dos celdas y una geometría idéntica, caracterizada por una anchura de 24 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el proceso, se obtuvo una máxima fuerza de tracción de 5,24521 N, junto con un desplazamiento máximo de 199,735 mm. En consecuencia, se alcanzó una deformación máxima del 199,74 %. Al igual que en el caso anterior, se observó una deformación significativa antes de la fractura, aunque con una fuerza máxima menor en comparación.

Tabla LXXIX
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#2 CON UN PATRÓN LINEAL

Probeta#2	
Tipo de patrón	Lineal
Número de celdas	2
Anchura	24 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	5,24521 N
Máximo desplazamiento	199,735 mm
Máxima deformación	199,74 %

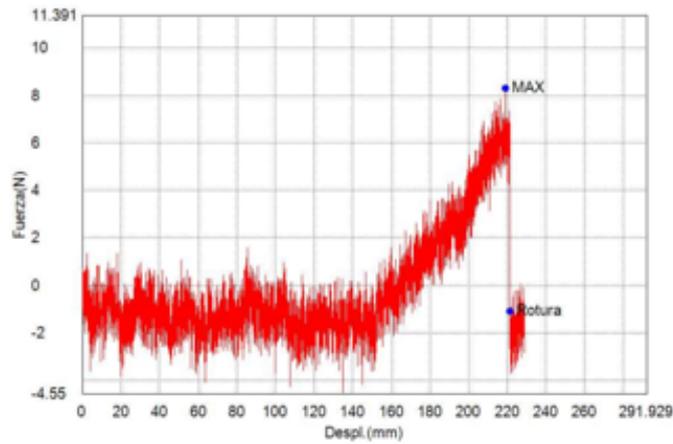


Figura 222. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón lineal de 2 celdas[103]

Probeta#3 del Patrón Lineal: 2 celdas

La probeta #3, siguiendo la misma configuración geométrica y de celdas, presentó dimensiones de 24 mm de anchura y 100 mm de longitud calibrada. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 7,58171 N, acompañada por un desplazamiento máximo de 195,893 mm. La consecuente deformación máxima alcanzó el 195,89 %. Como en los casos anteriores, esta probeta exhibió una destacada capacidad de deformación, junto con una resistencia considerable.

Tabla LXXX
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#3 CON UN PATRÓN LINEAL

Probeta#3	
Tipo de patrón	Lineal
Número de celdas	2
Anchura	24 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	7,58171 N
Máximo desplazamiento	195,893 mm
Máxima deformación	195,89 %

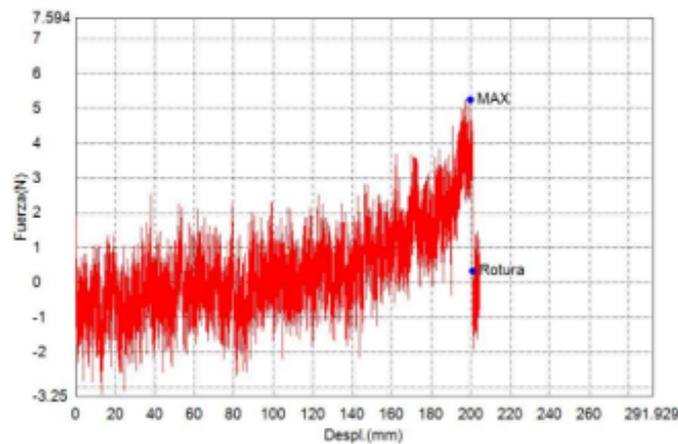


Figura 223. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón lineal de 2 celdas[103]

Conclusiones:

En resumen, los ensayos de tracción aplicados en las probetas lineales han permitido observar que todas ellas presentan una notoria capacidad de deformación antes de la ruptura. A pesar de las diferencias en cuanto a resistencia, es evidente que comparten un patrón común de comportamiento mecánico, caracterizado por una amplia elongación previa a la fractura.

El valor de la extensión antes de la ruptura en todas las probetas es un indicio destacable de su capacidad para soportar considerables tensiones y cargas. Un dato importante para resaltar es que este tipo de probetas a pesar de su gran desplazamiento en su deformación nunca vuelven a ser igual, es decir no recuperan su forma original diferenciándose de otros tipos de patrones como el trapecoidal o el triangular.

El presente estudio se centra en la realización y análisis de ensayos de tracción aplicados a cuatro probetas lineales, identificadas como Probeta#1, Probeta#2, Probeta#3 y Probeta#4. Cada probeta fue sometida a un proceso meticuloso de evaluación con el propósito de determinar sus propiedades mecánicas y su respuesta ante cargas de tracción.

Probeta#1 del Patrón Lineal: 6 celdas

La Probeta#1 fue sometida a un ensayo de tracción bajo un patrón de carga lineal. Con un diseño que incorpora seis celdas, esta probeta posee una anchura de 72 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 18,5490 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 217,860 mm, resultando en una deformación máxima del 217,86 %. Estos valores revelan una significativa capacidad de deformación antes de la ruptura, señalando la ductilidad y el comportamiento mecánico del material.

Tabla LXXXI
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#1 CON UN PATRON LINEAL

Probeta#1	
Tipo de patrón	Lineal
Número de celdas	6
Anchura	72 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	18,5490 N
Máximo desplazamiento	217,860 mm
Máxima deformación	217,86 %

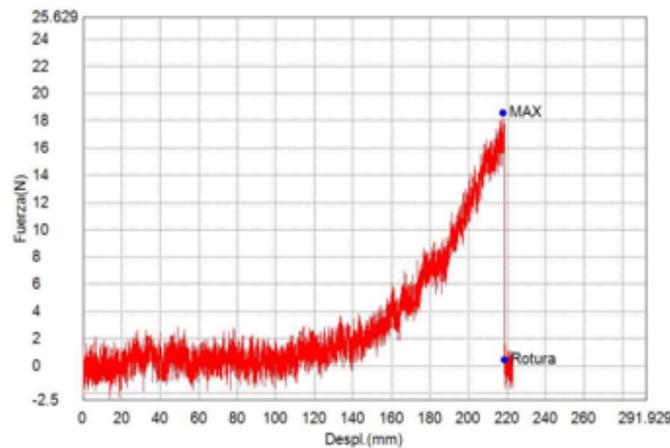


Figura 224. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón lineal de 6 celdas[103]

Probeta#2 del Patrón Lineal: 6 celdas

Similarmente, la Probeta#2 se sometió a un ensayo de tracción bajo el mismo patrón lineal y con seis celdas activas. Su diseño presenta una anchura de 72 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 13,2084 N. El desplazamiento máximo fue de 199,410 mm, con una deformación máxima del 199,41 %. La alta elongación observada antes de la ruptura confirma la capacidad del material para soportar cargas considerables.

Tabla LXXXII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#2 CON UN PATRON LINEAL

Probeta#2	
Tipo de patrón	Lineal
Número de celdas	6
Anchura	72 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	13,2084 N
Máximo desplazamiento	199,410 mm
Máxima deformación	199,41 %

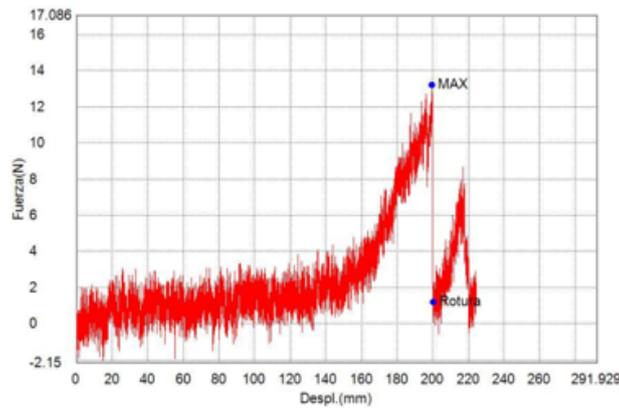


Figura 225. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón lineal de 6 celdas [103]

Probeta#3 del Patrón Lineal: 6 celdas

La Probeta#3 también siguió el mismo patrón de carga lineal y se caracterizó por seis celdas activas. Con una anchura de 72 mm y una longitud calibrada de 100 mm, se registró una máxima fuerza de tracción de 11,1103 N durante el ensayo. El desplazamiento máximo fue de 190,810 mm, resultando en una deformación máxima del 190,81 %. Estos resultados señalan una respuesta mecánica predecible y coherente con los materiales de la probeta.

Tabla LXXXIII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#3 CON UN PATRON LINEAL

Probeta#3	
Tipo de patrón	Lineal
Número de celdas	6
Anchura	72 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	11,1103 N
Máximo desplazamiento	190,810 mm
Máxima deformación	190,81 %

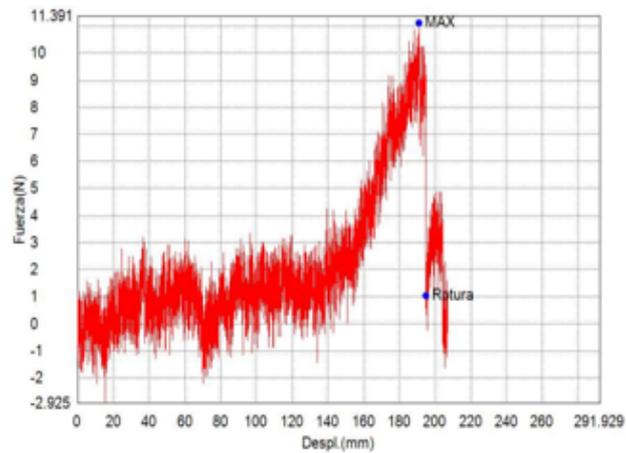


Figura 226. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón lineal de 6 celdas[103]

Probeta#4 del patrón Lineal: 6 celdas

Finalmente, la Probeta#4 fue ensayada bajo el mismo patrón lineal, presentando seis celdas activas. Su geometría incluye una anchura de 72 mm y una longitud calibrada de 100 mm. La máxima fuerza registrada durante el ensayo fue de 16,0694 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 206,676 mm, con una deformación máxima del 206,68 %. Estos valores reafirman la tendencia de elongación previa a la ruptura observada en las demás probetas.

Tabla LXXXIV

TABLA DE ESPECIFICACIONES DE UNA PRUEBA DE TRACCIÓN EN BASE A UN PATRÓN LINEAL

Probeta#4	
Tipo de patrón	Lineal
Número de celdas	6
Anchura	72 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	16,0694
Máximo desplazamiento	206,676 mm
Máxima deformación	206,68 %

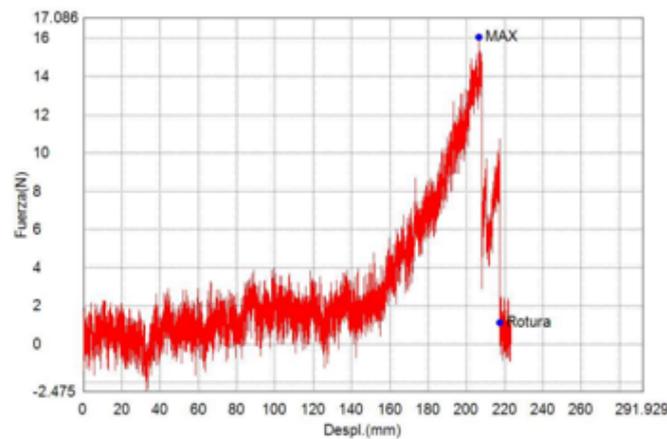


Figura 227. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#4 con un patrón lineal de 6 celdas[103]

Conclusiones:

En conclusión, los resultados de los ensayos de tracción en las cuatro probetas lineales indican un comportamiento mecánico caracterizado por una alta capacidad de deformación antes de la ruptura. Las diversas magnitudes de máxima fuerza registrada pueden ser atribuidas a las propiedades intrínsecas de los materiales utilizados en cada probeta. Los valores de deformación, particularmente elevados, apuntan a una ductilidad pronunciada en los materiales.

Finalmente y como se puede observar los altos valores de estas 4 probetas con 6 celdas marcan una gran diferencia de los datos anteriores afirmando así que un patrón lineal con 6 celdas posee una mayor deformación pero no un gran desplazamiento dado a que ambas se desplazan a una gran magnitud.

Patrón trapezoidal

El presente estudio se enmarca en la ejecución y análisis de ensayos de tracción aplicados a tres probetas de configuración trapezoidal con una sola celda activa, denominadas Probeta#1, Probeta#2 y Probeta#3. El objetivo primordial radica en la evaluación exhaustiva de sus propiedades mecánicas y su respuesta ante cargas de tracción. Además, se busca contrastar estos resultados con los valores previamente obtenidos tanto en probetas lineales como trapezoidales de tres celdas.

Probeta#1 del Patrón Trapezoidal: 1 celda

La Probeta#1 fue sometida a un ensayo de tracción bajo un patrón de carga trapezoidal, presentando una sola celda activa. Su geometría comprendió una anchura de 20,78 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 8,39233 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 69,5430 mm, generando una deformación máxima del 69,54 %. Estos valores demuestran una capacidad de deformación considerable antes de la ruptura.

Tabla LXXXV

VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#1 CON UN PATRÓN TRAPEZOIDAL

Probeta#1	
Tipo de patrón	Trapezoidal
Número de celdas	1
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	8,39233 N
Máximo desplazamiento	69,5430 mm
Máxima deformación	69,54 %

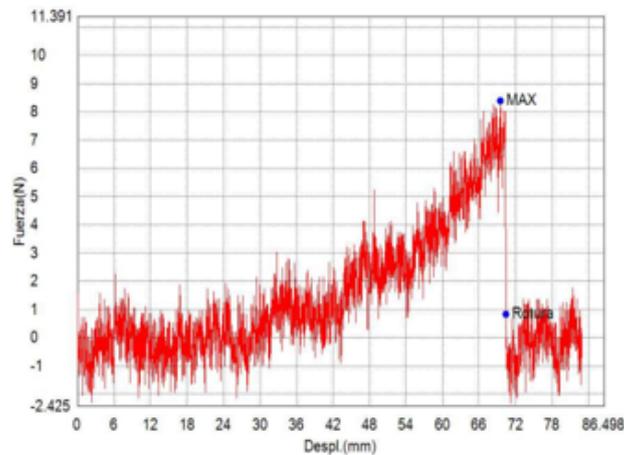


Figura 228. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón trapezoidal de 1 celda [103]

Probeta#2 del Patrón Trapezoidal: 1 celda

La Probeta#2 también fue sometida a un ensayo bajo el mismo patrón trapezoidal, presentando una sola celda activa. Su diseño comprendió una anchura de 20,78 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 8,86917 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 68,2013 mm, resultando en una deformación máxima del 68,20 %. Estos valores evidencian una respuesta mecánica consistente en términos de deformación y capacidad de carga.

Tabla LXXXVI
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#2 CON UN PATRÓN TRAPEZOIDAL

Probeta#2	
Tipo de patrón	Trapezoidal
Número de celdas	1
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	8,86917 N
Máximo desplazamiento	68,2013 mm
Máxima deformación	68,20 %

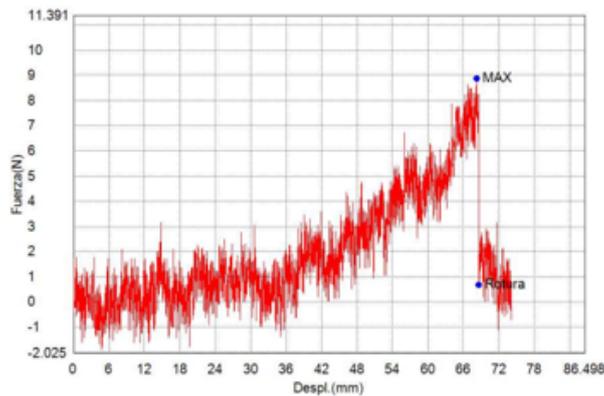


Figura 229. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón trapezoidal de 1 celda[103]

Probeta#3 del Patrón Trapezoidal: 1 celda

La Probeta#3 siguió el mismo patrón de carga trapezoidal y presentó una única celda activa. Con una anchura de 20,78 mm y una longitud calibrada de 100 mm, se registró una máxima fuerza de tracción de 7,77245 N durante el ensayo. El desplazamiento máximo fue de 70,1179 mm, resultando en una deformación máxima del 70,12 %. Estos resultados subrayan una característica compartida de alta deformación en probetas trapezoidales de una sola celda.

Tabla LXXXVII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#3 CON UN PATRON TRAPEZOIDAL

Probeta#3	
Tipo de patrón	Trapezoidal
Número de celdas	1
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	7,77245 N
Máximo desplazamiento	70,1179 mm
Máxima deformación	70,12 %

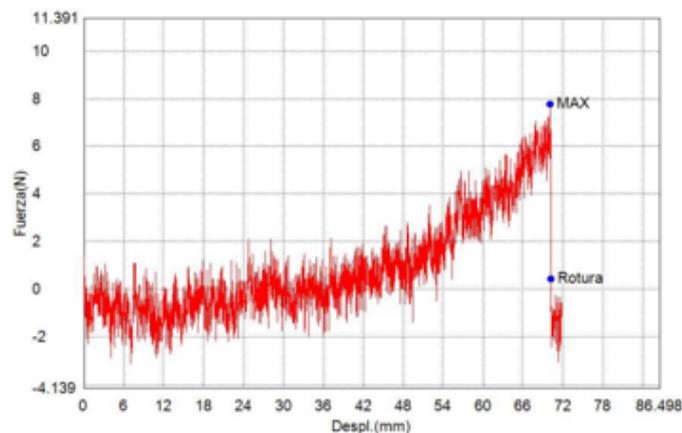


Figura 230. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón trapezoidal de 1 celda[103]

Comparación con Probetas Lineales y Trapezoidales de 3 Celdas:

En contraste con los valores obtenidos previamente tanto en probetas lineales como en probetas trapezoidales de tres celdas, se observa que las probetas trapezoidales con una única celda activa exhiben una capacidad de deformación aún más pronunciada antes de la ruptura. Estos resultados son esperables, ya que la configuración trapezoidal tiende a proporcionar una mayor resistencia y capacidad de deformación ante cargas de tracción, independientemente del número de celdas activas.

Conclusiones:

En resumen, los ensayos de tracción en probetas trapezoidales de una sola celda han revelado una característica mecánica distintiva: la capacidad de deformación significativamente alta antes de la ruptura. La configuración trapezoidal muestra una tendencia inherente a soportar cargas de tracción con una elongación destacada, reforzando su naturaleza resistente.

La comparación y análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de tracción realizados en probetas lineales de dos celdas y probetas trapezoidales de una sola celda revelan diferencias notables en cuanto a sus respuestas

mecánicas ante cargas de tracción. Estas diferencias proporcionan una comprensión más profunda de cómo la configuración geométrica y el número de celdas afectan las propiedades mecánicas de los materiales en diferentes escenarios.

Las probetas lineales de dos celdas exhibieron una tendencia a una capacidad de deformación significativamente alta antes de la ruptura. Los valores máximos de fuerza de tracción registrados oscilaron en un rango de 11,1103 N a 18,5490 N, mientras que los desplazamientos máximos variaron de 190,810 mm a 217,860 mm, generando deformaciones máximas del 190,81 % al 217,86 %. Estos resultados destacan la ductilidad y la capacidad de absorción de energía de las probetas lineales, indicando su idoneidad para aplicaciones donde la deformación plástica es deseada.

Por otro lado, las probetas trapezoidales de una sola celda presentaron una capacidad de deformación aún más pronunciada. Las máximas fuerzas de tracción registradas variaron de 7,77245 N a 8,86917 N, con desplazamientos máximos entre 68,2013 mm y 70,1179 mm, resultando en deformaciones máximas del 68,20 % al 70,12 %. Estos resultados resaltan la resistencia inherente de las probetas trapezoidales y su capacidad para soportar cargas de tracción con un grado notable de elongación.

En general, la configuración trapezoidal de las probetas parece favorecer una mayor resistencia y capacidad de deformación en comparación con las probetas lineales. Esta tendencia puede atribuirse a la distribución de tensiones resultante de la geometría trapezoidal, que permite una mayor distribución de la carga y una mayor absorción de energía antes de la ruptura. Estas diferencias en la respuesta mecánica entre las dos configuraciones tienen implicaciones importantes en la selección de materiales y geometrías en aplicaciones donde la resistencia y la capacidad de deformación son factores clave.

El presente estudio se concentra en la realización y análisis de ensayos de tracción aplicados a cuatro probetas de configuración trapezoidal, identificadas como Probeta#1, Probeta#2, Probeta#3 y Probeta#4. Cada probeta fue sometida a un riguroso proceso de evaluación con el fin de determinar sus características mecánicas y su respuesta ante cargas de tracción, en contraste con los valores previamente analizados en probetas lineales.

Probeta#1 del Patrón Trapezoidal: 3 celdas

La Probeta#1 fue sometida a un ensayo de tracción bajo un patrón de carga trapezoidal. La probeta presentó tres celdas activas y se caracterizó por una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 15,0204 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 57,2096 mm, resultando en una deformación máxima del 57,21 %. Estos valores indican una significativa capacidad de deformación antes de la fractura, atribuible a la configuración trapezoidal y a las propiedades del material.

Tabla LXXXVIII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#1 CON UN PATRÓN TRAPEZOIDAL

Probeta#1	
Tipo de patrón	Trapezoidal
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	15,0204
Máximo desplazamiento	57,2096 mm
Máxima deformación	57,21 %

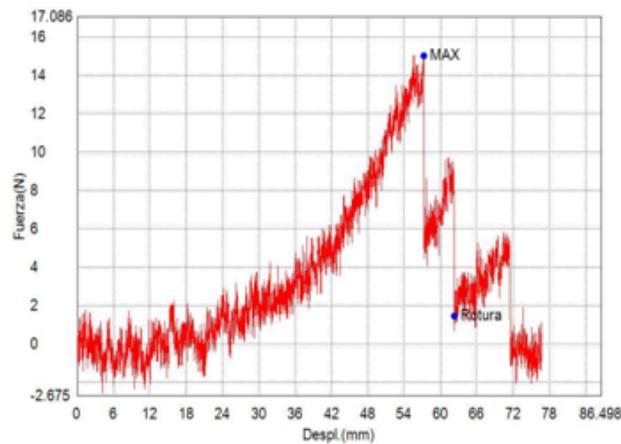


Figura 231. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón trapezoidal de 3 celdas[103]

Probeta#2 del Patrón Trapezoidal: 3 celdas

La Probeta#2 también fue ensayada bajo un patrón de carga trapezoidal y con tres celdas activas. Su diseño comprendió una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 11,5395 N. El desplazamiento máximo fue de 53,8596 mm, generando una deformación máxima del 53,86 %. Estos valores confirman una capacidad de deformación pronunciada, característica de la configuración trapezoidal.

Tabla LXXXIX
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#2 CON UN PATRÓN TRAPEZOIDAL

Probeta#2	
Tipo de patrón	Trapezoidal
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	11,5395 N
Máximo desplazamiento	53,8596 mm
Máxima deformación	53,86 %

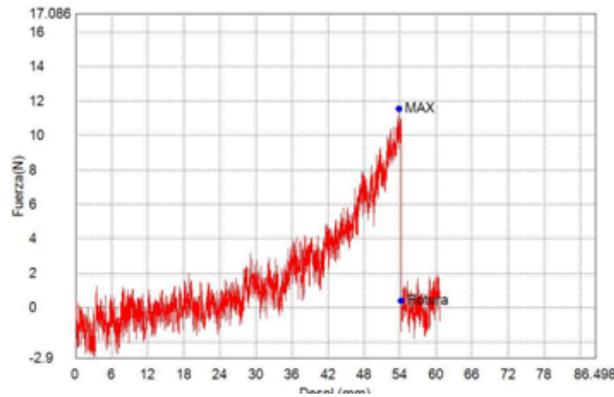


Figura 232. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón trapezoidal de 3 celdas[103]

Probeta#3 del Patrón Trapezoidal: 3 celdas

Similarmente, la Probeta#3 siguió el patrón de carga trapezoidal y se distinguió por tres celdas activas. Con una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm, se registró una máxima fuerza de tracción de 7,58171 N durante el ensayo. El desplazamiento máximo fue de 51,0263 mm, resultando en una deformación máxima del 51,03 %. Estos resultados demuestran una tendencia consistente de alta capacidad de deformación ante cargas de tracción.

Tabla XC
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#3 CON UN PATRÓN TRAPEZOIDAL

Probeta#3	
Tipo de patrón	Trapezoidal
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	7,58171 N
Máximo desplazamiento	51,0263 mm
Máxima deformación	51,03 %

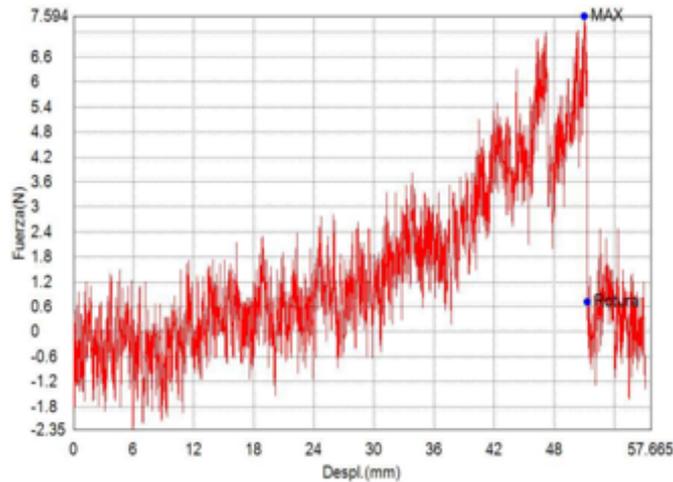


Figura 233. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón trapezoidal de 3 celdas[103]

Probeta#4 del Patrón Trapezoidal: 3 celdas

La Probeta#4 fue sometida al mismo patrón de carga trapezoidal, con tres celdas activas. Su geometría comprendió una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 9,96590 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 59,1013 mm, resultando en una deformación máxima del 59,10 %. Estos valores destacan la capacidad de deformación característica de las probetas trapezoidales.

Tabla XCI
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#4 CON UN PATRÓN TRAPEZOIDAL

Probeta#4	
Tipo de patrón	Trapezoidal
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	9,96590 N
Máximo desplazamiento	59,1013mm
Máxima deformación	59,10 %

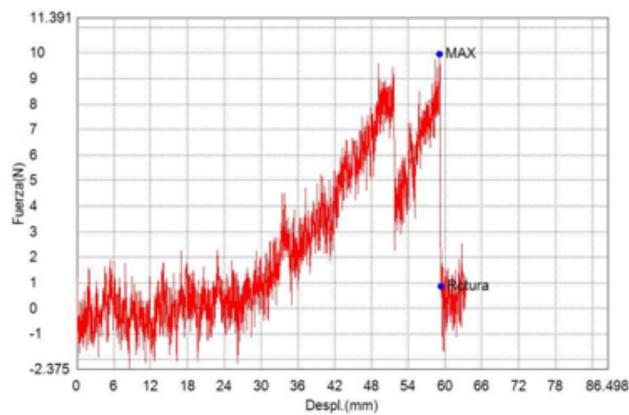


Figura 234. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#4 con un patrón trapezoidal de 3 celdas [103]

Comparación con Probetas Lineales:

En comparación con los valores previamente analizados en probetas lineales, se observa que las probetas trapezoidales exhiben una capacidad de deformación relativamente menor antes de la ruptura. A pesar de una longitud calibrada idéntica, las probetas trapezoidales presentan desplazamientos y deformaciones máximas inferiores. Esto puede atribuirse a la configuración geométrica trapezoidal, que ofrece una resistencia mayor frente a las cargas de tracción.

Conclusiones:

En resumen, los ensayos de tracción en probetas trapezoidales resaltan una respuesta mecánica caracterizada por una capacidad de deformación considerable, aunque ligeramente inferior en comparación con las probetas lineales previamente analizadas. La configuración trapezoidal muestra una tendencia a soportar cargas de tracción con una menor elongación antes de la ruptura, destacando su resistencia inherente.

Patrón triangular

En esta ocasión se llevaron a cabo ensayos de tracción en probetas triangulares con una sola celda activa, denominadas Probeta#1 y Probeta#2. El objetivo fundamental fue evaluar sus propiedades mecánicas y analizar su comportamiento frente a cargas de tracción. Paralelamente, se buscó contrastar estos resultados con los valores previamente obtenidos en probetas lineales de 2 a 6 celdas y probetas trapezoidales de 1 a 3 celdas, con el fin de destacar las diferencias inherentes entre las distintas configuraciones geométricas.

Probeta #1 del Patrón Triangular: 1 celda

La Probeta#1, de configuración triangular con una sola celda activa, fue sometida a un ensayo de tracción. Presentando una anchura de 20,78 mm y una longitud calibrada de 100 mm, se registró una máxima fuerza de tracción de 7,62940 N. El desplazamiento máximo alcanzado durante el ensayo fue de 58,6179 mm, generando una deformación máxima del 58,62 %. Estos resultados resaltan la capacidad de la probeta triangular de una celda para deformarse significativamente antes de la ruptura.

Tabla XCII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#1 CON UN PATRÓN TRIANGULAR

Probeta#1	
Tipo de patrón	Triangular
Número de celdas	1
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	7,62940 N
Máximo desplazamiento	58,6179 mm
Máxima deformación	58,62 %

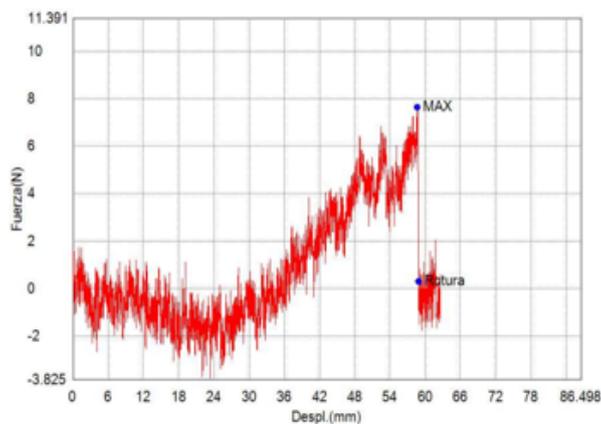


Figura 235. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón triangular de 1 celda[103]

Probeta#2 del Patrón Triangular: 1 celda

La Probeta#2, también de configuración triangular con una sola celda activa, se sometió a un ensayo bajo un patrón de carga de tracción. Con una anchura de 20,78 mm y una longitud calibrada de 100 mm, se registró una máxima fuerza de tracción de 5,41548 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 52,2096 mm, generando una deformación máxima del 52,21 %. Estos resultados evidencian una capacidad de deformación destacada, coherente con la configuración triangular de la probeta.

Tabla XCIII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#2 CON UN PATRÓN TRIANGULAR

Probeta#2	
Tipo de patrón	Triangular
Número de celdas	1
Anchura	20,78 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	5,41548 N
Máximo desplazamiento	52,2096 mm
Máxima deformación	52,21 %

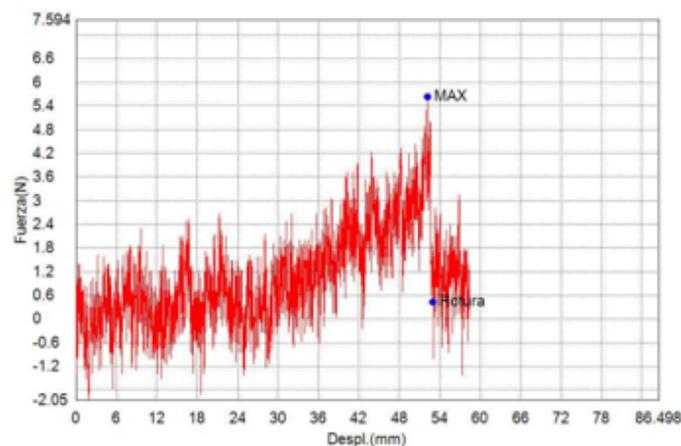


Figura 236. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón triangular de 1 celda[103]

Comparación con Configuraciones Geométricas Anteriores:

Al comparar los resultados de las probetas triangulares de una sola celda con los valores previamente obtenidos en probetas lineales de 2 a 6 celdas y probetas trapezoidales de 1 a 3 celdas, se destaca que las probetas triangulares de una celda generan deformaciones notables antes de la ruptura. Aunque sus deformaciones son menores en comparación con las probetas lineales de mayor cantidad de celdas, las probetas triangulares siguen exhibiendo una respuesta mecánica con una capacidad de absorción de energía relevante.

Conclusiones:

En resumen, los ensayos de tracción realizados en probetas triangulares de una sola celda han brindado un entendimiento profundo de su respuesta mecánica. Las configuraciones triangulares de una celda permiten una deformación considerable antes de la ruptura, destacando su capacidad para absorber energía. Aunque presentan deformaciones menores en comparación con las probetas lineales de mayor cantidad de celdas, las probetas triangulares aún conservan su capacidad inherente para soportar cargas de tracción y deformarse significativamente. Estos resultados ofrecen una visión valiosa al seleccionar la configuración geométrica adecuada para aplicaciones específicas en ingeniería.

En el presente estudio, se llevaron a cabo ensayos de tracción en probetas triangulares con tres celdas activas, denominadas Probeta#1, Probeta#2, Probeta#3, Probeta#4 y Probeta#5. El objetivo principal consiste en evaluar sus propiedades mecánicas y su comportamiento ante cargas de tracción. Además, se busca comparar estos resultados con los valores previamente obtenidos en probetas lineales de 2 a 6 celdas y probetas trapezoidales de 1 a 3 celdas, identificando diferencias notables entre las configuraciones geométricas.

Probeta#1 del Patrón Triangular: 3 celdas

La Probeta#1, de configuración triangular y con tres celdas activas, se sometió a un ensayo de tracción. Con una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm, registró una máxima fuerza de tracción de 18,7874 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 50,1013 mm, generando una deformación máxima del 50,10 %. Estos valores indican una capacidad de deformación considerable antes de la ruptura.

Tabla XCIV
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#1 CON UN PATRÓN TRIANGULAR

Probeta#1	
Tipo de patrón	Triangular
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	18,7874 N
Máximo desplazamiento	50,1013 mm
Máxima deformación	50,10 %

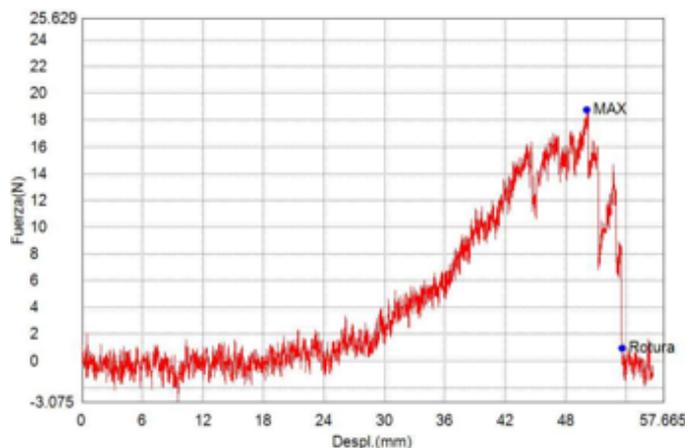


Figura 237. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#1 con un patrón triangular de 3 celdas[103]

Probeta#2 del Patrón Triangular: 3 celdas

La Probeta#2, también de configuración triangular con tres celdas activas, fue ensayada bajo un patrón de carga de tracción. Con una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm, registró una máxima fuerza de tracción de 10,0613 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 43,3180 mm, resultando en una deformación máxima del 43,32 %. Estos resultados muestran una respuesta mecánica consistente y una capacidad de deformación significativa.

Tabla XCV
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#2 CON UN PATRÓN TRIANGULAR

Probeta#2	
Tipo de patrón	Triangular
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	10,0613 N
Máximo desplazamiento	43,3180 mm
Máxima deformación	43,32 %

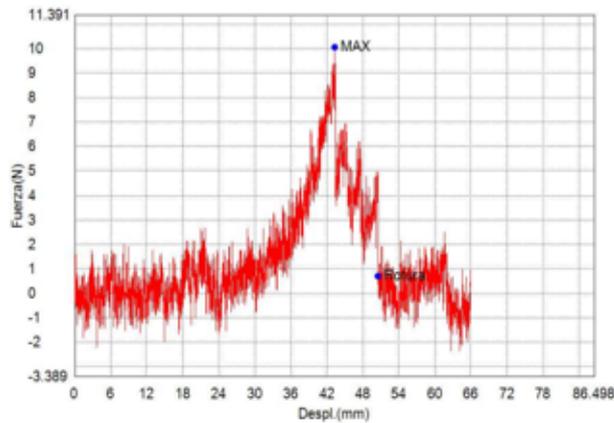


Figura 238. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#2 con un patrón triangular de 3 celdas[103]

Probeta#3 del Patrón Triangular: 3 celdas

La Probeta#3, de configuración triangular con tres celdas activas, se sometió a un ensayo bajo un patrón de carga de tracción. Su geometría comprendió una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 21,9345 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 46,7596 mm, generando una deformación máxima del 46,76 %. Estos valores demuestran una capacidad de deformación notable antes de la fractura.

Tabla XCVI

VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#3 CON UN PATRÓN TRIANGULAR

Probeta#3	
Tipo de patrón	Triangular
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	21,9345 N
Máximo desplazamiento	46,7596 mm
Máxima deformación	46,76 %

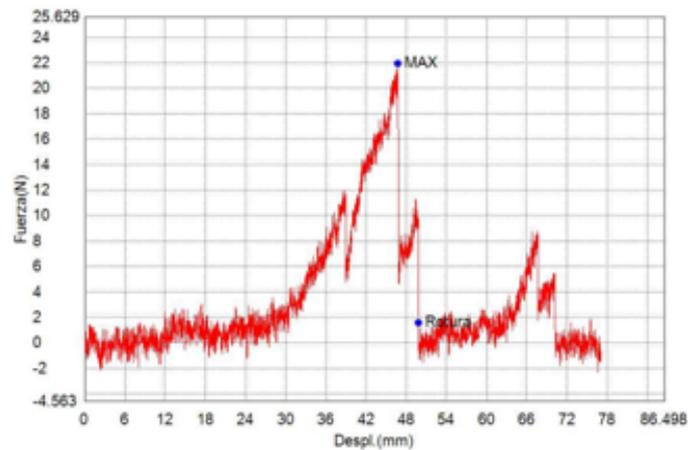


Figura 239. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#3 con un patrón triangular de 3 celdas[103]

Probeta#4 del Patrón Triangular: 3 celdas

La Probeta#4, también de configuración triangular y con tres celdas activas, fue ensayada bajo el patrón de carga de tracción. Con una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm, se registró una máxima fuerza de tracción de 18,8351 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 48,4096 mm, generando una deformación máxima del 48,41 %. Estos resultados indican una respuesta mecánica similar a las otras probetas triangulares.

Tabla XCVII

VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#4CON UN PATRÓN TRIANGULAR

Probeta#4	
Tipo de patrón	Triangular
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	18,8351 N
Máximo desplazamiento	48,4096 mm
Máxima deformación	48,41 %

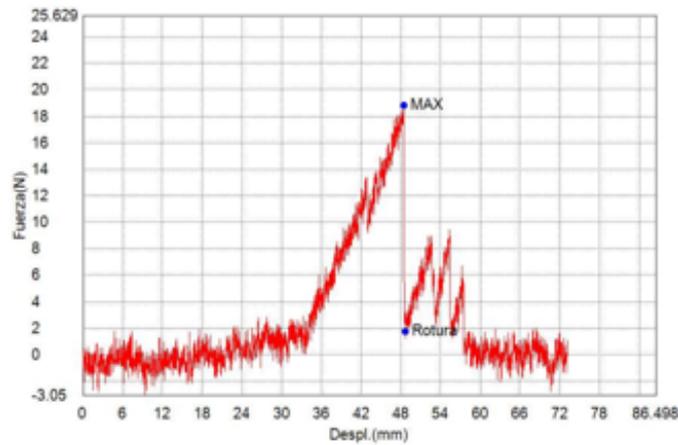


Figura 240. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#4 con un patrón triangular de 3 celdas[103]

Probeta#5 del Patrón Triangular: 3 celdas

La Probeta#5, de configuración triangular y con tres celdas activas, se sometió a un ensayo bajo un patrón de carga de tracción. Su geometría comprendió una anchura de 62,35 mm y una longitud calibrada de 100 mm. Durante el ensayo, se registró una máxima fuerza de tracción de 19,2165 N. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 49,0263 mm, generando una deformación máxima del 49,03 %. Estos resultados muestran una respuesta mecánica similar a las demás probetas triangulares.

Tabla XCVIII
VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO DE TORSIÓN- PROBETA#5 CON UN PATRÓN TRIANGULAR

Probeta#5	
Tipo de patrón	Triangular
Número de celdas	3
Anchura	62,35 mm
Longitud calibrada	100 mm
Máxima fuerza	19,2165 N
Máximo desplazamiento	49,0263 mm
Máxima deformación	49,03 %

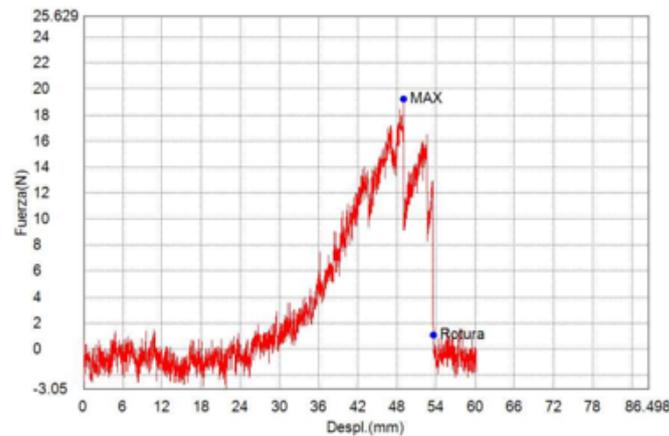


Figura 241. Gráfico de fuerza y desplazamiento para la probeta#5 con un patrón triangular de 3 celdas[103]

Diferencias entre Configuraciones Geométricas:

Comparando los resultados de las probetas triangulares con los valores previamente obtenidos en probetas lineales de 2 a 6 celdas y probetas trapezoidales de 1 a 3 celdas, se destaca que las probetas triangulares tienden a presentar una capacidad de deformación relativamente alta en relación con su geometría. Aunque las probetas triangulares generan deformaciones similares a las probetas trapezoidales de tres celdas, muestran una capacidad de absorción de energía menor que las probetas lineales de 6 celdas.

Conclusiones:

En síntesis, los ensayos de tracción en probetas triangulares con tres celdas activas revelan una capacidad de deformación notoria antes de la ruptura. Aunque presentan una tendencia a generar deformaciones más bajas en comparación con las probetas lineales de mayor cantidad de celdas, siguen destacándose por su capacidad de absorción de energía.

Conclusiones sobre las diferentes configuraciones de probetas en ensayos de tracción y su aplicación en actuadores de movimiento en forma de serpiente

Las probetas lineales de 2 y 6 celdas presentaron una marcada tendencia a la deformación antes de la ruptura, demostrando una capacidad inherente de absorción de energía. Esta característica las hace adecuadas para aplicaciones en las que la flexibilidad y la capacidad de deformación son esenciales, como en sistemas articulados que requieren movimientos complejos y adaptativos.

Por otro lado, las probetas trapezoidales de 1 y 3 celdas mostraron una resistencia y capacidad de deformación notables, resaltando su idoneidad en aplicaciones que demandan una combinación de resistencia y ductilidad. Estas probetas pueden ser adecuadas para mecanismos que necesitan soportar cargas considerables mientras mantienen cierta flexibilidad en su respuesta ante cambios de carga.

En cuanto a las probetas triangulares de 1 y 3 celdas, se observó su capacidad para generar deformaciones notables antes de la ruptura. Esta propiedad las hace potencialmente valiosas en aplicaciones que requieren absorción de energía y adaptabilidad a cambios de carga inesperados.

En el contexto de actuadores de movimiento en forma de serpiente, la configuración tanto triangular como trapezoidal podría ser la más adecuada. Estas configuraciones proporcionan una combinación de resistencia y capacidad de deformación, lo que permitiría al actuador moverse de manera fluida y flexible, adaptándose a superficies irregulares y generando movimientos serpenteantes de manera eficiente.

Evaluación de comportamiento mecánico en diferentes configuraciones

Tabla XCIX
EVALUACIÓN FINAL ENTRE TODOS LOS PATRONES.[104]

Análisis comparativo de propiedades mecánicas en diferentes patrones.		
Tipo de patrón	Número de celdas	Conclusión
Sin corte	Sin celdas	Los resultados indican variabilidad en las propiedades mecánicas debido a factores como la calidad del material y la precisión de fabricación. La Probeta #3 mostró un comportamiento inusual con una fuerza negativa en la rotura, requiriendo una revisión adicional.
Lineal	Dos celdas	Todas las probetas lineales presentan una alta capacidad de deformación antes de la ruptura, indicando ductilidad y capacidad para soportar cargas de tracción. No recuperan su forma original después de la deformación.
Lineal	Seis celdas	Estas probetas muestran una gran capacidad de deformación antes de la ruptura y altos valores en comparación con otros patrones, lo que sugiere una mayor deformación pero no un gran desplazamiento.
Trapezoidal	Una celda	Las probetas trapezoidales de una sola celda exhiben una alta capacidad de deformación antes de la ruptura, con elongación destacada y resistencia inherente. Comparadas con las lineales, muestran una menor deformación.
Trapezoidal	Tres celdas	Las probetas trapezoidales presentan una capacidad de deformación considerable aunque ligeramente menor en comparación con las lineales. Se destaca su resistencia inherente.
Triangular	Una celda	Las probetas triangulares de una sola celda permiten una deformación considerable antes de la ruptura, con capacidad para absorber energía.
Triangular	Tres celdas	Las probetas triangulares con tres celdas activas revelan una capacidad de deformación notable antes de la ruptura, con una tendencia a generar deformaciones más bajas en comparación con las lineales.

Configuración de Patron trapezoidal en Actuadores Suaves: Una Elección Convincente

En el trabajo de Callie Branyan y Ross L. Hatton, así como en la investigación llevada a cabo por Yi ýgit Mengüç [105], se exploraron diversas configuraciones de patrones para actuadores suaves. Ambos estudios concluyeron que el patrón trapezoidal demostró un rendimiento destacado en términos de deformación y capacidad de respuesta. Estas investigaciones resaltaron que, en comparación con otros patrones, el trapezoidal ofrecía una mayor versatilidad y control en la deformación de los actuadores, lo que lo convertía en una elección preferida.

En la investigación llevada a cabo en este estudio también se investigó la influencia de diferentes patrones en los actuadores suaves. Siguiendo la tendencia identificada en las investigaciones previas de Branyan, Hatton, y Mengüç, se encontró que el patrón trapezoidal se destacaba como la opción más adecuada para el actuador suave. Esta elección se basa en la comprobación de su capacidad para proporcionar una deformación óptima y un control preciso en diversas aplicaciones, respaldando la afirmación de que el patrón trapezoidal es una configuración altamente efectiva para mejorar el rendimiento de los actuadores suaves.

VII. CRONOGRAMA

Tabla C
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DETALLADO. [104]



DESARROLLO DE UN MECANISMO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PATRÓN DE PIEL KIRIGAMI QUE PERMITA LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LA LOCOMOCIÓN ONDULATORIA

CRONOGRAMA

Nro.	ACTIVIDAD	NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Desarrollo del proyecto de titulación.	X																																							
2	Revisión del anteproyecto propuesto.		X	X																																					
3	Aceptación del anteproyecto.				X																																				
4	Desarrollo Objetivo General y Objetivos Específicos.					X	X	X																																	
5	Desarrollo Planteamiento del Problema y Justificación.									X	X	X																													
6	Desarrollo de marco teórico.												X																												
7	Análisis del diseño de patrones de kirigami-tablas comparativas de resultados de velocidad y eficiencia.												X	X																											
8	Análisis de patrones de kirigami por medio de simulaciones.													X	X	X																									
9	Desarrollo de probetas de acuerdo a las normas estandarizadas para elastómeros para el uso de la máquina universal.																X	X	X																						
10	Pruebas de torsión en el material.																X	X	X																						
11	Impresión en 3D de moldes.																	X	X																						

VIII. PRESUPUESTO

Tabla CII
PRESUPUESTO DETALLADO [104]

DESARROLLO DE UN MECANISMO BASADO EN ROBÓTICA SUAVE CON LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PATRÓN DE PIEL KIRIGAMI QUE PERMITA LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LA LOCOMOCIÓN ONDULATORIA						
Docente:	Ing. David Cortez		Tema:	Presupuesto final		
Estudiantes:	Summy Chong	Nicolle Peñafiel	Periodo lectivo:	2022-2023		
Materia:	Titulación#2					
Bienes						
Materiales	Cantidad	Descripción	Parcial	Total	Lugar	\$ 378.88
Ecoflex 00-30	2	1Kg	\$35.58	\$71.16	Smooth-ON/Miami	
Ecoflex 00-33AF	2	1 Kg	\$50.00	\$100.00	Smooth-ON/Ecuador-Quito	
Universal Mold release	1	12-OZ/0.34 Kg	\$16.29	\$16.29	Smooth-ON/Miami	
Sil-Poxy	1	3-OZ/0.09 Kg	\$27.65	\$27.65	Smooth-ON/Miami	
Fibra de Kevlar	1	4 OZ	\$36.00	\$36.00	SGT KNOTS/Estados Unidos	
Plástico poliéster	24	10" x 20"	\$5.08	\$125.33	The Artus Corporation/Estados Unidos	
Cinta adhesiva doble faz	1	5x12mm	\$2.45	\$2.45	The Artus Corporation/Estados Unidos	
Complementos						
Tubo de plástico PVC (flexible)	1		\$25.00	\$25.00	Ferretería/Ecuador-Guayaquil	\$35.00
Cautin	1		\$5.00	\$5.00	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
Protoboard	1		\$3.50	\$3.50	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
Estaño	1		\$1.50	\$1.50	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
Elementos de control						
Lagartos/cable	5		\$0.25	\$1.25	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	\$58.14
Plancha de jumpers	3		\$2.85	\$8.55	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
Módulo Bluetooth	1		\$6.95	\$6.95	Electrónica/Ecuador-Quito	
Microcontrolador: Arduino Nano	1		\$20.00	\$20.00	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
TB6612FNG Driver	1		\$6.99	\$6.99	Electrónica/Ecuador-Quito	
MOSFET	3		\$1.50	\$4.50	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
Transistor 2n3904	5		\$0.60	\$3.00	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
Módulo reductor de voltaje variable	2		\$3.45	\$6.90	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	
Detección y Actuación						
Bomba de aire-0.5W	2		\$5.90	\$10.33	Skocom/China-Ebay	\$44.09
Bomba de aire-0.5W	2		\$9.90	\$19.80	AIMELIAE/Estados Unidos-Amazon	
Válvula solenoide	6		\$1.55	\$13.96	Sin marca/China-Ebay	
Fuente de alimentación						
Batería de Litio	2		\$4.00	\$8.00	Electrónica/Ecuador-Guayaquil	\$35.00
Batería lipo 3s 11.1v de 500ma 70c	1		\$27	\$27	Electrónica/Ecuador-Latacunga	
Costos de movilización para materiales y transporte						\$182.5
Servientrega	\$20.50					
UPS	\$30					
Movilización	\$120					
Servicio de entrega Amazon	\$6					
Servicio de entrega de ebay	\$6					
Total						\$733.61

IX. CONCLUSIONES

Los principios del kirigami han demostrado ser útiles en la creación de pieles bioinspiradas flexibles y transformables con propiedades de fricción direccionales. Estas pieles pueden ser integradas en robots blandos para lograr una mejora en su locomoción, incluso utilizando un solo actuador extensible. El enfoque propuesto del kirigami se considera más simple, rápido y económico en comparación con otras técnicas para fabricar estructuras adaptables. La fabricación de las pieles de kirigami implica la inserción de cortes en una lámina plana y aprovechar las inestabilidades mecánicas para obtener un patrón tridimensional y pliegues permanentes.

Se ha desarrollado un actuador flexible recubierto con piel de kirigami sin restricciones, lo que significa que no depende de una fuente de aire externa limitada por su fuente de alimentación. Esta mejora permite que el actuador se mueva de manera autónoma sin estar limitado por cables o conexiones externas. Para lograr esto, se integra el control, la actuación y la fuente de alimentación a bordo del robot, utilizando un carro capaz de llevar el circuito y ayudar al movimiento del actuador. Estas características son especialmente beneficiosas en entornos complejos donde la movilidad y la autonomía son fundamentales.

Se demostró que es posible mejorar la eficiencia de los actuadores flexibles con piel de Kirigami al equilibrar adecuadamente las propiedades de fricción y la capacidad de estiramiento de las pieles a través de la elección de la geometría de corte y el protocolo de actuación. De acuerdo con los resultados obtenidos, la deformación plástica en las bisagras puede aprovecharse para optimizar la respuesta del sistema en su entorno. Se realizó el rediseño de tres patrones (lineal, triangular y trapezoidal) teniendo en cuenta las herramientas disponibles, lo que resultó en una variación en el ancho de las bisagras en cada uno de los patrones debido al diámetro del haz de luz emitido por la cortadora laser. En consecuencia, se ajustó el diseño de las celdas para lograr los mejores resultados.

El análisis de los patrones en las pruebas de tracción reveló que el patrón lineal, a pesar de su alta capacidad de deformación, presentaba un comportamiento plástico que dificultaba el rendimiento del actuador. Esto se debe, en parte, a que los cortes insertados en la lámina no formaban estructuras tridimensionales que emplearan la fricción direccional, lo cual afectaba la respuesta ondulatoria del sistema. Además, la deformación observada en la piel lineal durante los diferentes ciclos de inflado del actuador presentaba cambios significativos en el área del ancho de bisagra de las celdas lineales, delimitando el desplazamiento del actuador.

En comparación, los patrones triangulares y trapezoidales mostraron un mejor tiempo de respuesta en la locomoción. Ambos patrones presentaban ventajas al desplazarse en entornos con superficies irregulares, debido a que el diseño del patrón inducía la formación reversible y repetible de una textura direccional tridimensional. El patrón triangular, en particular, se destaca por su simplicidad y rapidez en el diseño de las celdas de corte. A diferencia del patrón trapezoidal, no requiere la aplicación de una serie de ecuaciones o cálculos para determinar los cortes y el ancho de bisagra que forma una celda de corte trapezoidal.

Estos patrones fueron diseñados en base a casos de estudios previamente analizados y son una respuesta a la necesidad de crear nuevas estructuras adaptables y configurables en base a las propiedades mecánicas del material. Al utilizar estos patrones, se logra un mejor rendimiento del actuador al adaptarse eficientemente a diferentes superficies y entornos irregulares. Los patrones triangulares y trapezoidales ofrecen una solución más efectiva en términos de tiempo de respuesta y diseño simplificado en comparación con el patrón lineal. Estos avances en el diseño de patrones son fundamentales para mejorar el rendimiento y la eficiencia de los actuadores en diversas aplicaciones.

Durante el tiempo de observación del desplazamiento del actuador revestido con los distintos patrones, podemos observar un notable cambio en el tiempo de locomoción cuando se emplea el patrón lineal en el actuador, en comparación con el uso de las pieles de patrón triangular y trapezoidal. El patrón lineal registró un desplazamiento de 1 cm en aproximadamente 10 minutos en una superficie con poca rugosidad. Los cortes utilizados en este diseño no contribuyeron a las propiedades mecánicas del actuador.

Es importante establecer que todas las pieles se enfrentaron a las pruebas de desplazamiento en el mismo tipo de superficie. La piel del patrón trapezoidal logró un desplazamiento de 1 cm en aproximadamente 1 minuto 18

segundos. Durante el recorrido, su movimiento o desplazamiento fue recto y sin desviaciones, lo que facilitó el desplazamiento del actuador y redujo considerablemente el tiempo de locomoción. La piel triangular mostró un tiempo de desplazamiento similar al patrón trapezoidal. Sin embargo, a diferencia de este último, su recorrido no fue recto y presentó desviaciones. Estas desviaciones complicaron la medición precisa de la distancia recorrida.

Este trabajo realiza una valiosa contribución al campo de la robótica suave al explorar y aplicar los patrones kirigami para mejorar el rendimiento de los actuadores. Los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas no solo tienen relevancia académica, sino que también pueden ser de gran interés y utilidad para investigadores y diseñadores en áreas relacionadas. El estudio ayuda con la comprensión de las capacidades de los actuadores flexibles y las posibilidades de optimización mediante la implementación de patrones kirigami.

X. RECOMENDACIONES

- La elección del material para la fabricación de los actuadores suaves es un paso importante. En este caso, se utilizó el Ecoflex 00-33 AF para las primeras pruebas. Sin embargo, se encontró que su textura final era áspera y presentaba problemas al despegarse de los moldes de impresión utilizados.

Para los actuadores finales, se decidió utilizar el Ecoflex 00-30. Este material tiene una viscosidad mixta que permite obtener un resultado óptimo al momento de sacar el actuador del molde durante el proceso de secado. Este material proporciona una textura suave y facilita la separación del molde sin problemas.

- Para delimitar la cámara de aire dentro del actuador y lograr un comportamiento específico, es necesario crear un patrón helicoidal a través del cuerpo del actuador utilizando una fibra de kevlar. Este patrón helicoidal se forma al enrollar la fibra de kevlar alrededor del actuador en una forma en espiral. La fibra de kevlar se coloca en un ángulo y con un espacio específico entre cada vuelta de acuerdo con el diseño deseado.

Esta estructura helicoidal permite controlar el flujo de aire dentro de la cámara de aire del actuador y determinar su comportamiento. Es fundamental seguir el diseño y las especificaciones establecidas para obtener el resultado deseado en términos de ángulo, espacio y patrón helicoidal. Esto asegurará que el aire que circula a través de la cámara de aire del actuador tenga el comportamiento esperado.

- Para diseñar los patrones de corte en las celdas de un actuador, es necesario conocer el diámetro del haz de luz utilizado en la máquina láser, que en este caso es de 3 mm. El ancho de la bisagra en el diseño de los patrones depende de esta medida, ya que determina la posición y los datos que se reemplazan en los patrones.

El tamaño real del diámetro del haz de luz también influye en la cantidad de material presente entre los cortes en cada celda. Por lo tanto, es importante tener en cuenta esta medida al diseñar los patrones, ya sea para colocar los cortes de forma directa o mediante el uso de fórmulas.

- Al momento de imprimir los moldes de secado de los actuadores y el carro utilizado para transportar el circuito autónomo, es importante ajustar y mejorar las tolerancias de las piezas dentro del entorno de Solidworks, teniendo en cuenta el tamaño de la boquilla de impresión.

Al ajustar y mejorar las tolerancias de las piezas dentro de Solidworks, se busca garantizar que las piezas impresas en 3D encajen correctamente y cumplan con los requisitos de diseño y funcionalidad. Esto implica considerar factores como el juego entre las piezas, los espacios requeridos para los componentes y las restricciones de movimiento.

- De acuerdo a las dificultades y cambios en el diseño del circuito, es recomendable dejar todo el circuito fuera de la piel del actuador reversible. De esta manera, si ocurre un cortocircuito, será mucho más fácil detectar y corregir el error. Además, esta decisión también implica un ahorro de material, ya que al no colocar el circuito dentro de la piel, se evita la pérdida de material.

REFERENCIAS

- [1] E. Universo, «Los robots que recorren las alcantarillas de Quito han captado ratas enormes, cucarachas del tamaño de una mano y hasta voces extrañas,» 2022. dirección: <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/los-robots-que-recorren-las-alcantarillas-de-quito-han-captado-ratas-enormes-cucarachas-del-tamano-de-una-mano-y-hasta-voces-extranos-nota/>.
- [2] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, «FUNDAMENTOS DE ROBOTICA,» *McGraw-Hill*, abr. de 1997.
- [3] ROBOTNIK, «Aplicaciones de robotica movil: mas seguridad y productividad para tu planta [fotografía],» *Robotnik*, mar. de 2021. dirección: <https://robotnik.eu/es/aplicaciones-de-robotica-movil-mas-seguridad-y-productividad-para-tu-planta/>.
- [4] C. Calle, N. Rolando, S. Quinde y G. Rene, «Diseño y construcción de un robot móvil didáctico para estudios experimentales de robótica cooperativa [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana],» *Repositorio institucional*, 2007. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/175>.
- [5] Y. Zhaoa, Y. Chia, Y. Honga, Y. Lia, S. Yang y Jie-Yin, «Twisting for soft intelligent autonomous robot in unstructured environments,» vol. 119, n.º 22, 2022.
- [6] C. Majidi, «Escala del Módulo de Young[Fotografía],» *Soft Robotics*, 2013. dirección: https://www.researchgate.net/publication/275605108_Soft_Robotics_A_Perspective-Current_Trends_and_Propects_for_the_Future.
- [7] Deepak-Trivedi, C. D. -Rahn, W. M. Kier e I. D. Walker, «Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research,» vol. 5, n.º 3, 2008.
- [8] Y.-Lee, W.J.-Song y J.Y.-Sun, «Hydrogel soft robotics,» vol. 15, n.º 1, 2010.
- [9] T. Thuruthel, Y. Ansari, E. Falotico y C. Laschi, «Evolución de manipuladores[Fotografía],» *Soft Robotics*, 2018. dirección: <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/soro.2017.0007>.
- [10] S. Terrile, «Soft Robotics: Applications, Design and Control,» vol. 1, n.º 1, 2021.
- [11] F. Schmitt, O. Piccin, L. Barbé y B. Bayle, «Soft Robots Manufacturing: A Review[Fotografía],» *Frontiers in Robotics and AI*, 2018. dirección: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2018.00084/full>.
- [12] F. Shepherd R Aand Ilevski, W. Choi, S. Morin et al., «Multigait soft robot[Fotografía],» *PNAS*, 2011. dirección: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1116564108>.
- [13] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend et al., «Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[Fotografía],» *PNAS*, 2010. dirección: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1003250107>.
- [14] F. Corporation[Fotografía]. «TFESTO.» (2010), dirección: https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2010-to-2012/bionic-handling-assistant-id_33759/ (visitado 10-02-2023).
- [15] H. Lin, G. Leisk y B. Trimmer, «GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot[Fotografía],» *BIOINSPIRATION AND BIOMIMETICSS*, 2011. dirección: https://www.researchgate.net/publication/51078729_GoQBot_A_caterpillar-inspired_soft-bodied_rolling_robot7.
- [16] T. J. Jones, E. Jambon-Puillet, J. Marthelot y P.-T. Brun, «Bubble casting soft robotics,» vol. 599, n.º 1, 2021.
- [17] J. Medina y P. Vélez, «“Soft Robotic”: Una nueva generación de robots,» vol. 1, n.º 1, 2014.
- [18] G. Chapman, «The hydrostatic skeleton in the invertebrates,» vol. 33, n.º 3, 1958.
- [19] N. G. España. «National Geographic[Fotografía].» (2010), dirección: <https://www.nationalgeographic.com/es/animales/medusas>.
- [20] M. Azucena. «Hipertextual.» (2022), dirección: <https://hipertextual.com/tag/pulpos>.
- [21] Ambientum. «Ambientum[Fotografía].» (2022), dirección: <https://www.ambientum.com/ambientum/curiosidades/curiosidades-sobre-las-orugas-que-quizas-no-sabias.asp>.
- [22] I. C. London. «Continuum Robots[Fotografía].» (2020), dirección: <https://www.imperial.ac.uk/morph-lab/research/continuum-robots/>.
- [23] M. CSAIL. «SoFi-The Soft Robotic Fish[Fotografía].» (2018), dirección: <https://www.csail.mit.edu/research/sofi-soft-robotic-fish>.

- [24] E. Elbadawi, G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos y T. Gustafsson, «Bio-Inspired Climbing Robots in Wet Environments[Fotografía],» *University of Technology*, 2011. dirección: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1395400/FULLTEXT01.pdf>.
- [25] J. P. Ostrowski, «The Mechanics and Control of Undulatory Robotic Locomotion,» vol. 1, n.º 1, 1995.
- [26] R. Aubin, «Contribution to the study, simulation and controlling a snake-like robot,» vol. 1, n.º 1, 2006.
- [27] A. H. Techet, F. S. Hover y M. S. Triantafyllou, «Separation and Turbulence Control in BiomimeticFlows,» vol. 71, n.º 1, 2003.
- [28] D. Copaci, J. Muñoz, I. González, C. A. Monje y L. Moreno, «SMA-Driven Soft Robotic Neck: Design, Control and Validation,» vol. 8, n.º 1, 2020.
- [29] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, S. Stanford, S. Oh y J. Eckerle, «Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward,» vol. 4695, n.º 1, 2022.
- [30] L. Nie, D. Li y S. Guo, «Design and analysis on the dynamics of ICPF actuated tortoise-like flexible micro-robot,» vol. 6357, n.º 1, 2006. dirección: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6357/635757/Design-and-analysis-on-the-dynamics-of-ICPF-actuated-tortoise/10.1117/12.717525.short?SSO=1>.
- [31] F. Daerden y D. Lefeber, «Pneumatic Artificial Muscles: actuators forrobotics and automation,» vol. 1, n.º 1, 2022. dirección: https://www.researchgate.net/publication/247194653_Pneumatic_Artificial_Muscles_actuators_for_robotics_and_automation.
- [32] T. B y L. P, «Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators,» vol. 20, n.º 2, 2000. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/833638>.
- [33] A. Marchese, R. Katzschmann y D. Rus, «A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots[Fotografía],» 2015. dirección: https://www.researchgate.net/publication/276907734_Soft_Robots_and_Society.
- [34] B. Liu, Y. O. Aydin, D. I. Goldman y F. L. Hammond, «Kirigami Skin Improves Soft Earthworm Robot Anchoring and Locomotion Under Cohesive Soil,» vol. 1, n.º 1, 2019.
- [35] D. Rus y M. Tolley, «Design, fabrication and control of soft robots,» vol. 7553, n.º 1, 2015.
- [36] W.McMahan, V.Chitrakaran, M.Csencsits et al., vol. 7553, n.º 1, 2006.
- [37] J. Li y J. Xiao, «Task- constrained Continuum Manipulation in Cluttered Space[Fotografía],» 2014. dirección: https://www.researchgate.net/publication/286679778_Task-constrained_continuum_manipulation_in_cluttered_space.
- [38] L. Ren, B. Li, G. Wei et al., «Róbotica blanda bioinspirada [Fotografía],» 2021. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004221010439>.
- [39] S. Lyne, Z. Wnag, IEEE et al., «Towards a Soft Pneumatic Glove [fotografía],» *Researchgate.net*, nov. de 2013. dirección: https://www.researchgate.net/publication/261352972_Towards_a_soft_pneumatic_glove_for_hand_rehabilitation/.
- [40] M. J. Alvarado, M. Bajaña, S. Chong et al., «Proyecto SoftRobotics [fotografía],» *Universidad Politecnica Salesiana*, 2022.
- [41] K. C. Galloway, P. Polygerinos y R. J. Walsh Conor J.and Wood, «Mechanically Programmable Bend Radius for Fiber-Reinforced Soft Actuators [fotografía],» *Harvard Biodesign Lab*, nov. de 2013. dirección: <https://biodesign.seas.harvard.edu/publications/mechanically-programmable-bend-radius-fiber-reinforced-soft-actuators>.
- [42] C. Y. Zheng, Z. Wong, A. J. Ishak y S. Ahmad, «MECHANICAL ANALYSIS OF WEARABLE LOWER [fotografía],» *ResearchGate*, oct. de 2014. dirección: https://www.researchgate.net/publication/287735966_Mechanical_analysis_of_wearable_lower_limb_exoskeleton_for_rehabilitation.
- [43] J. Jian, Z. Xiangbin y H. Xianbo, «An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT,» vol. 3, n.º 1, 2020.
- [44] Smooth-On, «Anexos,» *Smooth-On*, 2020.
- [45] RUBIX, «KEVLAR [fotografía],» *RUBIX*, abr. de 2021. dirección: <https://servicios-rubix.com/kevlar/>.
- [46] S. ToolKit, «Doble Helicoidal,» *Soft robotics ToolKit*, dirección: <https://softroboticstoolkit.com/book/fr-variation-motion>.

- [47] J. Tao, H. Khosravi, V. Deshpande y S. li, «Ingeniería por cortes: cómo el principio de Kirigami permite propiedades y funcionalidades mecánicas únicas,» vol. 10, n.º 1, 2022.
- [48] Y. Tang, Y. B. Li, Y. Hong y J. Y. Shu Yang, «Metasheets kirigami activos programables con más libertad de actuación,» vol. 116, n.º 17, 2019.
- [49] S. Chong y N. Peñafiel, «Desarrollo de actuadores y Kirigami[fotografía],» *Universidad Politécnica Salesiana*, mar. de 2023.
- [50] A. RAFSANJANI, Y. ZHANG, B. LIU, S. M. RUBINSTEIN y K. BERTOLDI, «Las pieles Kirigami hacen un simple rastreo suave del actuador,» vol. 3, n.º 15, feb. de 2018.
- [51] A. Y. R. D. E. H. NATURAL, «Revista Latinoamérica de Herpetología,» vol. 2, n.º 2, nov. de 2019.
- [52] FisicoQuimica, «Isotropía y Anisotropía,» dirección: <https://fisicoquimica601.wordpress.com/2014/01/15/propiedades-de-los-compuestos-covalentes-y-moleculares/>.
- [53] Y. Zhang, Z. Yan, K. Nan et al., «Una forma mecánica de kirigami como ruta hacia mesoestructuras 3D en micro/nanomembranas,» vol. 112, n.º 38, sep. de 2015. dirección: [%5Curl%7Bhttps://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1515602112%7D](https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1515602112).
- [54] A. katherine brooks, S. Chakravarty, M. Alí y V. K. Yadavalli, «Biodiseño inspirado en Kirigami para aplicaciones en el cuidado de la salud,» vol. 34, n.º 18, mayo de 2022. dirección: [%5Curl%7Bhttps://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202109550#adma202109550-bib-0102%7D](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202109550#adma202109550-bib-0102).
- [55] T. Castle1, Y. Cho1, X. Gong1 et al., «Hacer el corte: Reglas de kirigami de Lattice,» vol. 113, dic. de 2014. dirección: [%5Curl%7Bhttps://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.245502%7D](https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.245502).
- [56] D. M. Sussman, C. Yigil, C. de Toen et al., «Kirigami de celosía algorítmica: una ruta hacia los materiales pluripotentes,» vol. 112, n.º 25, mayo de 2015. dirección: [%5Curl%7Bhttps://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1506048112%7D](https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1506048112).
- [57] T. C. Shyu, P. F. Damasceno, P. M. Dodd et al., «Un enfoque kirigami para diseñar la elasticidad en nanocompuestos a través de defectos estampados,» vol. 14, mayo de 2014. dirección: [%5Curl%7Bhttps://www.nature.com/articles/nmat4327%7D](https://www.nature.com/articles/nmat4327).
- [58] S. Chong y N. Peñafiel, «Diseño de Piezas de Molde en SOLIDWORKS,» jul. de 2023.
- [59] S. Chong y N. Peñafiel, «Maquinas 3D,» jul. de 2023.
- [60] S. Chong y N. Peñafiel, «Angulo de hilo de kevlar,» jul. de 2023.
- [61] S. Chong y N. Peñafiel, «Lista de materiales para procedimniento de actuadores,» jul. de 2023.
- [62] S. Chong y N. Peñafiel, «Actuadores paso a paso,» jul. de 2023.
- [63] M. Isobe y K. Okumura, «Respuesta rígida inicial y transición de reblandecimiento de materiales de láminas de kirigami altamente estirables,» vol. 6, abr. de 2016.
- [64] Z. Qi, D. K. Campbell y H. S. Park, «Simulaciones atómicas de gran deformación inducida por tensión y capacidad de estiramiento en kirigami de grafenos,» dic. de 2014.
- [65] A. Lamoureux, K. Lee, M. Shlian, S. R. Forrest y M. Shtein, «Estructuras dinámicas de kirigami para seguimiento solar integrado,» vol. 6, sep. de 2015.
- [66] S. Chong y N. Peñafiel, «Diseño de Celda y Probeta Lineal- Software SOLIDWORKS,» jul. de 2023.
- [67] S. Chong y N. Peñafiel, «Probeta de Deformación Lineal,» jul. de 2023.
- [68] Y. Tang, G. Lin, S. Yang, Y. K. Yi, R. D. Kamien y jie yin, «Metamateriales Kiri-Kirigami programables,» dic. de 2016.
- [69] S. Chong y N. Peñafiel, «Diseño de Patrones Lineales, Triangular, Trapezoidal,» jul. de 2023.
- [70] S. Chong y N. Peñafiel, «Diseño de Piel Lineal-Software AUTOCAD,» jul. de 2023.
- [71] A. Rafsanjani, L. Jin, B. Deng y K. Bertoldi, «Propagación de ventanas emergentes en conchas kirigami,» vol. 116, n.º 17, abr. de 2019.
- [72] S. Chong y N. Peñafiel, «Diseño de Piel Triangular-Software AUTOCAD,» jul. de 2023.
- [73] S. Chong y N. Peñafiel, «Diseño de piel Trapezoidal-Software AUTOCAD,» jul. de 2023.
- [74] S. Chong y N. Peñafiel, «Diseño de celda Trapezoidal-Puntos de Corte,» jul. de 2023.
- [75] S. Chong y N. Peñafiel, «Probeta Sin Cortes-Simulacion,» jul. de 2023.
- [76] I. STANDARD, «Condiciones de prueba para películas y láminas,» 2018. dirección: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/70307/e804daa78e2747a6bbd08ac486d58225/ISO-527-3-2018.pdf>.

- [77] S. Chong y N. Peñafiel, «Pruebas de Traccion- Máquina de Ensaño Universal,» ago. de 2023.
- [78] S. Chong y N. Peñafiel, «Pruebas de Traccion- PDF de Resultados,» ago. de 2023.
- [79] S. Chong y N. Peñafiel, «SOLIDWORKS ingreso de Material pruebas de simulacion,» jul. de 2023.
- [80] S. Chong y N. Peñafiel, «Procedimiento en maquina de corte laser,» ago. de 2023.
- [81] S. Chong y N. Peñafiel, «Montaje de la piel Kirigami,» ago. de 2023.
- [82] S. Chong y N. Peñafiel, «Comprobación de Circuito con Pulsador,»
- [83] S. Chong y N. Peñafiel, «Circuito,» ago. de 2023.
- [84] S. Chong y N. Peñafiel, «Piezas impresas,» jul. de 2023.
- [85] S. Chong y N. Peñafiel, «Actuadores finales con recubrimiento de piel de kirigami,» ago. de 2023.
- [86] S. Chong y N. Peñafiel, «Patrón Lineal Una Celda- Corte Real,» ago. de 2023.
- [87] S. Chong y N. Peñafiel, «Patrón Triangular Una Celda- Corte Real,» ago. de 2023.
- [88] S. Chong y N. Peñafiel, «Patrón Trapezoidal Una Celda- Corte Real,» ago. de 2023.
- [89] S. Chong y N. Peñafiel, «Patrón Lineal Tres Celdas- Corte Real,» ago. de 2023.
- [90] S. Chong y N. Peñafiel, «Patrón Triangular Tres Celdas- Corte Real,» ago. de 2023.
- [91] S. Chong y N. Peñafiel, «Patrón Trapezoidal Tres Celdas- Corte Real,» ago. de 2023.
- [92] S. Chong y N. Peñafiel, «Cortes diversos,» ago. de 2023.
- [93] S. Chong y N. Peñafiel, «Carrito del circuito,» ago. de 2023.
- [94] S. Chong y N. Peñafiel, «Modelo1 Base de Carro,» ago. de 2023.
- [95] S. Chong y N. Peñafiel, «Modelo2 Base de Carro,» ago. de 2023.
- [96] S. Chong y N. Peñafiel, «Registro de FEM- Patrón Sin Cortes,» jul. de 2023.
- [97] S. Chong y N. Peñafiel, «Registro de FEM- Patrón Lineal Una Celda,» jul. de 2023.
- [98] S. Chong y N. Peñafiel, «Registro de FEM- Patrón Lineal Tres Celdas,» jul. de 2023.
- [99] S. Chong y N. Peñafiel, «Registro de FEM- Patrón Triangular Una Celda,» jul. de 2023.
- [100] S. Chong y N. Peñafiel, «Registro de FEM- Patrón Triangular Tres Celdas,» jul. de 2023.
- [101] S. Chong y N. Peñafiel, «Registro de FEM- Patrón Trapezoidal Una Celda,» jul. de 2023.
- [102] S. Chong y N. Peñafiel, «Registro de FEM- Patrón Trapezoidal Tres Celdas,» jul. de 2023.
- [103] S. Chong y N. Peñafiel, «Tracción,» ago. de 2023.
- [104] S. Chong y N. Peñafiel, «Anexos,» ago. de 2023.
- [105] L. H. Callie BranyanRoss e Y. ýgit Mengüç, «Snake-Inspired Kirigami Skin for Lateral Undulation of a Soft Snake Robot,» *IEEE*, 2020.
- [106] S. Chong y N. Peñafiel, «Anexos,» ago. de 2023.

XI. ANEXOS

XI-A. Descripciones técnicas y funcionales

En esta sección de la tesis, se profundiza en la exploración detallada y significativa de los componentes que desempeñaron un papel esencial tanto en pruebas como en una opción para observar el funcionamiento del actuador a lo largo del desarrollo de la investigación. Cada uno de estos componentes contribuyó de manera única al diseño y construcción del actuador basado en robótica suave con la implementación del patrón kirigami, presentando una serie de desafíos y oportunidades que influyeron en la toma de decisiones clave en el proceso de desarrollo.

Driver: Control Preciso y Eficiente

Uno de los componentes clave que merece atención es el driver empleado para controlar el actuador. Este dispositivo proporcionó la capacidad de gestionar con precisión la operación del actuador, permitiendo una respuesta efectiva a las señales de control. Su rol fundamental radica en asegurar que las deformaciones y movimientos del actuador sean controlados de manera óptima, respaldando la ejecución del patrón de locomoción ondulatoria. Sin embargo, a medida que avanzó la investigación y se exploraron alternativas, se determinó que existían opciones más adecuadas en términos de eficiencia y funcionalidad. Como resultado, se optó por no utilizar el driver inicial en etapas posteriores del desarrollo, favoreciendo así la implementación de soluciones más avanzadas.

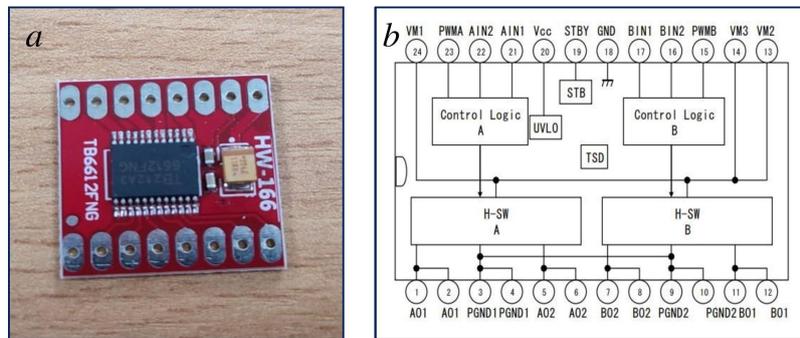


Figura 242. (a) TB6612FNG Driver Dual Puente H Pololu. (b) Datasheet. [106]

Microválvula Solenoide de 12V: Manipulación y Control de Flujo

La microválvula solenoide de 12V emerge como un componente crucial que desempeñó un papel destacado en el proceso de manipulación y control del flujo. Su utilización fue fundamental en las primeras etapas del circuito, habilitando pruebas y experimentos preliminares. Sin embargo, debido al notable consumo de voltaje que demandaba, se decidió posteriormente retirar este componente. Esta decisión se basó en una evaluación exhaustiva de la eficiencia energética y en la búsqueda de alternativas más adecuadas para el control del flujo en el actuador.

Sensor de Presión: Retroalimentación Precisa

Otro elemento de alta relevancia fue el sensor de presión. Este componente se convirtió en una parte crucial para la retroalimentación del sistema, aportando precisión y capacidad de medición en el proceso de inflado y desinflado del actuador. Su implementación permitió realizar ajustes precisos en la presión interna del actuador, contribuyendo directamente a la ejecución del patrón kirigami y su optimización. Aunque inicialmente fue un recurso valioso, se optó por su retirada debido a ciertas complicaciones en la obtención de valores de presión precisos, lo cual requería resolver obstáculos técnicos para su funcionamiento confiable.

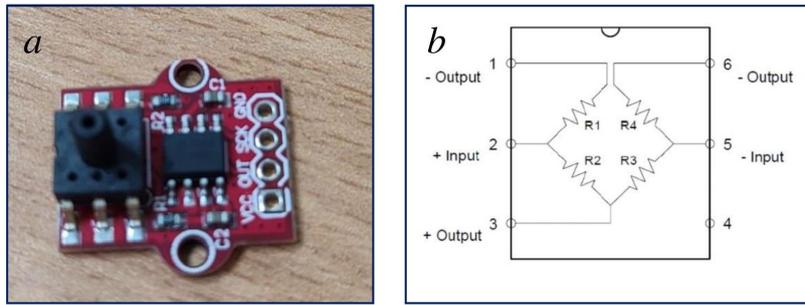


Figura 243. (a) Sensor De Presión Mps20n0040d-d. (b) Datasheet de Sensor Mps20n0040d-d [106]

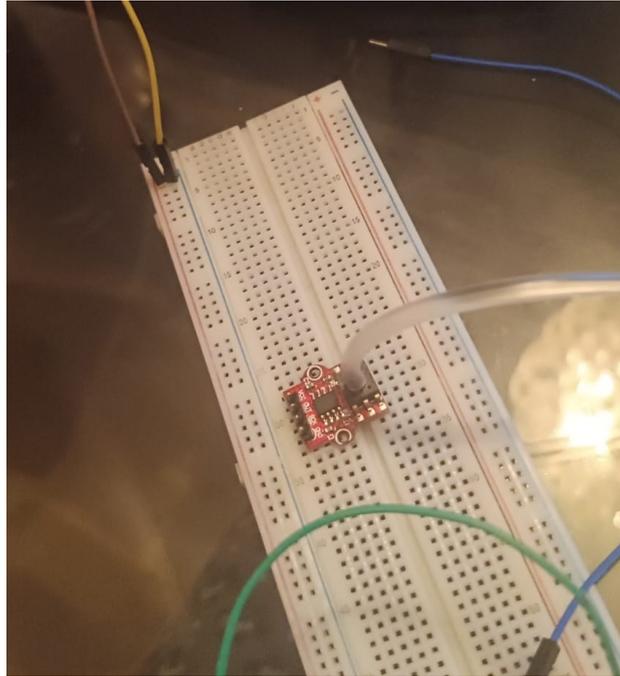


Figura 244. Prueba de sensor de presión[106]

Selección de Material: Ecoflex 00-33AF

El componente material también juega un papel fundamental en este proyecto. La elección de la ecoflex 00-33AF como material para los actuadores demostró ser una decisión estratégica y acertada. Su similitud en propiedades con la silicona ecoflex 00-30, aunque utilizada inicialmente como "prueba", ofreció ventajas sustanciales en términos de comportamiento mecánico y flexibilidad. Esta elección permitió realizar experimentos iniciales sin comprometer la estética del actuador final, contribuyendo así al proceso iterativo de diseño y optimización.



Figura 245. Silicona 00-33AF Parte A y B. [106]

XI-B. Pruebas de tracción

Patrón lineal

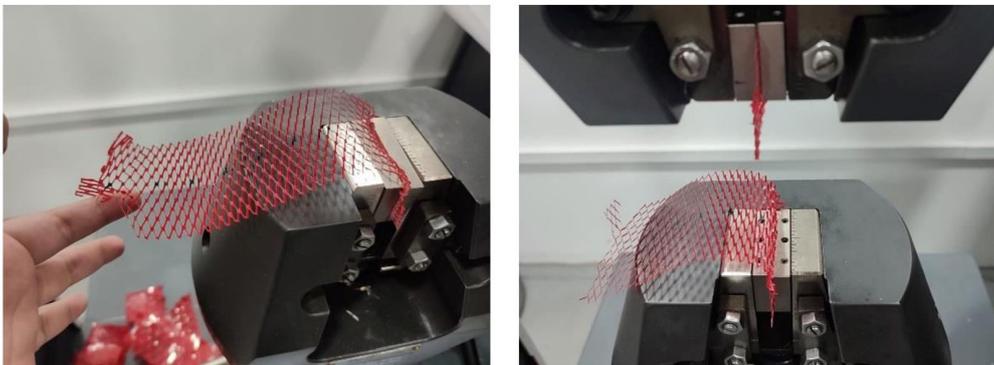


Figura 246. Patrón lineal prueba#1 y #2[106]

Patrón triangular

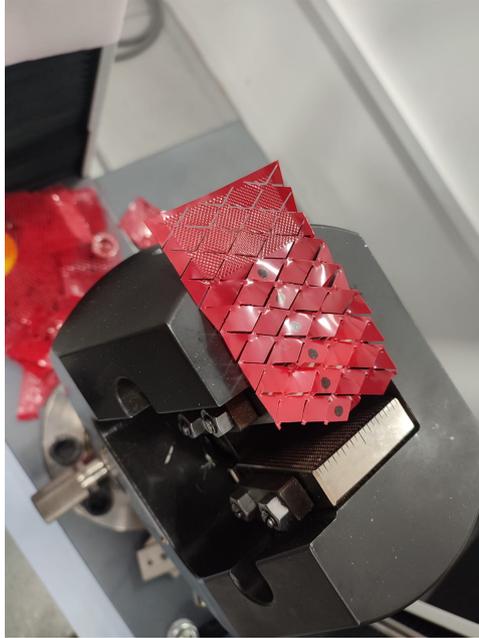


Figura 247. Patrón triangular prueba#1 [106]

Patrón trapezoidal

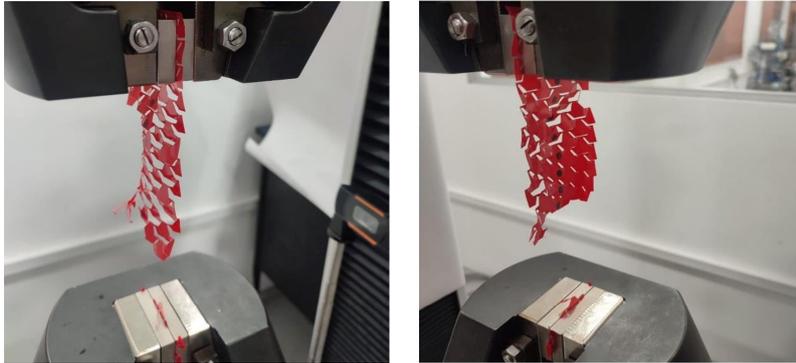


Figura 248. Patrón trapezoidal prueba #1 y #2 [106]

Prueba de actuador recubierto de piel kirigami



Figura 249. Prueba de actuador [106]

Corte de caja en acrílico

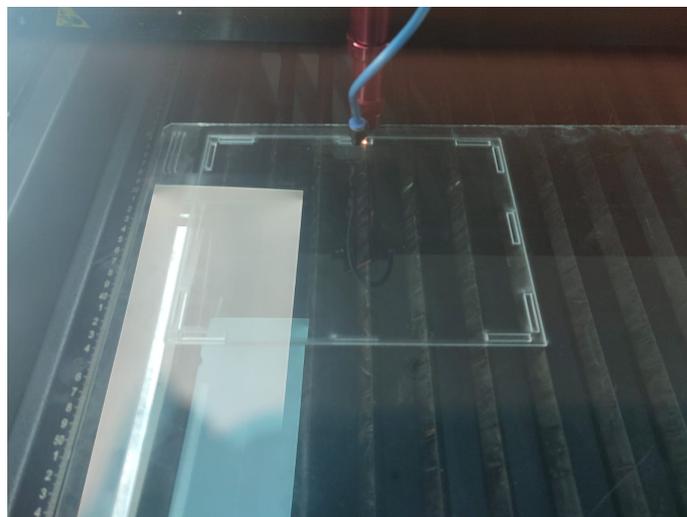


Figura 250. Tapa de acrílico [106].