



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS MODULARES BLANDOS HETEROGÉNEOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN MECÁNICA

HAROLD RODRIGO MARCOS VALENZUELA COLOMA

PROFESOR GUÍA:
JUAN CRISTÓBAL ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
CLAUDIO FALCÓN BEAS

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN MECÁNICA
POR: HAROLD RODRIGO MARCOS VALENZUELA COLOMA
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: JUAN CRISTÓBAL ZAGAL MONTEALEGRE

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS MODULARES BLANDOS HETEROGÉNEOS

El presente trabajo para optar al título de magíster en ciencias de la ingeniería, mención mecánica radica en el diseño, fabricación y caracterización de una población heterogénea de robot modulares blandos. Cada robot modular es capaz de realizar un movimiento único y que en conjunto logran realizar tareas más complejas y complicadas.

Cada diseño posee una característica propia la cual logra que el comportamiento de cada robot modular blando sea completamente diferente a otro. Principalmente se utiliza una fibra idealmente no extensible para impedir o guiar la expansión en ciertas direcciones logrando que el robot tenga la capacidad de rotar, de inclinar, de deslizar o de expandir en una dirección o en dos direcciones.

Todos los robot modulares son simulados en un software de elementos finitos y dinámica de fluido computacional con las propiedades de un material tipo hiperelástico y un material idealmente inextensible, los cuales son sometidos a un procedimiento de presurización y despresurización controlado para observar su comportamiento e.g. su desplazamiento, deslizamiento o rotación.

La fabricación de cada robot modular es realizado utilizando el método llamado litografía blanda, el cual se usa un tipo de elastómero que dentro de sus características se destacan su gran capacidad expansiva y su resistencia a la rotura. Esta silicona es depositada en moldes generadas por impresión 3D con el método llamado modelado por deposición fundida el cual es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos y la producción a pequeña escala.

Se ha realizado una comparación entre los datos adquiridos mediante las simulaciones y los datos empíricos obtenidos en base a las pruebas hechas de presurizado y despresurizado. Se adquieren el error estándar del comportamiento controlado que presenta cada módulo mediante su desviación estándar dividida por la raíz cuadrada del número de repeticiones.

En esta tesis se ha podido concluir que la población de robots modulares blandos presenta un gran potencial para ser utilizados en variadas áreas de la investigación, gracias a su versatilidad para lograr diferentes configuraciones en su sistema logrando así una amplia gama de movimientos.

Agradecimientos

Finalizar este trabajo de investigación ha sido posible por el apoyo que he recibido de personas altruistas que nunca me dieron la espalda cuando yo la necesitaba. Primero agradezco a mi familia, a mi madre Eliana y a mi hermana Tatiana por apoyarme en esta locura, siendo siempre un pilar fundamental para lograr esta meta. A mi hermano Rolando por brindarme un hogar cada vez que lo he requerido y por darme unos sobrinos que amo y que me revitalizan cada vez que comparto con ellos. Y por último a mi hermana menor Sofía que me acompaña en todo acá en la ciudad, creando vivencias y lazos que habían sido postergados.

Agradezco al profesor guía Juan Cristóbal Zagal por proponer el tema de mi tesis, brindarme un espacio en el laboratorio y asesorarme a lo largo de esta investigación. A los profesores Álvaro Valencia y Ricardo Mendoza por ayudarme en áreas en las cuales tenía muchas dudas y entregarme excelentes retroalimentaciones de mi tesis.

Todas las horas de trabajo no hubieran sido las mismas, sin mis compañeros y amigos del laboratorio, los que están y los que pasaron, a los nacionales como internacionales. Agradecer a todos por su ayuda, cariño y amistad que me han entregado, por esos carretes y juntas fuera de nuestra área de trabajo. Gracias a ustedes por brindarme vivencias que siempre atesoraré. También no puedo dejar de lado a mis compañeros de magíster. Con ellos pude aprender a utilizar diferentes software que nunca había usado y estudiar día y noche realizando informes y simulaciones. Salud por esos asados y por las buenas amistades que se han forjado.

Y por último a todas las personas que han hecho esta experiencia más amena en la ciudad de Santiago. Gracias a todos.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivos generales	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
2. Antecedentes	3
2.1. Robótica modular	3
2.1.1. <i>Lattices Systems</i>	4
2.1.2. <i>Chain Systems</i>	4
2.1.3. <i>Mobile Systems</i>	4
2.2. Robótica blanda	5
2.2.1. Manufactura	6
2.2.2. Control	7
2.2.3. Actuador con una capa reforzada de fibra	7
2.3. Robótica modular blanda	8
2.4. Modelamiento de un material hiperelástico	9
2.4.1. Métodos de elementos finitos	9
2.4.2. <i>Mooney-Rivlin Model</i>	12
2.4.3. <i>Yeoh Model</i>	13
2.4.4. <i>Ogden Model</i>	14
3. Diseño y modelado	16
3.1. Datos preliminares	16
3.2. Módulos	17
3.3. Método de los elementos finitos	19
3.4. Mallado	22
3.5. Simulaciones	23
4. Fabricación	28
4.1. <i>Robot Tilt</i>	29
4.2. <i>Robot Biaxial</i>	30
4.3. <i>Robot Shear</i>	31
4.4. <i>Robot Uniaxial</i>	32
4.5. <i>Robot Rotator</i>	33
4.6. Devanado de módulos	34
4.7. Módulos fabricados	37

5. Control	40
5.1. Componentes	40
5.1.1. Compresor	40
5.1.2. Válvula solenoide	40
5.1.3. Micro-controlador	41
5.1.4. Sensor de presión	41
5.1.5. Transistor	42
5.2. Circuito	43
6. Resultados experimentales y verificación de modelos	44
6.1. Plataforma móvil	55
6.1.1. Esquema 3D	55
6.1.2. Comportamiento	56
6.1.3. Secuencia de movimiento	59
7. Discusión	61
7.1. Diseño	61
7.2. Modelado	61
7.3. Fabricación	62
7.4. Control	62
7.5. Resultados y verificación de modelos	63
8. Conclusión	64
8.1. Cumplimiento de objetivos	64
8.2. Conclusiones generales	65
8.3. Limitaciones	66
8.4. Trabajos Futuros	66
Bibliografía	67
A. Anexo Diseños	72
B. Anexo Diseños	95

Índice de Tablas

2.1. Materiales hiperelásticos	12
3.1. Características preliminares de los robots modulares blandos	16
3.2. Parámetros de Yeoh 3 términos	19
3.3. Parámetros de Ogden 3 términos	19
3.4. Parámetros de Mooney-Rivlin 3 términos	20
5.1. Características del compresor	40
5.2. Características de la válvula	41
5.3. Características del microcontrolador	41
5.4. Características del sensor de presión	42
5.5. Características de los transistores	42

Índice de Ilustraciones

2.1. Modular robot ATRON	4
2.2. Modular robot GZ-I	4
2.3. Swarm-BOT	5
2.4. <i>Soft robot earthworm</i>	6
2.5. Actuadores reforzados con fibra en vista de corte.	8
2.6. Actuadores con diferentes ángulos en la fibra	9
2.7. <i>Soft Modular Robotic Cubes</i>	10
3.1. Diseño de Robot modulares	17
3.2. Comparación entre modelos matemáticos	20
3.3. Mallado realizado en ANSYS para cada Robot Modular Blando	22
3.4. Simulación <i>Robot Tilt</i>	23
3.5. Simulación <i>Robot Biaxial</i>	24
3.6. Simulación <i>Robot Shear</i>	25
3.7. Simulación <i>Robot Uniaxial</i>	26
3.8. Simulación <i>Robot Rotator</i>	27
4.1. Fabricación del <i>Robot Tilt</i>	29
4.2. Fabricación del <i>Robot Biaxial</i>	30
4.3. Fabricación del Robot de Shear	31
4.4. Fabricación del <i>Robot Uniaxial</i>	32
4.5. Fabricación del <i>Robot Rotator</i>	33
4.6. Devanado de la matriz interna del <i>Robot Tilt</i>	34
4.7. Devanado de la matriz interna del <i>Robot Biaxial</i>	35
4.8. Devanado de la matriz interna del <i>Robot Uniaxial</i> y del <i>Robot Shear</i>	36
4.9. Devanado de la matriz interna del <i>Robot Rotator</i>	36
4.10. Módulo <i>Robot Tilt</i>	37
4.11. Módulo <i>Robot Biaxial</i>	38
4.12. Módulo <i>Robot Shear</i>	38
4.13. Módulo <i>Robot Uniaxial</i>	39
4.14. Módulo <i>Robot Rotator</i>	39
5.1. Esquemático del circuito para control de un robot modular	43
6.1. Promedio del comportamiento de la presión en un ciclo.	44
6.2. Ángulo respecto a la presión, n=10.	45
6.3. Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.	46

6.4. Incremento del diámetro con respecto a la presión, n=10.	47
6.5. Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.	48
6.6. Desplazamiento en X respecto a la presión, n=10.	49
6.7. Desplazamiento Z respecto al desplazamiento en X, n=10.	50
6.8. Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.	51
6.9. Disminución del diámetro con respecto a la presión, n=10.	52
6.10. Angulo rotacional respecto a la presión, n=10.	53
6.11. Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.	54
6.12. Sistema plataforma móvil en tres direcciones	55
6.13. Desplazamiento X e Y de la plataforma móvil, n=10.	56
6.14. Desplazamiento X y Z de la plataforma móvil, n=10.	57
6.15. Desplazamiento Y y Z de la plataforma móvil, n=10.	58
6.16. Movimiento de la plataforma móvil en X e Y	59
6.17. Movimiento de la plataforma móvil en X e Y	60
A.1. Vista lateral diseño <i>Robot Tilt</i>	73
A.2. Vista alzado diseño <i>Robot Tilt</i>	73
A.3. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Tilt</i> parte A	74
A.4. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Tilt</i> parte B	75
A.5. Vista en corte del molde del <i>Robot Tilt</i> parte A	76
A.6. Vista en corte del molde del <i>Robot Tilt</i> parte B	76
A.7. Vista lateral del diseño <i>Robot Biaxial</i>	77
A.8. Vista planta del diseño <i>Robot Biaxial</i>	77
A.9. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Biaxial</i> parte A	78
A.10. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Biaxial</i> parte B	79
A.11. Vista en corte del molde del <i>Robot Biaxial</i> parte A	80
A.12. Vista en corte del molde del <i>Robot Biaxial</i> parte B	80
A.13. Vista lateral del <i>Robot Shear</i>	81
A.14. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Shear</i> parte A	82
A.15. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Shear</i> parte B	83
A.16. Vista en corte del molde del <i>Robot Shear</i> parte A	84
A.17. Vista en corte del molde del <i>Robot Shear</i> parte B	84
A.18. Vista lateral del diseño <i>Robot Uniaxial</i>	85
A.19. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Uniaxial</i> parte A	86
A.20. Diseño del molde para enmallado interno del <i>Robot Uniaxial</i> parte B	87
A.21. Vista en corte del molde del <i>Robot Uniaxial</i> parte A	88
A.22. Vista en corte del molde del <i>Robot Uniaxial</i> parte B	88
A.23. Vista lateral del diseño <i>Robot Rotator</i>	89
A.24. Diseño del molde para enmallado interno del Robot Rotador parte A	90
A.25. Diseño del molde para enmallado interno del Robot Rotador parte B	91
A.26. Vista en corte del molde del <i>Robot Rotator</i> parte A	92
A.27. Vista en corte del molde del <i>Robot Rotator</i> parte B	92
A.28. Diseño del molde A exterior de cada robot	93
A.29. Diseño del molde B exterior de cada robot	94
B.1. Código utilizado en arduino para el control de un robot modular parte A	96
B.2. Código utilizado en arduino para el control de un robot modular parte B	97
B.3. Código utilizado en arduino para el control de un robot modular parte C	98

B.4. Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte A	99
B.5. Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte B	100
B.6. Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte C	101
B.7. Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte D	102

Capítulo 1

Introducción

La robótica modular es un área de la robótica la cual está compuesta por unidades interconectadas llamadas módulos, que se unen a través de interfaces de acoplamiento. Los módulos son unidades con diferentes tipos sistemas, e.g. de actuación, sensores, medios de procesamientos de datos, entre otros. A pesar de ser independientes entre sí, los módulos se encuentran dotados de sistema de unión que permite su conexión para formar un sistema robótico con mayores capacidades [1], [2].

Investigadores han utilizado sistemas robóticos modulares reconfigurables [3], [4] para poder construir sistemas morfológicos variables. Además de la actuación, detección y control convencional típicamente encontrado en robots de morfología fija, los robots auto-reconfigurables también pueden cambiar deliberadamente su propia forma reorganizando la conectividad de sus partes.

Un campo de la robótica llamada robótica blanda ha sido desarrollado en los últimos años, consiguiendo excelentes resultados en la implementación de sensores, actuadores y mecanismos. Estos robots están compuestos por un tipo de goma, silicona u otro material deformable logrando obtener un robot elástico, flexible, ligero, capaz de soportar golpes, torsiones, compresiones y/o expansiones [5], [6]. Gracias a estas cualidades, se ha podido simular el comportamiento, no solo animales invertebrados e.g., gusanos de tierra, pulpos, entre otros [7], [8], [9], [10], [11], [12] sino también los vertebrados tratando de imitar músculos usando diferentes dispositivos que ejerzan algún tipo de fuerza para su deformación [13], [14], [15].

La robótica modular blanda utiliza el principio de la robótica modular pero se basa en el uso de materiales flexibles como los usados en la robótica blanda. Se han realizado investigaciones donde los robots modulares blandos han imitado algunos movimientos fundamentales de las células [16], [17].

En esta tesis se creará un grupo de robots modulares blandos capacitados de realizar diferentes tipos de movimientos y en ejecutar diversas tareas en conjunto. Para lograr lo anterior se diseñarán, simularán y fabricarán las unidades blandas y se compararán los datos experimentales y los datos de modelos matemáticos de elementos finitos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos generales

Diseñar, simular, fabricar y modelar los componentes de una población heterogénea de robots modulares blandos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar cinco robots modulares blandos. Los movimientos seleccionados son: Expansión uniaxial en el eje z, expansión biaxial en los ejes x e y, rotación en el eje z, deslizamiento de una cara en el eje x y por ultimo inclinación de una cara en el eje y.
- Fabricar cada uno de los robots empleando técnicas de litografía blanda y un reforzado de fibra.
- Caracterizar el comportamiento electromecánico de cada robot modular mediante el ajuste de modelos matemáticos y obtención de series de tiempo de movimiento.
- Proyectar configuraciones de robots modulares que puedan dar respuesta a tareas de desplazamiento y manipulación.
- Caracterizar el comportamiento de las configuraciones resultantes mediante el ajuste de modelos matemáticos.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Robótica modular

La robótica modular se refiere a una familia de sistemas robóticos compuesto de múltiples unidades relativamente pequeñas llamadas módulos, con interfaces de acoplamiento uniformes que permiten, e.g. la transferencia de fuerzas y momentos mecánicos, potencia eléctrica y comunicación a través del robot. Si bien estos pueden ser utilizados de forma independiente, los módulos robóticos poseen algún tipo de sistema de acoplamiento que permite la interconexión entre módulos logrando crear un gran sistema robótico con mayores capacidades. Esa característica hace que los robots modulares sean llamados sistemas reconfigurables o auto-reconfigurables. La modularidad ofrece importantes ventajas funcionales sobre los sistemas robóticos convencionales. El sistema de robot modular se puede auto configurar para lograr su movilidad en diferentes superficies reorganizando la conectividad entre cada módulo y así lograr adaptarse a diferentes situaciones o a su entorno. También esto permite que los robots puedan ejecutar tareas que al existir un solo módulo o un robot rígido no podrían llegar a lograrlo. La modularidad se obtiene acoplando unidades especializadas adicionales a la morfología original concluyendo así una tarea asignada. Las unidades especializadas adicionales pueden ser, e.g. tenazas, sensores, almacenamiento de energía, entre otros. Los robots modulares también ofrecen una ventaja económica derivada del potencial de reducir el costo total mediante la construcción de complejas estructuras robóticas a partir de un único -o algunos- módulos producidos en masa.

Los sistemas robóticos auto configurables modulares se pueden clasificar generalmente en varios grupos por la disposición geométrica de sus unidades. Las categorías antes mencionadas son: *lattices*, *chains* y *mobile systems*.

2.1.1. *Lattices Systems*

Los sistemas tipo *Lattice* están compuestos por unidades que están dispuestas y conectadas en un patrón tridimensional regular, como una cuadrícula simple cúbica o hexagonal. El control y el movimiento se pueden ejecutar en paralelo. Las arquitecturas de red generalmente ofrecen una reconfiguración más sencilla, ya que los módulos se mueven a un conjunto discreto de ubicaciones vecinas en las que los movimientos se pueden hacer en lazo abierto. La representación computacional también se puede escalar más fácilmente a sistemas más complejos. [18] [19] [20] [16]



Figura 2.1: Modular robot ATRON

2.1.2. *Chain Systems*

Los sistemas tipo *Chain* están compuestos por módulos de poco grado de libertad, que pueden conectarse con otros, formando estructuras complejas pero flexibles. A través de la articulación, este tipo de sistema tienen el potencial de alcanzar cualquier punto u orientación en el espacio, y por lo tanto son más versátiles, pero computacionalmente más complejos de representar y analizar y más difíciles de controlar. Un sistema tipo serpiente puede ser catalogado como un *chain system*. [21]

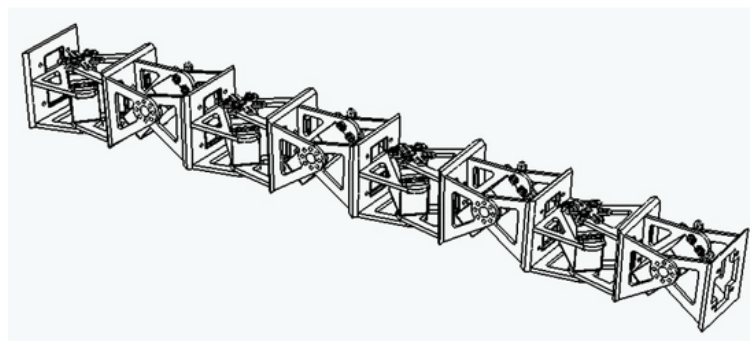


Figura 2.2: Modular robot GZ-I

2.1.3. *Mobile Systems*

Los sistemas móviles tienen la capacidad de usar el entorno para moverse independientemente y poder unirse entre sí formando un *Chain System*, *Lattice System* o un pequeño grupo de robots que ejecutan movimientos coordinados y en conjunto forman una red “virtual” de mayor escala. [22]

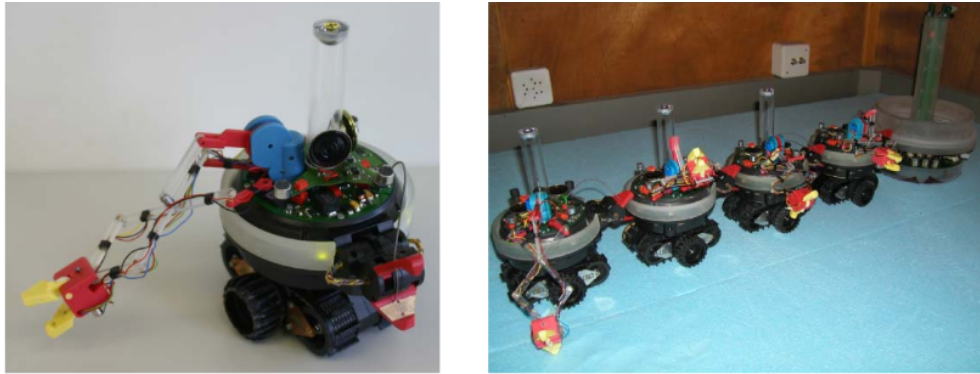


Figura 2.3: Swarm-BOT

En la figura 2.2 se muestra el robot modular GZ-1 el cual corresponde a un sistema tipo cadena *-chain system-*. Este robot tiene un solo grado de libertad y un solo modo de acoplamiento, sin embargo al conectar n -módulos, se consigue un sistema robótico con n -grados de libertad. Como se puede observar en la figura 2.1, el sistema de robot modular ATRON presenta un sistema tipo malla *-lattice system-*. Estos robots también tienen un solo grado de libertad pero poseen un modo de ensamble macho y hembra. Por último en la figura 2.3 se puede observar el sistema Swarm-Bot correspondiente a un sistema móvil. Este sistema consiste en un enjambre de robots móviles que tienen la habilidad de conectarse y desconectarse entre sí para realizar diferentes tipos de estructuras.

2.2. Robótica blanda

La robótica blanda es un campo de la robótica que se basa en la forma que tienen los organismos vivos para moverse y adaptarse a su entorno. A diferencia de los robots construidos a partir de materiales rígidos, los robots blandos permiten una mayor flexibilidad y adaptabilidad para realizar tareas, así como una mayor seguridad cuando se trabaja con humanos. Estas características permiten su uso potencial en los campos de la medicina y la fabricación.

La mayor parte del campo de la robótica blanda se basa en el diseño y la construcción de robots hechos completamente de materiales deformes, con el resultado final similar a los invertebrados como gusanos y pulpos. [7]

Además, ciertos mecanismos robóticos blandos se pueden usar como una pieza en un robot más grande y rígido. Existen pinzas robóticas blandas para agarrar y manipular objetos, y tienen la ventaja de producir una pequeña fuerza para sostener objetos delicados sin llegar a quebrarlos.

Por otro lado, existen robots rígidos blandos híbridos que pueden ser construidos utilizando una estructura rígida interna con exteriores blandos para mayor seguridad. El exterior blando puede ser multifuncional, ya que puede actuar tanto como actuadores para el robot, como los músculos de los vertebrados, y como relleno en caso de colisión con una persona.

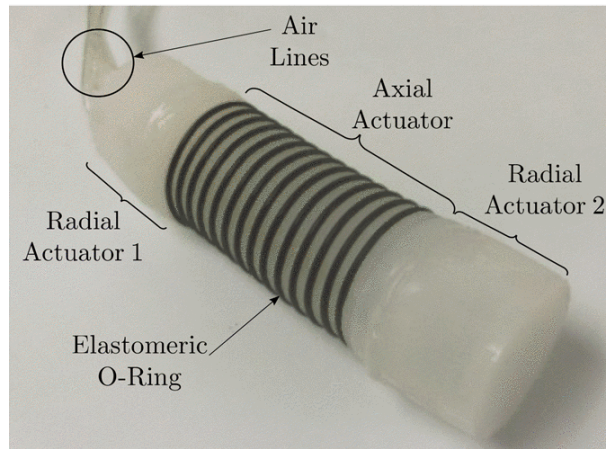


Figura 2.4: *Soft robot earthworm*

2.2.1. Manufactura

Las técnicas de fabricación convencionales, como las técnicas sustractivas como la perforación y el fresado, no son útiles cuando se trata de construir robots blandos ya que estos robots tienen formas complejas con cuerpos deformables. Es por ello que se han desarrollado técnicas de fabricación tales como el *Shape Deposition Manufacturing* -SDM-, el proceso *Smart Composite Microstructure* -SCM-, la impresión multimaterial en 3D y *Soft Lithography*.

SDM es un tipo de prototipado rápido en el que la deposición y el mecanizado se producen cíclicamente. Esencialmente, uno deposita un material, lo mecaniza, incrusta una estructura deseada, deposita un soporte para dicha estructura y luego mecaniza el producto hasta la forma deseada que incluye el material depositado y la parte incrustada. El parte integrada puede incluir circuitos, sensores y actuadores, y científicos han integrado con éxito los controles dentro de los materiales poliméricos para crear robots blandos, como el Stickybot [23] y el iSprawl [24].

SCM es un proceso mediante el cual se combinan cuerpos rígidos de *Carbon Fiber Reinforced Polymer* -CFRP- con ligamentos poliméricos flexibles. El polímero flexible actúa como uniones para el esqueleto. Con este proceso, se crea una estructura integrada de CFRP y ligamentos poliméricos mediante el uso de mecanizado láser seguido de laminación. Este proceso -SCM- se utiliza en la producción de robots de mesoescala, ya que los conectores de polímero sirven como alternativas de baja fricción a las uniones por pasador [25] [26].

Con el uso de la impresión en 3D es posible imprimir una amplia gama de tintas de silicona utilizando RoboCasting [27] o conocida como *Direct Ink Writing* -DIW-. Este método de fabricación permite una producción sin costuras de *Fluidic Elastomer Robots* -FEA- [28]. Esta técnica evita los inconvenientes en la fabricación convencional, como la delaminación entre las partes pegadas. Se pueden utilizar materiales que pueden cambiar su forma automáticamente al interactuar con el agua, la luz o el calor.

La *Soft Lithography* es una técnica de fabricación rápida basado en la impresión 3D, moldeado y estampado de un elastómero. En la *soft lithography* se utiliza un elastómero como un estampador el cual tiene un patrón definido en su superficie y que es utilizado para

generar replicas idénticas de ese diseño con tamaño macro- nanoescalado [29] [30].

2.2.2. Control

Todos los robots blandos requieren algún sistema para generar fuerzas de reacción, para permitir que el robot se mueva e interactúe con su entorno. Debido a la naturaleza conforme de estos robots, este sistema debe poder mover el robot sin el uso de materiales rígidos para actuar como huesos en organismos, o el marco metálico en robots rígidos. Sin embargo, existen varias soluciones a este problema de ingeniería que han encontrado uso, cada una con ventajas y desventajas.

Uno de estos sistemas utiliza actuadores de elastómeros dieléctricos -*Dielectric Elastomer Actuators*-, materiales que cambian de forma mediante la aplicación de un campo eléctrico de alta tensión. Estos materiales pueden producir fuerzas elevadas. Sin embargo, estos materiales son más adecuados para aplicaciones en robots rígidos, ya que se vuelven ineficientes cuando no actúan sobre un esqueleto rígido. Además, las altas tensiones requeridas pueden convertirse en un factor limitante en las posibles aplicaciones prácticas para estos robots.

Otro sistema utiliza resortes hechos de aleación de memoria de forma. Aunque son de metal, un material tradicionalmente rígido, los resortes están hechos de alambres muy finos y son tan conformes como otros materiales blandos. Estos resortes tienen una proporción de fuerza a masa muy alta, pero se extienden a través de la aplicación de calor, que es ineficiente en cuanto a la energía.

Los músculos artificiales neumáticos -*Pneumatic Artificial Muscles PAM*- son otro método más utilizado para controlar robots blandos. Al cambiar la presión dentro de un tubo flexible, actuará como un músculo, contrayéndose y extendiéndose, y aplicando fuerza a lo que está unido. Mediante el uso de válvulas, el robot puede mantener una forma determinada usando estos músculos sin entrada de energía adicional. Sin embargo, este método generalmente requiere una fuente externa de aire comprimido para funcionar. [31]

2.2.3. Actuador con una capa reforzada de fibra

El uso de una capa reforzada de fibra en el diseño del robot modular blando -o en otro sistema- restringe la expansión natural de la cámara interna del actuador y tiene un rol importante en la generación del movimiento de flexión en el mismo. Asumiendo que la fibra es inextensible, el paso de la fibra -i.e. la densidad del bobinado- es una variable esencial para ser considerada en el diseño del actuador. Para músculos artificiales neumáticos, el cambio del paso de la fibra es una parte fundamental para su movimiento. [32]

El refuerzo circunferencial proporcionado por las fibras limita la expansión radial y promueve la extensión lineal, mientras que la capa limitadora de deformación en la base restringe la extensión lineal en una cara del actuador. Por lo tanto, a medida que el actuador se presuriza, parte de él se expande mientras que la porción limitada por esfuerzo restringe cualquier expansión lineal a lo largo de una superficie. [33]

En la imagen superior, se presenta la expansión del actuador sin limitadores de deformaciones. El actuador que esta en el medio tiene un refuerzo circunferencial el cual evita

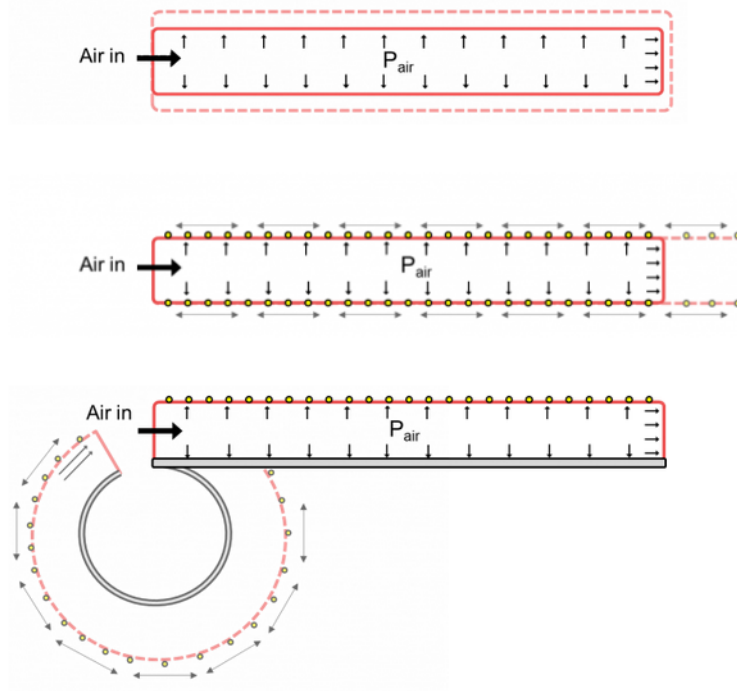


Figura 2.5: Actuadores reforzados con fibra en vista de corte.

la expansión radial y facilita la extensión lineal. Y el último actuador posee una lámina inextensible que facilita la torsión del actuador.

Angulo de la fibra

Investigadores han analizado la movilidad de diferentes tipos de polímeros reforzados con fibra de carbono -*Fiber Reinforced Elastomeric Enclosures*- basados en relaciones geométricas simples que se originan debido a la inextensibilidad de las fibras y la incompresibilidad de los fluidos. [34] [35]

Ha sido demostrado que el ángulo del paso de la fibra influye enormemente en la realización de una amplia gama de movimientos, que incluyen extensión axial, expansión radial y torsión.[36]

2.3. Robótica modular blanda

La robótica modular blanda es un línea relativamente nueva en el campo de la robótica, la cual utiliza el principio de la robótica modular pero se basa en el uso de materiales flexibles como los usados en la robótica blanda. Se han realizado investigaciones donde los robots modulares blandos han logrado imitar algunos movimientos fundamentales de las células. Los movimientos morfogenéticos realizados son la involución, invaginación, evaginación, epibolia y delaminación. [16]

Por otro lado, InflatBits es un kit de construcción modular que permite la exploración de sistemas cinemáticos accionados con neumática. Este set contiene diferentes bloques basados

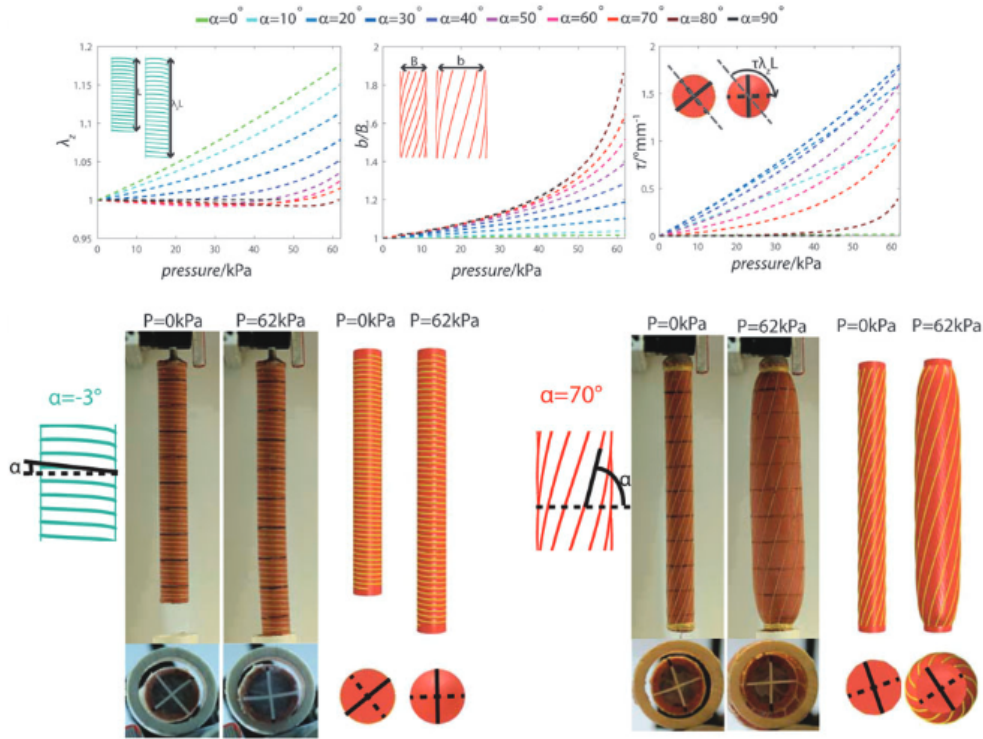


Figura 2.6: Actuadores con diferentes ángulos en la fibra

en el principio de la robótica blanda tales como una cámara de aire inflable blanda, elementos de restricción, conectores de aire, entre otros. Los módulos y conectores InflatiBits son compatibles con partes de Lego estándar permitiendo a los niños integrarlos en entornos de juego existentes. [37]

Existe una investigación en la cual ha sido presentado el desarrollo y la caracterización de un mecanismo de conexión activo para robots modulares blandos basados en electroadhesión. De acuerdo con los principales requisitos del mecanismo, han probado la influencia del tamaño de la almohadilla, la suavidad del módulo y la desalineación de la almohadilla en la fuerza de la conexión. Ellos han concluido que la electroadhesión es adecuada como principio de conexión para módulos blandos cuando es de fundamental importancia la eficiencia por sobre un amplio rango de suavidad, tolerancia a la alineación y fácil desprendimiento. En comparación con otros principios, la ventaja que presenta la electroadhesión es debida a que se puede integrar en la membrana blanda -o en un cuerpo blando- con muy poca invasión y permite el desprendimiento controlado. Sin embargo este mecanismo es apropiado en el uso de módulos blandos livianos como por ejemplo en un sistema robótico modular estocástico blando. [38] [39]

2.4. Modelamiento de un material hiperelástico

2.4.1. Métodos de elementos finitos

El método del elemento finito es una técnica numérica para resolver problemas que se pueden describir por ecuaciones diferenciales parciales o que pueden ser formulados por medio

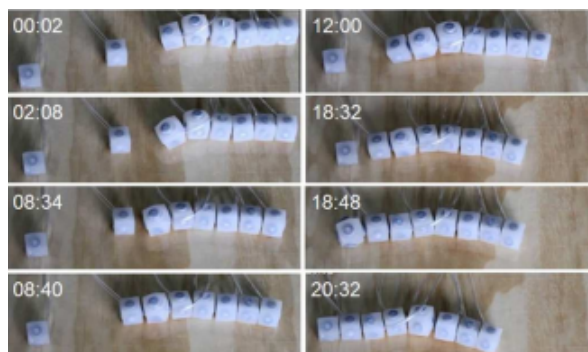


Figura 2.7: *Soft Modular Robotic Cubes*

de una minimización de un cálculo variacional. El método del elemento finito es una herramienta de análisis muy poderosa que permite obtener soluciones aproximadas a una amplia variedad de problemas de mecánica en el continuo. La premisa básica es que una región de solución puede ser modelada analíticamente reemplazándola con un arreglo de elementos discretos. Esto permite reducir un número infinito de incógnitas del problema a uno con un número finito de incógnitas. Por otro lado, el método también permite variar las condiciones -e.g. parámetros elásticos, viscosidad, densidad, temperatura, entre otros- de los elementos individualmente o en grupos de acuerdo a las ecuaciones constitutivas que se empleen en el problema.

El modelo analítico rápidamente genera información sobre la respuesta de un actuador al aire presurizado para una geometría particular. Sin embargo, no puede capturar ciertos aspectos del comportamiento del actuador blando, como la interacción de capas internas de diferentes materiales. Los modelos *Finite Element Method* -FEM-, por otro lado, proporcionan una descripción más realista de la respuesta no lineal del sistema, aunque a un mayor costo computacional. Una ventaja adicional de FEM es que la deformación -y el esfuerzo- en los actuadores blandos se pueden visualizar fácilmente, lo que permite una mejor comprensión de la influencia de la tensión local en el rendimiento global del actuador. Los trabajos previos en modelado FEM en actuadores blandos con un refuerzos de fibra, han demostrado el comportamiento esperado a la flexión [11], pero se ha realizado pocos trabajos para validar estos modelos experimentalmente o para caracterizar la rigidez del actuador y las capacidades de generación de fuerza [40], [41].

El modelamiento de un material hiperelástico es regularmente usado para representar el comportamiento a grandes deformaciones del material en un análisis de elementos finitos. Estos son comúnmente utilizados para modelar el comportamiento mecánico de elastómeros. En relación con los elastómeros, los modelos hiperelásticos son también usados para la aproximación del comportamiento del material en tejidos biológicos entre otros.

Los materiales linealmente elásticos son descritos a través de dos constantes del material -el módulo de Young y el coeficiente de Poisson-. En contraste, los materiales hiperelásticos son descritos mediante una función de densidad de esfuerzo-energía.

La función de densidad de esfuerzo-energía puede ser usada para derivar un modelo no lineal constitutivo -i.e., esfuerzo en función de grandes deformación como un gradiente de

deformación o tensores de Cauchy-Green.-

El modelo constitutivo de un material de silicona isotrópica hiperelástica es expresado en términos de una función de la densidad de energía de deformación, W , la cual depende de las invariantes de tensores de deformación $-I_1, I_2$ e I_3 -. Las invariantes de deformación están definidas como a continuación:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.1)$$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_1^2\lambda_3^2 \quad (2.2)$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (2.3)$$

Donde λ_i es la relación de alargamientos principales. Por tanto, W es una función de relaciones de alargamiento principales.

$$W = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (2.4)$$

El esfuerzo nominal σ_i está dado por la derivación de la función de la densidad de energía de deformación con respecto a la relación de alargamiento:

$$\sigma = \frac{\delta W}{\delta \lambda_i} - \frac{1}{\lambda_i} p \quad (2.5)$$

Donde p es la presión hidroestática. Para elastómeros incompresibles, I_3 es tomado como una constante ($I_3 = 1$) Siempre y cuando, el esfuerzo nominal no sea dependiente de él.

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 = 1 \quad (2.6)$$

$$\lambda_3 = (\lambda_1\lambda_2)^{-1} \quad (2.7)$$

El elastómero incompresible en un prueba uniaxial, exhibe la relación de estiramiento (λ) en la dirección de la elongación o compresión y el cero del esfuerzo principal en las otras dos direcciones. Las relaciones de alargamiento principales en las otras dos direcciones están dadas por:

$$\lambda_1 = \lambda; \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.8)$$

La relación de esfuerzo-deformación del material puede ser expresada usando diferentes modelos constitutivos que dependen de una serie de constantes arbitrarias. Ya que hay varios modelos hiperelásticos mencionados en la literatura, encontrar el modelo más apropiado que

tenga alta precisión y bajos parámetros de materiales es esencial para el análisis de elementos finitos.

Muchos modelos hiperelásticos constitutivos como el modelo de Mooney-Rivlin, el modelo de Yeoh, el modelo de Ogden y el modelo de Arruda-Boyce son mostrados en la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1: Materiales hiperelásticos

Modelo Hiperelástico	Función de la densidad de energía de deformación incompresible
Mooney-Rivlin 3 Términos	$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)$
Mooney-Rivlin 5 Términos	$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$
Yeoh 3 Términos	$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$
Ogden de 2 Términos	$W = \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$
Arruda-Boyce	$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{c_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i), c_1 = \frac{1}{2}, c_2 = \frac{1}{20}, c_3 = \frac{11}{1050}, c_4 = \frac{19}{7050}, c_5 = \frac{519}{673750}$

Los modelos hiperelásticos generalmente se clasifican en dos grandes categorías: modelos fenomenológicos basados en descripciones del comportamiento del material observado y modelos mecánicos derivados de la información sobre las estructuras materiales subyacentes. Los modelos de Ogden [42] y Yeoh [43] así como otros modelos de tipo polinomial, son modelos ampliamente utilizados de los que cabe esperar buenos resultados para los materiales blandos. Los modelos mecánicos basados en la mecánica estadística, como los modelos Arruda-Boyce [44] y Van-der-Waals [45], pueden proporcionar soluciones precisas en tensiones más pequeñas, pero no son fácilmente aplicables al modelado de actuadores neumáticos blandos -*Soft pneumatic actuators*-, donde más se desean los modelos complejos para así poder capturar el comportamiento del material determinado a través de múltiples modos de prueba experimental.

2.4.2. Mooney-Rivlin Model

En la mecánica de medios continuos, un material de Mooney-Rivlin [46] [47] es un tipo de material hiperelástico modelable mediante una función densidad de energía de deformación W que es una combinación lineal de dos invariantes algebraicos del tensor deformación de Cauchy-Green izquierdo \mathbf{B} . La función densidad de energía de deformación para un material de Mooney-Rivlin incompresible viene dada por:

$$W = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3), \quad (2.9)$$

Donde C_1 y C_2 son constantes que se determinan empíricamente para cada material concreto y \bar{I}_1 y \bar{I}_2 son el primer invariante y segundo invariante del componente unimodular del \mathbf{B} .

$$\bar{I}_1 = J^{-2/3} I_1; I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2; J = \det(F) \quad (2.10)$$

$$\bar{I}_2 = J^{-4/3} I_2; I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (2.11)$$

Donde \mathbf{F} es el gradiente de deformación y $J = \det(F) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$.

El modelo Mooney-Rivlin es un caso especial del “modelo de Rivlin generalizado” -llamado también como modelo hiperelástico polinomial- el cual tiene la siguiente forma:

$$W = \sum_{p,q=0}^N C_{pq} (\bar{I}_1 - 3)^p (\bar{I}_2 - 3)^q + \sum_{m=1}^m D_m (J - 1)^{2m} \quad (2.12)$$

Con $C_{00} = 0$ donde C_{pq} son constantes materiales relacionadas con la respuesta frente a distorsión y D_m son las constantes elásticas relacionadas con el cambio de volumen. Para un material compresible de Mooney-Rivlin $N = 1$, $C_{01} = C_2$, $C_{11} = 0$, $C_{10} = C_1$, $M = 1$ y se tiene:

$$W = C_{01} (\bar{I}_2 - 3) + C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + D_1 (J - 1)^2 \quad (2.13)$$

Si $C_{01} = 0$ se obtiene un material Neo-Hookeano, un caso especial de material de Mooney-Rivlin. Por consistencia con la elasticidad lineal en el límite de las pequeñas deformaciones, es necesario que se satisfaga la condición:

$$k = 2 \cdot D_1 \quad ; \quad \mu = 2(C_{01} + C_{10}) \quad (2.14)$$

Donde k es el módulo de compresibilidad -*bulk modulus*- y μ es el módulo de elasticidad transversal -*shear modulus*-.

2.4.3. *Yeoh Model*

El modelo de material hiperelástico de Yeoh [43] es un modelo para la deformación de materiales elásticos no-lineales, casi incompresibles, como el caucho. El modelo se basa en la observación de Ronald Rivlin de que las propiedades elásticas del caucho pueden describirse utilizando una función de densidad de energía de tensión que es una serie de potencia en los invariantes de deformación I_1 , I_2 , I_3 de los tensores de deformación Cauchy-Green. El modelo Yeoh para un elastómero incompresible es una función solo de I_1 . Como se usa una forma polinómica de la función de densidad de energía de tensión, pero no todas las tres invariantes del tensor de deformación de Cauchy-Green izquierdo, el modelo de Yeoh también se denomina modelo polinomial reducido.

El modelo original propuesto por Yeoh tenía una forma cúbica con solo dependencia I_1 y es aplicable a materiales puramente incompresibles. La densidad de energía de deformación para este modelo se escribe como:

$$W = \sum_{i=1}^n C_i (I_1 - 3)^i \quad (2.15)$$

Donde C_i son las constantes del material. La cantidad $2C_1$ puede interpretarse como el módulo de corte inicial. Cuando $n = 1$, el modelo Yeoh se reduce a un modelo Neo-Hookeano para materiales incompresibles. Para coherencia con la elasticidad lineal, el modelo Yeoh debe de satisfacer la siguiente condición:

$$2 \frac{\partial W}{\partial I_1}(3) = \mu (i \neq j) \quad (2.16)$$

Donde μ es el módulo de elasticidad transversal *-shear modulus-*. Ahora como $I_1 = 3(\lambda_i = \lambda_j = 1)$.

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = C_1 \quad (2.17)$$

Por lo tanto, la condición de coherencia para el modelo Yeoh es:

$$2C_1 = \mu \quad (2.18)$$

2.4.4. Ogden Model

El modelo de Ogden es usado para describir el comportamiento de la tensión-deformación no lineal de materiales hiperelásticos complejos como cauchos, polímeros y tejidos biológicos. El modelo fue desarrollado por Raymond Ogden en 1972 [42]. El modelo de Ogden, al igual que otros modelos de materiales hiperelásticos, supone que el comportamiento del material puede describirse mediante una función de densidad de energía de deformación, a partir de la cual se pueden derivar las relaciones tensión-deformación.

En el modelo de material de Ogden, la densidad de energía de deformación se expresa en términos de los alargamientos principales.

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (2.19)$$

Donde N , μ_p y α_p son constantes del material. Asumiendo que es un material incompresible, se puede reescribir como:

$$W(\lambda_1, \lambda_2) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_1^{-\alpha_p} \lambda_2^{-\alpha_p} - 3) \quad (2.20)$$

En general el módulo de elasticidad transversal *-shear modulus-* resulta como:

$$2\mu = \sum_{p=1}^N \mu_p \alpha_p \quad (2.21)$$

Con $N = 3$ y ajustando los parámetros del material, el comportamiento de un elastómero se puede describir con mucha precisión. Para valores particulares de las constantes del material, el modelo de Ogden puede ser reducido al sólido Neo-Hookiano ($N = 1, \alpha = 2$) o un material Mooney-Rivlin ($N = 2, \alpha_1 = 2, \alpha_2 = -2$ con las condiciones de restricción $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$).

Usando el modelo de material de Ogden, los tres valores principales de las tensiones de Cauchy ahora se pueden calcular como:

$$\sigma_j = -p + \lambda_j \frac{\partial W}{\partial \lambda_j} \quad (2.22)$$

Donde se hace uso de $\sigma_j = \lambda_j P_j$.

Capítulo 3

Diseño y modelado

La necesidad de realizar diferentes tipos de módulos nace de la inquietud de conocer cuál es el real potencial de una población heterogénea con ciertas características únicas en cada robot. Estos módulos han sido creados teniendo en mente los siguientes conceptos: Su diseño debe ser simple y deben ser capaces de inflarse y desinflarse sin perder elasticidad. Utilizando la información recopilada en la literatura, ha sido posible confeccionar diferentes unidades que satisfagan las necesidades planteadas como objetivo general, la creación de una población heterogénea de robots modulares blandos.

3.1. Datos preliminares

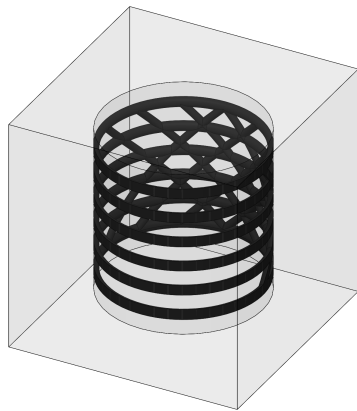
Los diseños han sido creados basados en las siguientes características.

Tabla 3.1: Características preliminares de los robots modulares blandos

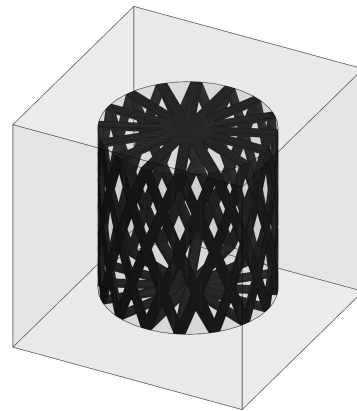
Dimension	23x23x23
Activation	Pneumatic
Material	Silicone
Shape	Cubic
Type	Chain
Funtion	<i>Tilt - Radial expansion - Shear - Rotate - Uniaxial expansion</i>

Se escoge una forma cúbica por ser una geometría sencilla que nos dará facilidad al momento de acoplar dos o más robots modulares. Se seguirá optando por el accionamiento neumático ya que trabajos previos se han utilizado este tipo de accionamiento con excelentes resultados. Según lo antes escrito, cada robot tendrán las siguientes características observables en la figura 3.1.

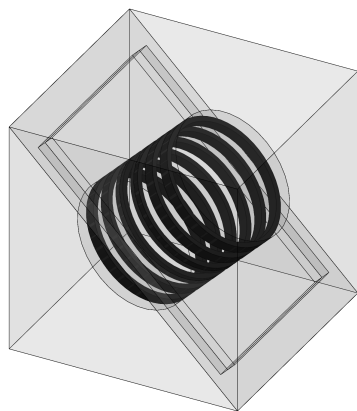
3.2. Módulos



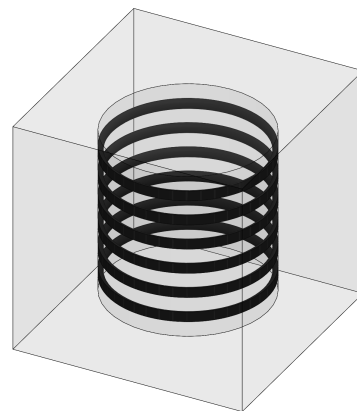
(a) *Robot Tilt*



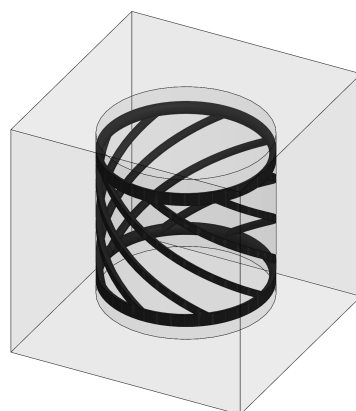
(b) *Robot Biaxial*



(c) *Robot Shear*



(d) *Robot Uniaxial*



(e) *Robot Rotator*

Figura 3.1: Diseño de Robot modulares

En la figura anterior 3.1 se exponen los diferentes tipos de robots modulares que se desean implementar en la población heterogénea modular blanda. Para una mejor comprensión visual se ha decidido recalcar el enmallado interno de cada robot para demostrar la diferencia entre cada módulo. Otras vistas de cada robot pueden ser observadas en los anexos A.1, A.2, A.7, A.8, A.13, A.18, A.23. Cada robot modular consta de una fibra idealmente inextensible de aproximadamente de 0.5 mm, la cual es utilizada para restringir y/o facilitar la deformación en ciertas direcciones. Gracias a lo anterior, cada tipo de robot tiene un enmallado único que al ser presurizado, responde de forma diferente al accionamiento neumático.

Para la generación del Robot Tilt 3.1a se puede observar que en el enmallado interno posee un área indeformable -ver detalles anexo A.1 A.2- y anillos concéntricos que evitan la expansión biaxial. Para la construcción de este módulo se utilizaron diferentes tipos de moldes, el molde para la elaboración del mallado -ver anexo A.5 y A.6- y el molde del robot como módulo cúbico -A.28 y A.29-. El ángulo de inclinación de la hélice para generar la zona rígida es aproximadamente de 30° , replicadas 4 veces entre 0° y 90° de la matriz y copiadas simétricamente para realizar las cruces en ambos moldes.

El Robot Biaxial 3.1b está formado por un enmallado el cual le da la capacidad de expandirse biaxialmente y evitar su expansión uniaxial perpendicular con respecto a la base del módulo -ver detalles anexo A.7 A.8-. Para poder lograr su comportamiento, se generó una hélice con un ángulo de inclinación aproximada de 70° , replicadas 16 veces alrededor del centro del robot y copiadas simétricamente modo espejo para así obtener el mallado del módulo. Para la construcción de este módulo se utilizaron dos tipos de moldes, el molde para la elaboración del mallado -ver anexo A.11 y A.12- y el molde del robot como módulo cúbico -A.28 y A.29-.

Para la formación del Robot Shear 3.1c se puede ver que el diámetro del enmallado es menor que el resto de las otras mallas, esto se debe a su posicionamiento diagonal en el módulo -ver detalle anexo A.13-. Esta malla posee anillos concéntricos con respecto a su propio eje, los cuales evitan la expansión biaxial y permitiendo solo la expansión uniaxial con respecto a su base. Este módulo posee además una malla plana en la diagonal perpendicular al enmallado antes señalado, logrando así un movimiento tipo corte o cizalla. Para la construcción de este módulo se utilizaron dos tipos de moldes, el molde para la elaboración del mallado -ver anexo A.16 y A.17- y el molde del robot como módulo cúbico -A.28 y A.29-.

El Robot Uniaxial 3.1d utiliza el mismo principio de diseño del robot Shear 3.1c -ver detalle anexo A.18-. Para la construcción de este módulo se utilizaron diferentes tipos de moldes, el molde para la elaboración del mallado -ver anexo A.21 y A.22- y el molde del robot como módulo cúbico -A.28 y A.29-. El diseño consta de anillos concéntricos con respecto a su eje que evitan la expansión biaxial.

El Robot Rotator 3.1e está formado por un enmallado el cual evita la expansión biaxial y permite la expansión uniaxial perpendicular con respecto a la base del enmallado, sin embargo gracias al diseño, se genera una rotación entre las caras del robot perpendiculares a su enmallado -ver detalle anexo A.18-. Para lograr este comportamiento, la malla interna está conformada de hélices con un ángulo de inclinación aproximada de 30° . Para la construcción de este módulo se utilizaron dos tipos de moldes, el molde para la elaboración del mallado -ver anexo A.26 y A.27- y el molde del robot como módulo cúbico -A.28 y A.29-.

3.3. Método de los elementos finitos

La utilización del método de los elementos finitos se fundamenta para la adquisición de una aproximación de las soluciones de las ecuaciones diferenciales que están asociadas a los modelos matemáticos hiperelásticos.

Para la configuración de los modelos, se han utilizado los diferentes parámetros adquiridos en la literatura. Dentro de la variada gama de modelos matemáticos hiperelásticos, se ha decidido utilizar los modelos Yeoh, Mooney-Rivlin y Ogden [43] [47] [42] cada uno de 3 términos para así poder capturar el comportamiento no-lineal del material Ecoflex 00-30. Los parámetros del modelo Mooney-Rivlin y Yeoh fueron adquiridos según ASTM D395 a una velocidad de 8.3 mm/s para la resistencia a la tracción uniaxial, y las muestras de compresión se comprimieron a una velocidad de 2 mm/s [48]. Por otro lado, los valores para el modelo Ogden fueron adquiridos mediante pruebas de tensión y compresión en direcciones uniaxiales, biaxiales y planar [49].

Tabla 3.2: Parámetros de Yeoh 3 términos

Model Yeoh 3T	Value -MPa-
C_{10}	7.61E-03
C_{20}	2.42E-04
C_{30}	-6.2E-07
D_1	0
D_2	0
D_3	0

Tabla 3.3: Parámetros de Ogden 3 términos

Model Ogden 3T	Value -MPa-
μ_1	2.4361E-02
α_1	1.7138
μ_2	6.6703E-05
α_2	7.0679
μ_3	4.5381E-04
α_3	-3.3659
D_1	3.2587
D_2	0
D_3	0

El Modulo de Young $E = 6E - 02\text{MPa}$ y el coeficiente de Poisson $\nu = 0,49$ son obtenidos desde la literatura [50] y la densidad es sacada del *Datasheet* del elastómero EcoFlex 00-30.

Según los resultados de [48], el mejor ajuste para el material Ecoflex 00-30 se obtuvo utilizando el modelo Mooney-Rivlin de 3 términos. También fue demostrado que el modelo de Yeoh fue capaz de proporcionar un excelente ajuste a un menor costo computacional debido a los pocos parámetros necesarios para las constantes de las propiedades del material en comparación con el modelo de Mooney-Rivlin.

Tabla 3.4: Parámetros de Mooney-Rivlin 3 términos

Model Mooney Rivlin 3T	Value -MPa-
C_{10}	8.9E-04
C_{01}	8E-03
C_{11}	1.35E-03
D_1	0
D_2	0
D_3	0

Para modelar el comportamiento de los robots modulares, se construyeron y analizaron modelos 3D FEM en el software Ansys¹. Las simplificaciones en el modelo se mantuvieron al mínimo para coincidir estrechamente con la configuración experimental. La entrada para aire presurizado no se tuvo en cuenta en el modelo ya que la presión se aplicó a todas las paredes internas de la matriz. Todas las partes de cada robot fueron modelados utilizando elementos híbridos cuadráticos tetraédricos sólidos. El material del devanado se modeló como elástico lineal con los siguientes parámetros: Modulo de Young $E = 3E03\text{MPa}$ y el coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ y una densidad de $1,1E - 06\text{kg}/\text{mm}^3$ [11].

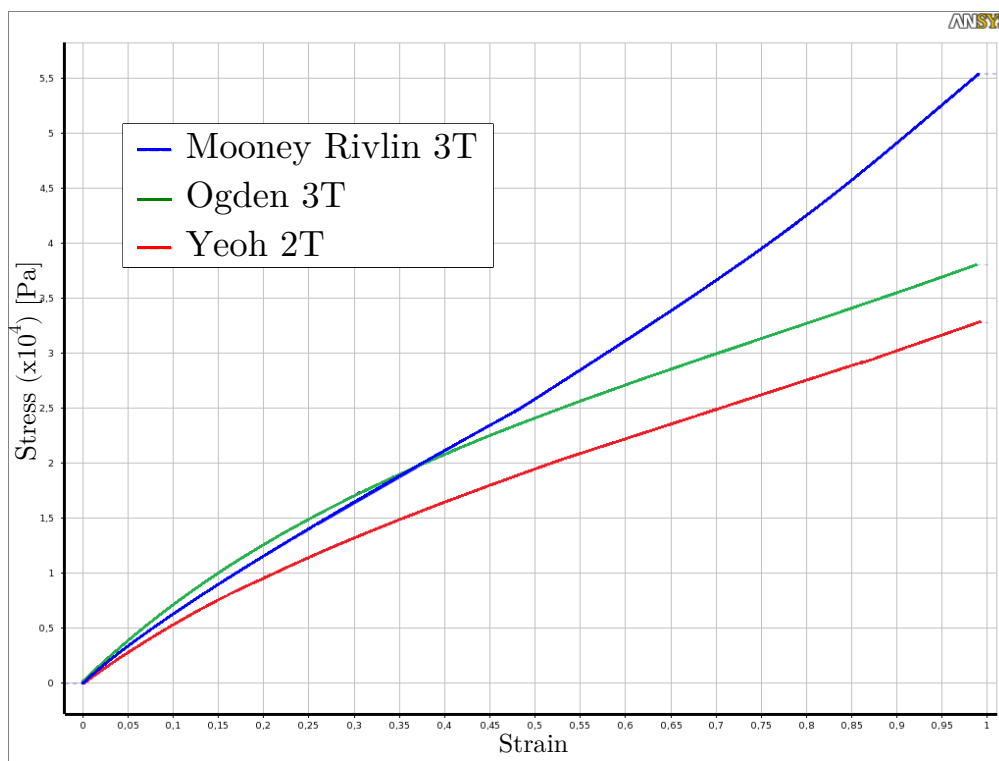


Figura 3.2: Comparación entre modelos matemáticos

Luego de utilizar los diferentes tipos de modelos matemáticos estudiados en esta tesis se decidió utilizar el modelo de Mooney-Rivlin de 3 términos presentados en la tabla [3.4]. Esta decisión es tomada por la aproximación que entrega la simulación en comparación a lo que se esperaba que hicieran cada módulo, también porque este modelo -en comparación con los

¹<https://www.ansys.com/>

otros- siempre converge a una solución esperada y por último por el tiempo que se requería para llegar a una solución.

En Ansys se realiza un análisis tipo *Transient Structural*. En *Engineering Data* se definen las propiedades físicas de cada material utilizados en la simulación. El tiempo de análisis corresponde a 20 segundos con 2000 subpasos. El presurizado aplicado en las paredes internas de los módulos esta descrita como la siguiente ecuación en el cual P es la presión en MPa.

$$\text{Pressure} = P * 5E05 * (-\cos(18 * \text{time}) + 1) \quad (3.1)$$

Se ha utilizado la ecuación 3.1 para describir un incremento leve en la presión por cada paso de tiempo. Con ello se busca que la solución al modelo matemático logre la convergencia.

Para lograr las simulaciones de cada módulo, es necesario definir una zona en la cual el desplazamiento, la velocidad y la rotación sean nulos. La zona elegida corresponde a una cara paralela de las caras del cilindro interior que, en las siguientes secuencias de imágenes, corresponde a la cara inferior de cada módulo.

En cada módulo se ha aplicado una presión diferente, con el objetivo de obtener la presión máxima que el módulo y el modelo matemático puede soportar sin que la solución pierda su convergencia.

3.4. Mallado

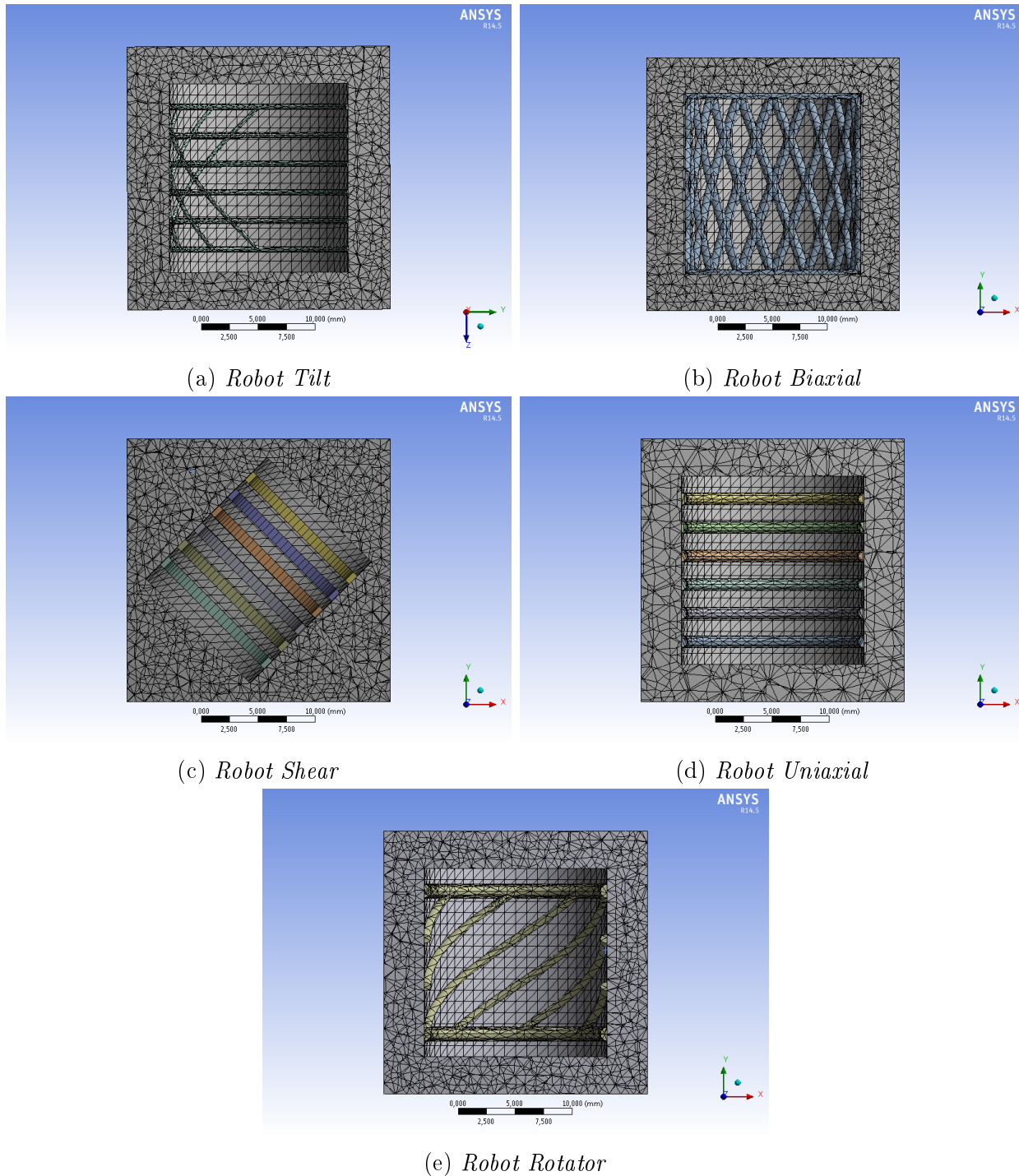
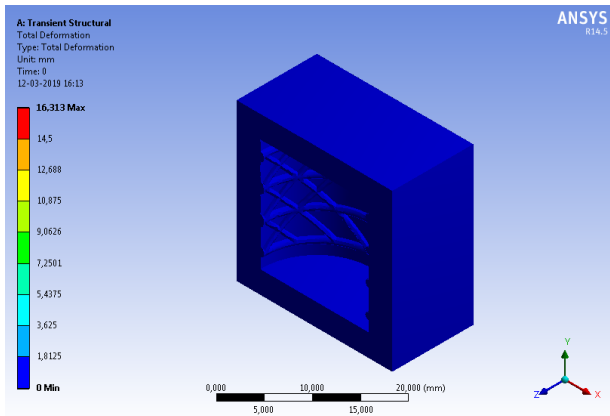


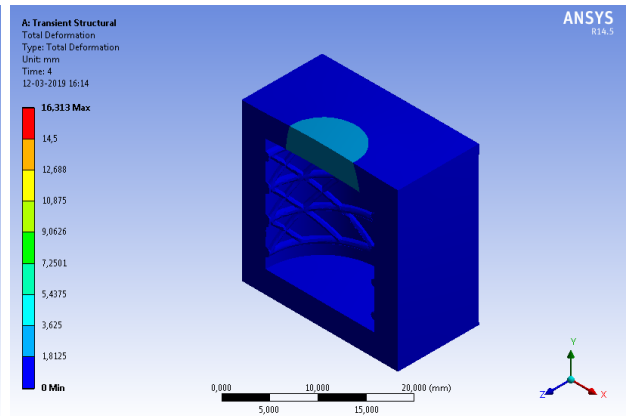
Figura 3.3: Mallado realizado en ANSYS para cada Robot Modular Blando

En la figura 3.3 se puede apreciar los diferentes mallados utilizados para cada robot modular blando utilizando las configuraciones que vienen por *Default* en ANSYS. Gracias a esto, se obtienen aproximadamente 120000 nodos y 85000 elementos.

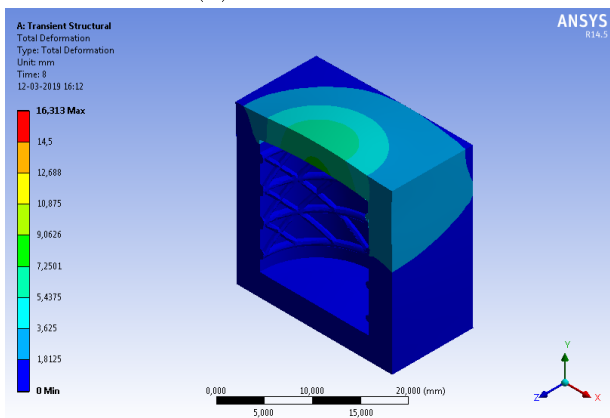
3.5. Simulaciones



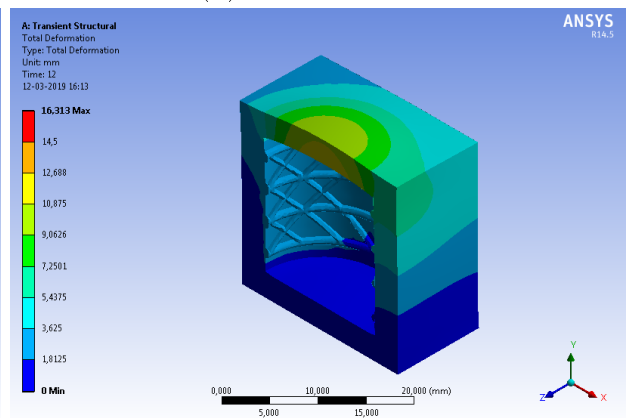
(a) *Robot Tilt* a 0s



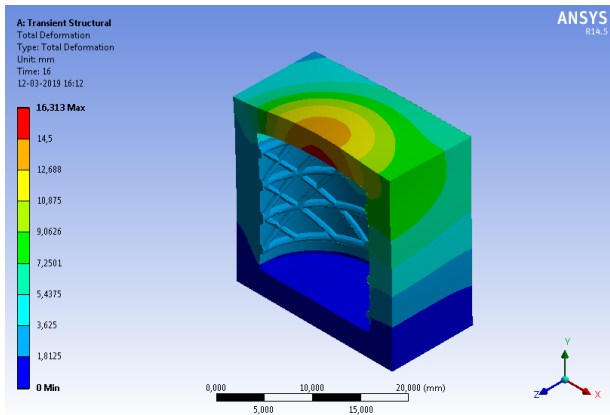
(b) *Robot Tilt* a 4s



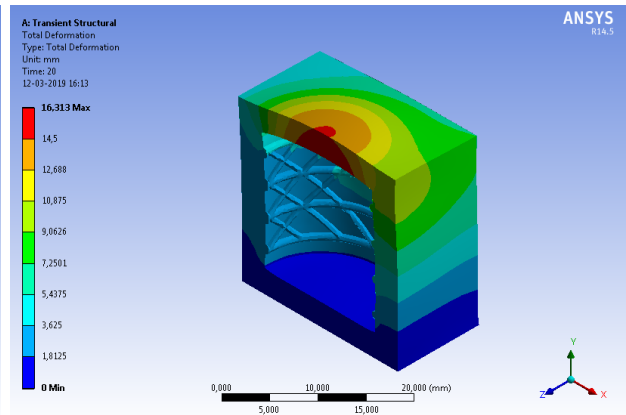
(c) *Robot Tilt* a 8s



(d) *Robot Tilt* a 12s



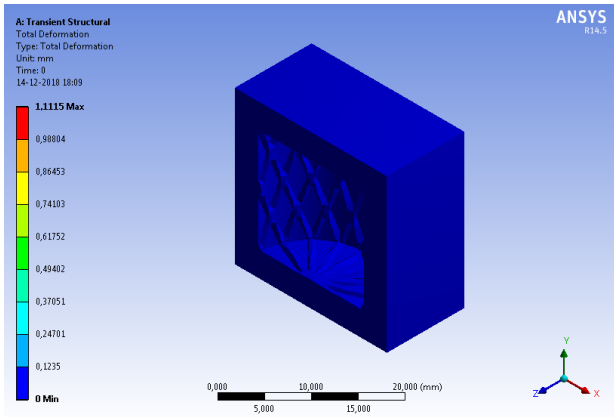
(e) *Robot Tilt* a 16s



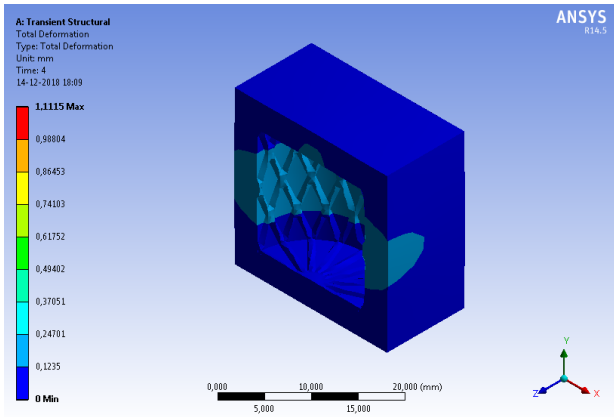
(f) *Robot Tilt* a 20s

Figura 3.4: Simulación *Robot Tilt*

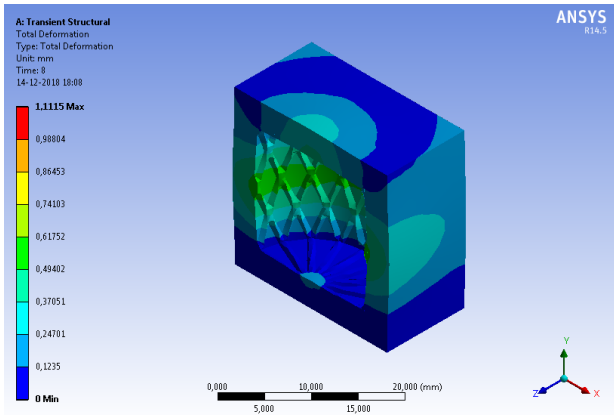
Robot Tilt es sometido a una presión de 6.7 PSI durante 20 segundos. En la secuencia de imágenes se muestra la deformación en los tres ejes. El color azul corresponde a una nula deformación y el color rojo corresponde a una deformación de 3.4101 mm.



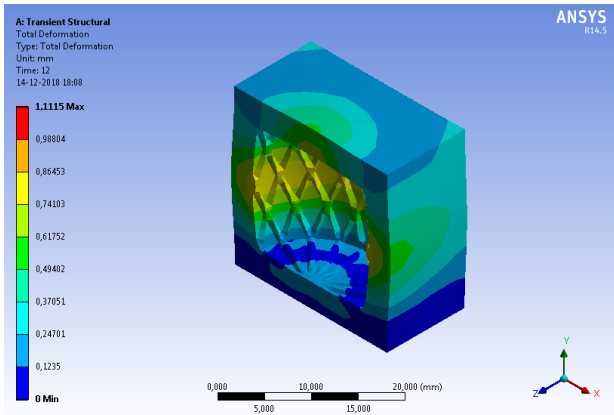
(a) *Robot Biaxial* a 0s



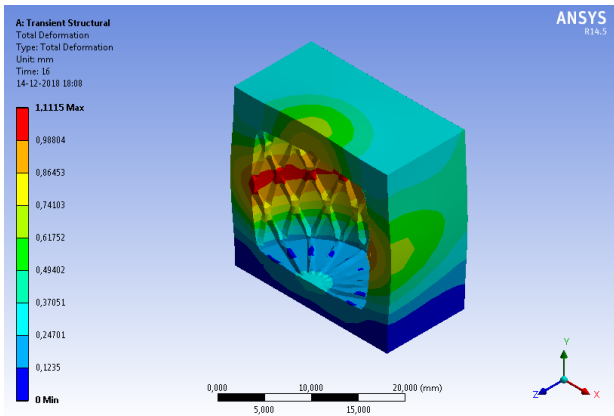
(b) *Robot Biaxial* a 4s



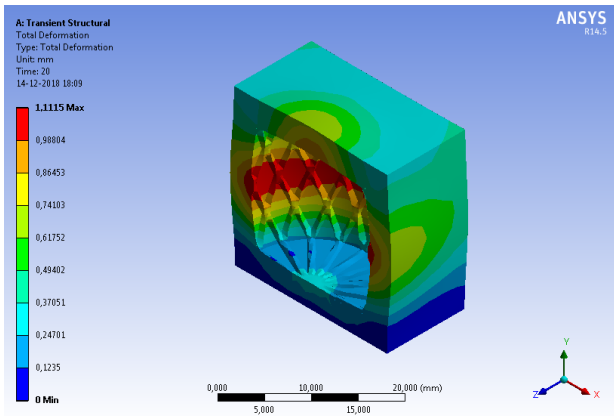
(c) *Robot Biaxial* a 8s



(d) *Robot Biaxial* a 12s



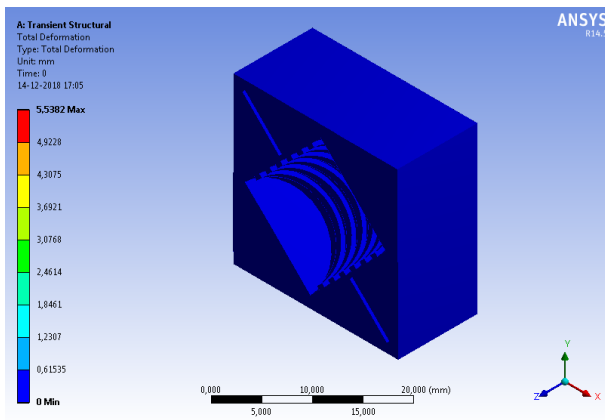
(e) *Robot Biaxial* a 16s



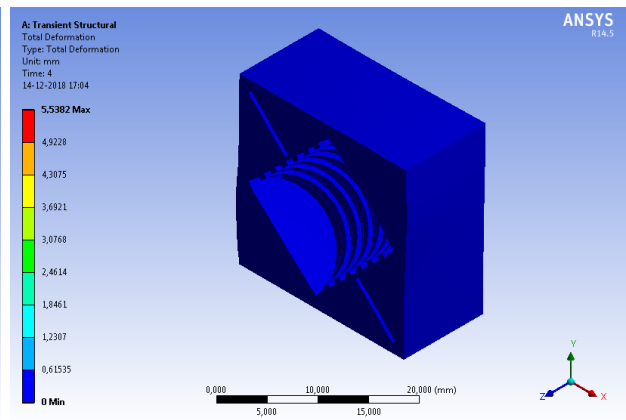
(f) *Robot Biaxial* a 20s

Figura 3.5: Simulación *Robot Biaxial*

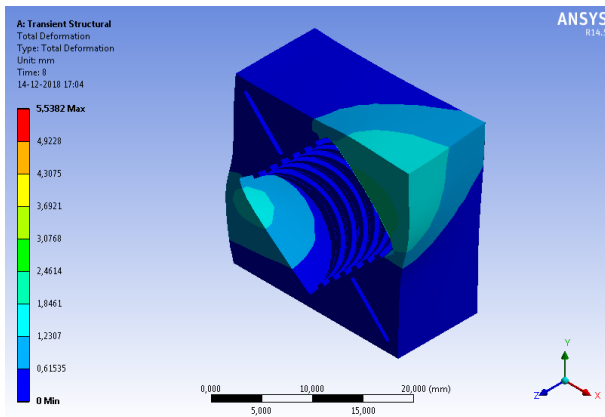
Robot Biaxial es sometido a una presión de 6.7 PSI durante 20 segundos. En la secuencia de imágenes se muestra la deformación en la dirección del eje X. El color azul corresponde a una deformación de 2.016 mm y el color rojo corresponde a una deformación de 2.0675 mm. El color verde corresponde a una deformación direccional cercana a cero.



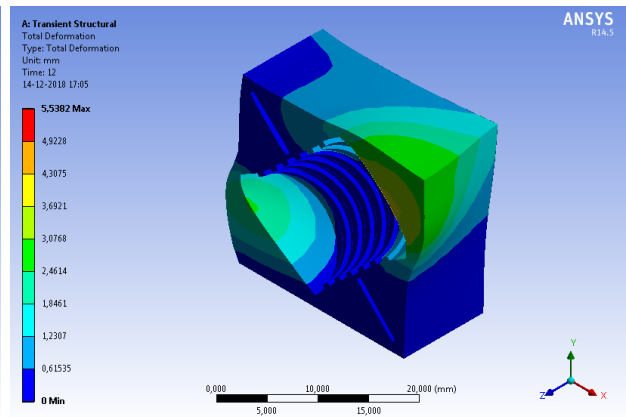
(a) *Robot Shear a 0s*



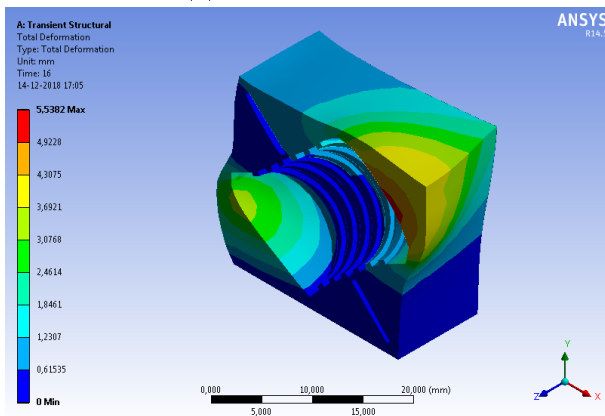
(b) *Robot Shear a 4s*



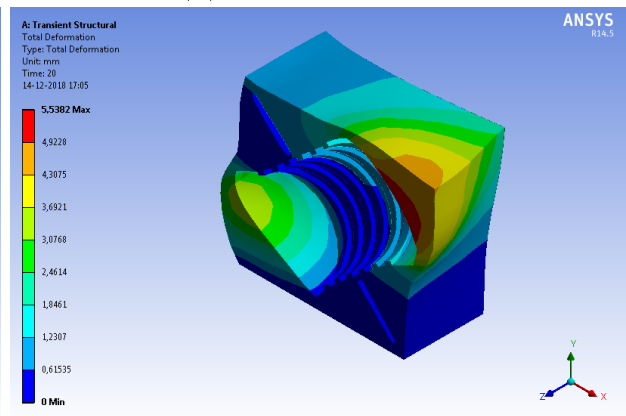
(c) *Robot Shear a 8s*



(d) *Robot Shear a 12s*



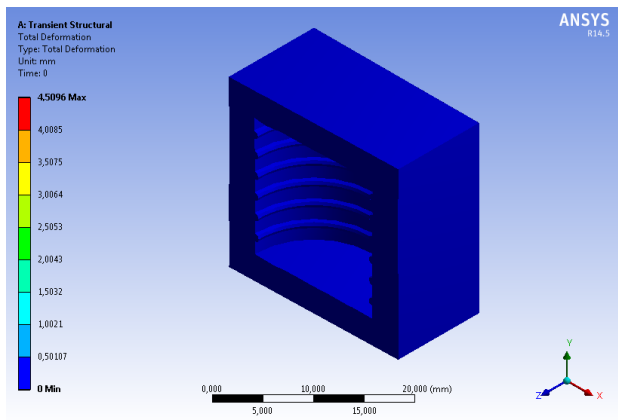
(e) *Robot Shear a 16s*



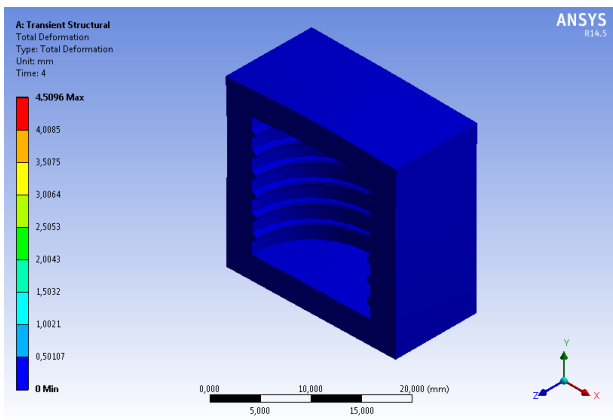
(f) *Robot Shear a 20s*

Figura 3.6: Simulación *Robot Shear*

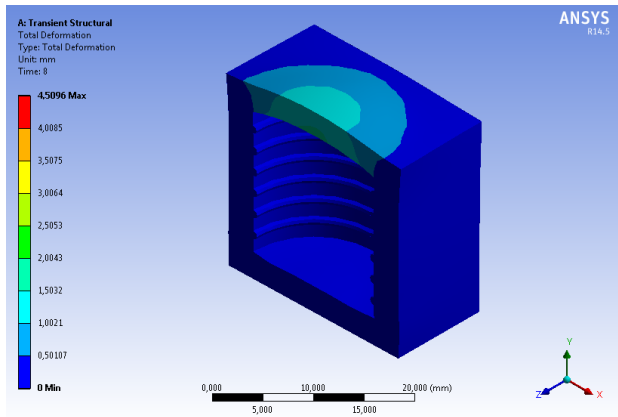
Robot Shear es sometido a una presión de 7.1 PSI durante 20 segundos. En la secuencia de imágenes se muestra la deformación en la dirección del eje X. El color azul corresponde a una deformación de 4.281 mm y el color rojo corresponde a una deformación de 6.657 mm. El color verde corresponde a una deformación direccional cercana a cero.



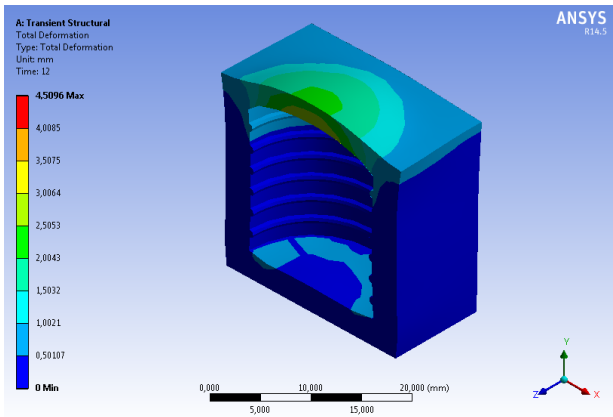
(a) *Robot Uniaxial* a 0s



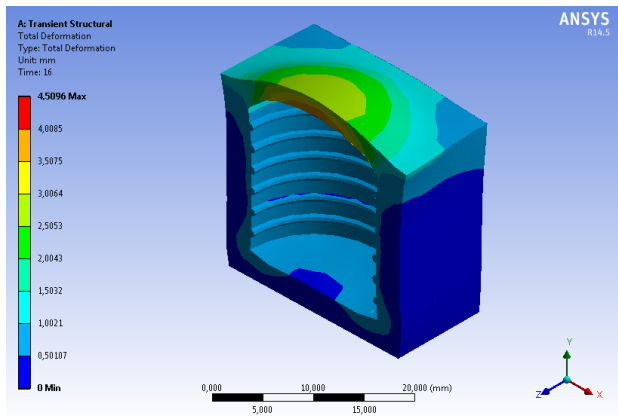
(b) *Robot Uniaxial* a 4s



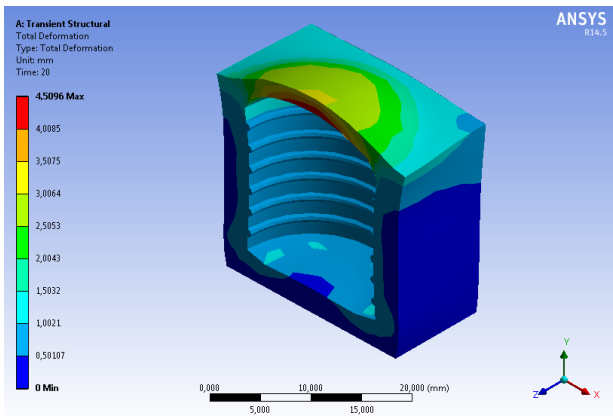
(c) *Robot Uniaxial* a 8s



(d) *Robot Uniaxial* a 12s



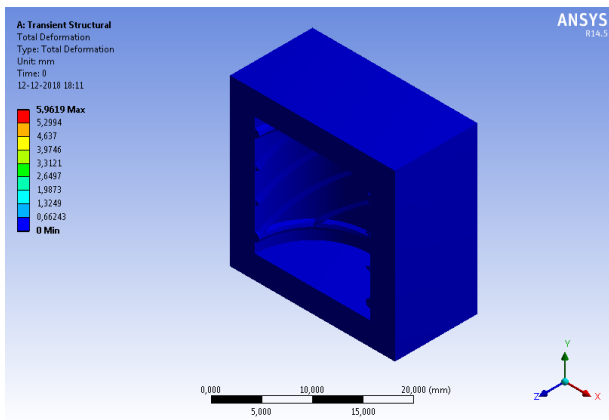
(e) *Robot Uniaxial* a 16s



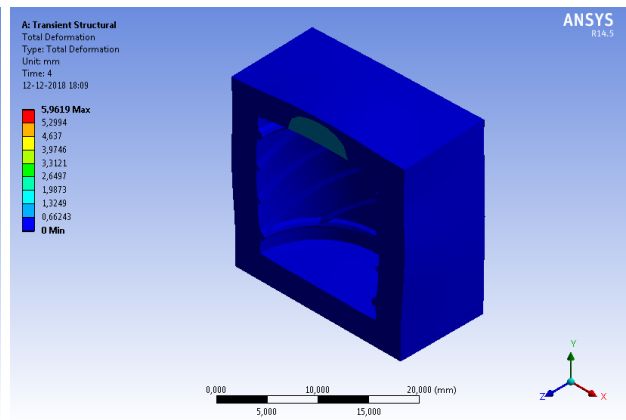
(f) *Robot Uniaxial* a 20s

Figura 3.7: Simulación *Robot Uniaxial*

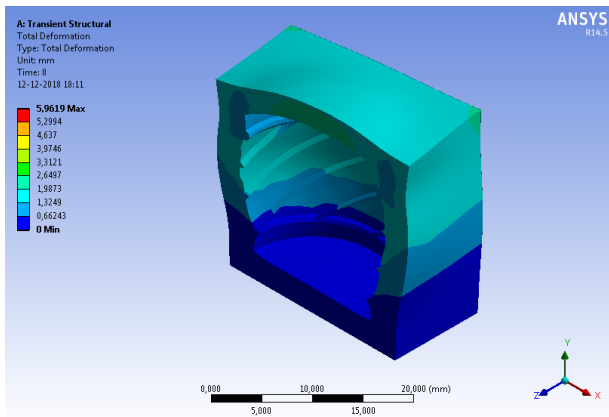
Robot Uniaxial es sometido a una presión de 6 PSI durante 20 segundos. En la secuencia de imágenes se muestra la deformación en los tres ejes. El color azul corresponde a una nula deformación y el color rojo corresponde a una deformación de 4.5096 mm.



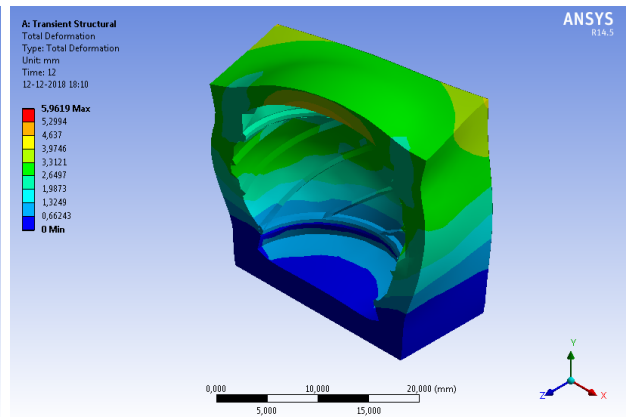
(a) *Robot Rotator a 0s*



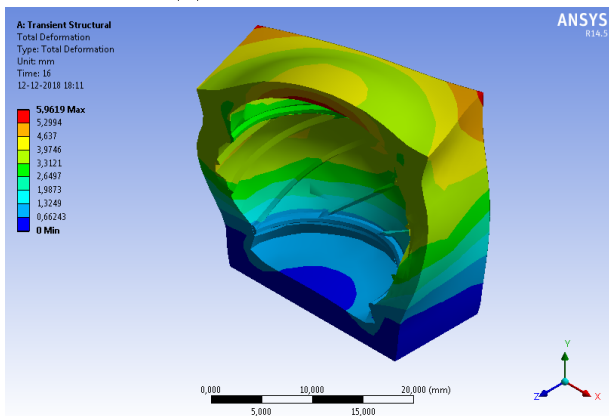
(b) *Robot Rotator a 4s*



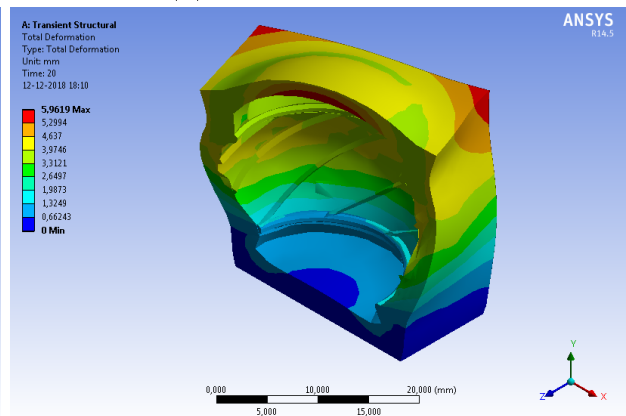
(c) *Robot Rotator a 8s*



(d) *Robot Rotator a 12s*



(e) *Robot Rotator a 16s*



(f) *Robot Rotator a 20s*

Figura 3.8: Simulación *Robot Rotator*

Robot Rotator es sometido a una presión de 6.5 PSI durante 20 segundos. En la secuencia de imágenes se muestra la deformación en los tres ejes. El color azul corresponde a una nula deformación y el color rojo corresponde a una deformación de 11.524 mm.

Capítulo 4

Fabricación

Para el presente capítulo, se presenta un esquema de fabricación de los diferentes robots modulares blandos bajo estudio de esta tesis, utilizando los modelos ya presentados en el capítulo 3. Cada robot modular blando ha sido fabricado con silicona Ecoflex 00-30¹ utilizando la técnica de la litografía blanda -*Soft Lithography*-.

El elastómero ha sido utilizado en variadas investigaciones donde se ha estudiado la robótica blanda dando excelente resultados por sus características tales como su extensa elongación llegando alrededor de 900 % antes de la falla, su viscosidad ya que es lo suficientemente líquida antes de su curado para lograr una copia exacta de los detalles y su fácil desmoldado. La silicona se presenta como dos reactantes líquidos -A y B-, los cuales deben ser mezclados en una relación 1:1 asegurándose que no existan zonas con una mayor concentración de uno de los dos reactantes. Las burbujas en la mezcla son críticas en este experimento ya que generan zonas más débiles y más delgadas y al momento de ser estirado repetidamente, existen altas probabilidades que falle en esa zona. Por consiguiente, es de suma importancia eliminar todo el aire que haya sido introducido al momento de unificar ambas partes. Para obtener una mezcla homogénea y sin burbujas se utiliza una bomba de vacío la cual está conectada a una cámara donde se coloca la silicona -aún líquida- y se despresuriza logrando extraer todas las burbujas de aire.

El proceso de fabricación utilizado para la creación de los moldes es el llamado modelado por deposición fundida -*Fused Filament Fabrication*-. La impresora MakerBot Replicator 2² ha sido utilizada para imprimir los moldes ocupados en la fabricación de cada robot modular. Esta máquina posee características útiles para el fin de esta tesis tales como su facilidad de uso, su alta resolución y por la capacidad de utilizar el material PLA -*PolyLactic Acid*-.

¹<https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>

²<https://www.makerbot.com/replicator/>

4.1. *Robot Tilt*

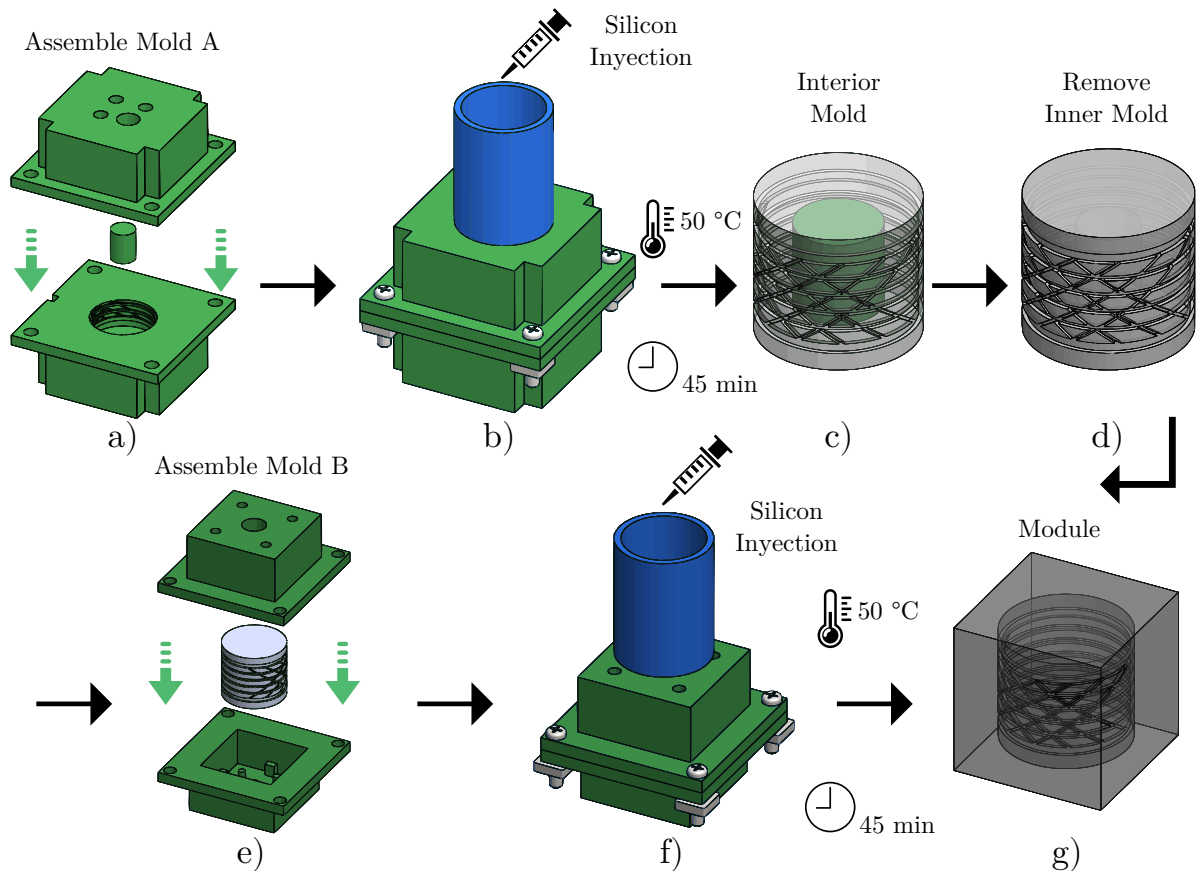


Figura 4.1: Fabricación del *Robot Tilt*

En la figura 4.1 se puede apreciar el método de fabricación para el *Robot Tilt*. En 4.1a se ensambla el molde A con un pequeño cilindro centrado, este cilindro generará un vacío que luego servirá para presurizar el módulo. En 4.1b se inyecta la silicona líquida previamente despresurizada y con el cuidado de no generar burbujas. El molde con el elastómero líquido es ingresado a un horno que está a 50° por 45 minutos logrando así su curado. En 4.1c se puede observar la matriz interna de silicona con su enmallado característico del *Robot Tilt* y con el pequeño cilindro aún en su interior. En 4.1d se retira el molde pequeño y se empieza a devanar la fibra inextensible en sus canales -proceso explicado en 4.6-. En 4.1e la matriz de silicona es colocada dentro del Molde B el cual le dará la forma cúbica. En 4.1f la matriz de silicona es envuelta con el mismo elastómero generando así los módulos cúbicos. Por último, el molde B es colocado en el horno que está a 50° por 45 minutos para lograr así, como se muestra en 4.1g el módulo terminado.

4.2. *Robot Biaxial*

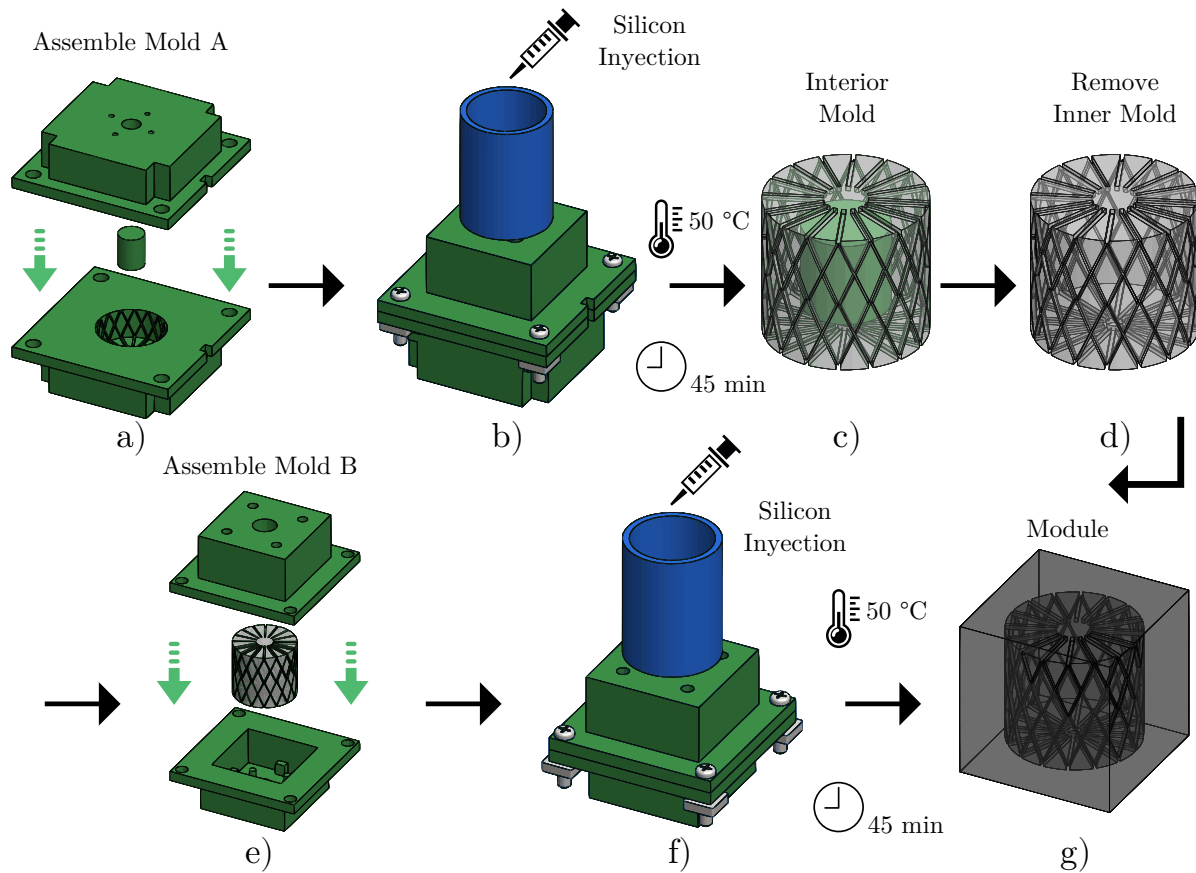


Figura 4.2: Fabricación del *Robot Biaxial*

En la figura 4.2 se puede observar el método de fabricación para el *Robot Biaxial*. En 4.2a se ensambla el molde A con un pequeño cilindro centrado, este cilindro generará un vacío que luego servirá para presurizar el módulo final. En 4.2b se inyecta la silicona líquida previamente despresurizada y con cuidado de no generar burbujas. El molde con el elastómero líquido es ingresado a un horno que está a 50° por 45 minutos logrando así su curado. En 4.2c se puede observar la matriz interna de silicona con su enmallado característico del *Robot Biaxial* y con el pequeño cilindro aún en su interior. En 4.2d se retira el molde pequeño y se empieza a devanar la fibra inextensible en sus canales -proceso explicado en 4.7-. En 4.2e la matriz de silicona es colocada dentro del Molde B el cual le dará la forma cubica. En 4.2f la matriz de silicona es envuelta en este mismo elastómero generando así los módulos cúbicos. Por último, el molde B es colocado en el horno a 50° por 45 minutos para lograr así, como se muestra en 4.2g el módulo terminado.

4.3. *Robot Shear*

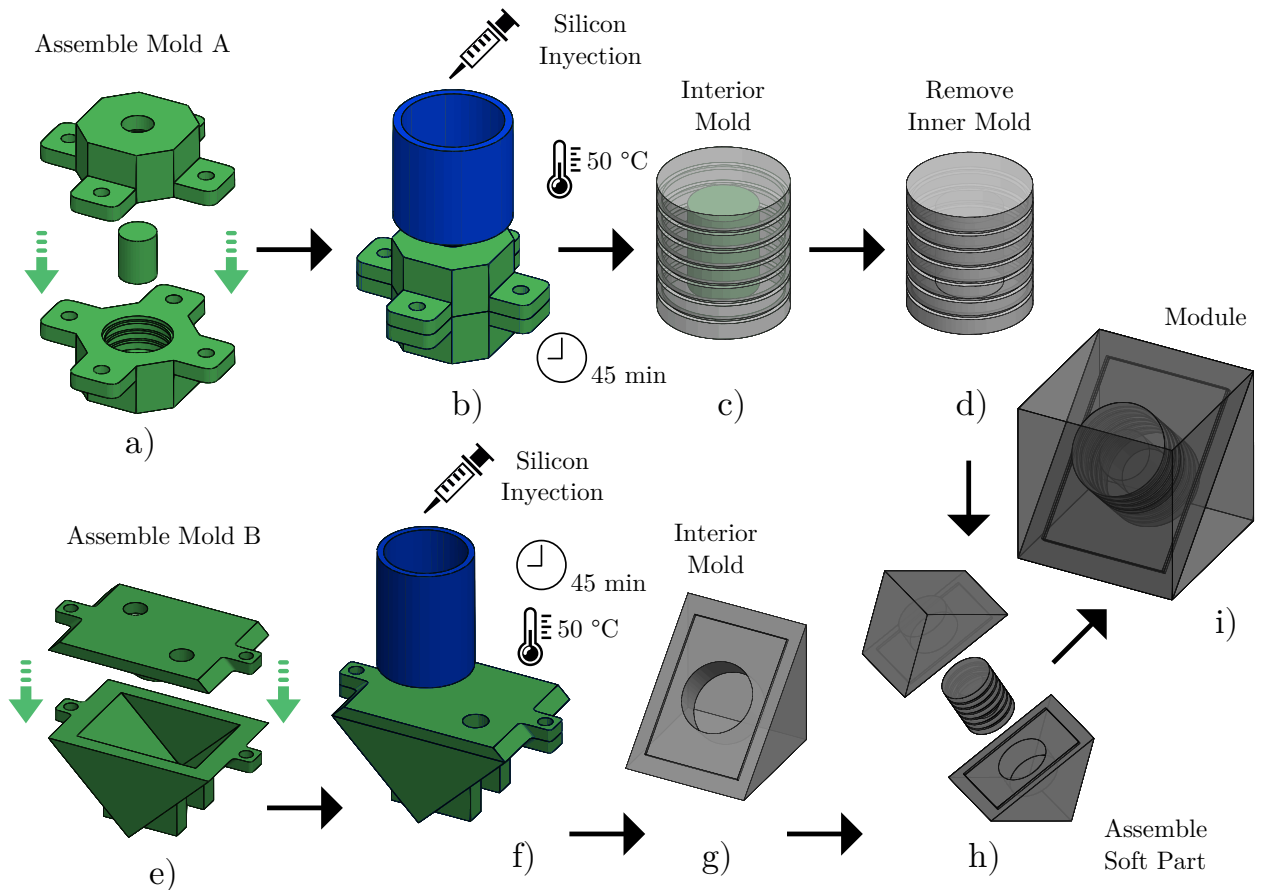


Figura 4.3: Fabricación del Robot de Shear

En la figura 4.3 se puede observar el método de fabricación para el *Robot Shear*. En 4.3a se ensambla el molde A con un pequeño cilindro centrado, este cilindro generará un vacío que luego servirá para presurizar el módulo. En 4.3b se inyecta la silicona líquida previamente despresurizada y con cuidado de no generar burbujas. El molde con el elastómero líquido es ingresado a un horno que está a 50° por 45 minutos logrando así su curado. En 4.3c se puede observar la matriz interna de silicona con su enmallado característico del *Robot Shear* y con el pequeño cilindro aún en su interior. En 4.3d se retira el molde pequeño y se empieza a devanar la fibra inextensible en sus canales -proceso explicado en 4.8-. En 4.3e se ensambla el molde B, este molde generará la mitad del cubo final. En 4.3f se rellena el molde B con el elastómero y es llevado al horno a 50° por 45 minutos. El paso 4.3e y 4.3f se deben realizar dos veces. En 4.3g se puede observar el molde correspondiente a medio módulo. Cabe destacar que se coloca una lámina delgada de fibra de carbono en el rectángulo interior del molde para evitar expansiones no deseadas. En 4.3h se ensamblan las dos partes de 4.3g y de 4.3d para así obtener el módulo final tal como se muestra en 4.3i.

4.4. *Robot Uniaxial*

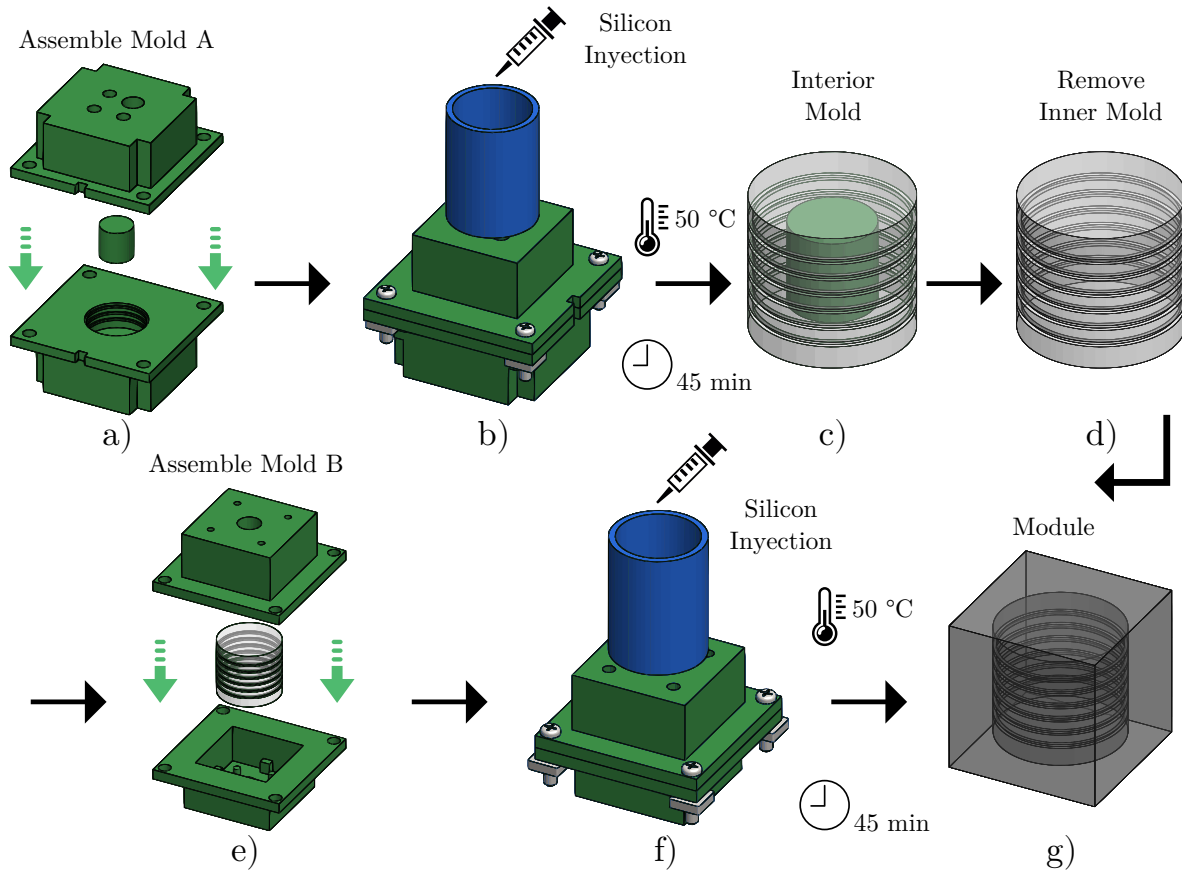


Figura 4.4: Fabricación del *Robot Uniaxial*

En la figura 4.4 we puede observar el método de fabricación para el *Robot Uniaxial*. En 4.4a se ensambla el molde A con un pequeño cilindro centrado, este cilindro generará un vacío que luego servirá para presurizar el módulo final. En 4.4b se inyecta el elastómero líquido previamente despresurizado y con cuidado de no generar burbujas. El molde con la silicona líquida es ingresada a un horno que está a 50° por 45 minutos logrando así su curado. En 4.4c se puede observar la matriz interna de silicona con su enmallado característico del *Robot Uniaxial* y con el pequeño cilindro aún en su interior. En 4.4d se retira el molde pequeño y se empieza a devanar la fibra inextensible en sus canales -proceso explicado en 4.8-. En 4.4e la matriz de silicona es colocada dentro del Molde B. En 4.4f la matriz de silicona es envuelta en este mismo elastómero generando así los módulos cúbicos. Por último, el molde B es colocado en el horno a 50° por 45 minutos para obtener, como se muestra en 4.4g el módulo terminado.

4.5. *Robot Rotator*

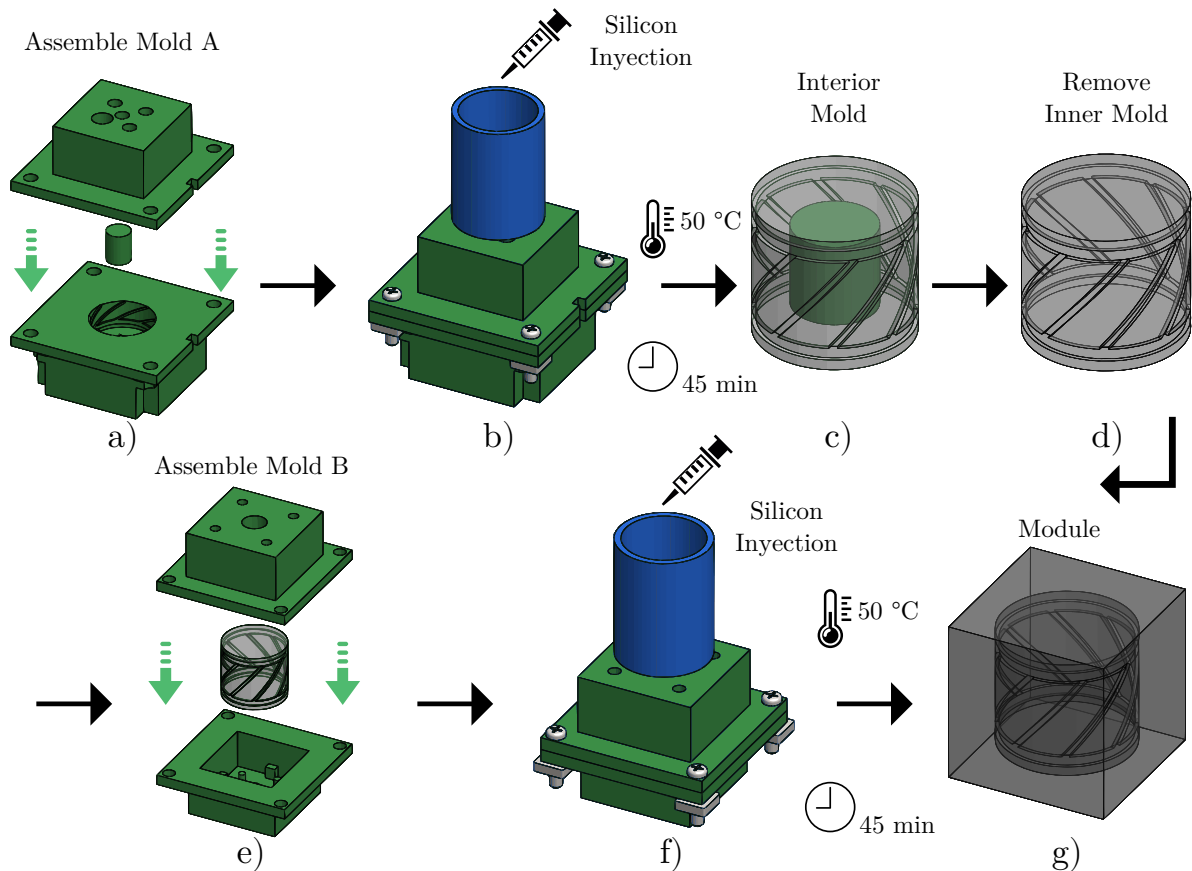


Figura 4.5: Fabricación del *Robot Rotator*

En la figura 4.5 se puede observar el método de fabricación para el *Robot Rotator*. En 4.5a se ensambla el molde A con un pequeño cilindro centrado, este cilindro generará un vacío que luego servirá para presurizar el módulo final. En 4.5b se inyecta la silicona líquida previamente despresurizada y con cuidado de no generar burbujas. El molde con el elastómero es ingresado a un horno que está a 50° por 45 minutos logrando así su curado. En c) se puede observar la matriz interna de silicona con su enmallado característico del *Robot Rotator* y con el pequeño cilindro aún en su interior. En 4.5d se retira el molde pequeño y se empieza a devanar la fibra inextensible en sus canales -proceso explicado en 4.9-. En 4.5e la matriz de silicona es colocada dentro del Molde B el cual le dará la forma cúbica. En 4.5f la matriz de silicona es envuelta en ese mismo elastómero. Por último, el molde B es colocado en el horno a 50° por 45 minutos para lograr así, como se muestra en 4.5g el módulo terminado.

4.6. Devanado de módulos

La utilización de una fibra para restringir el movimiento ha sido mencionada a lo largo de esta tesis pero no ha sido explicada. Si bien el hilado en la matriz interna de cada unidad robótica puede ser considerada banal, se decide dilucidar el proceso del devanado de cada módulo con el fin de entregar una mayor cantidad de información para que el lector -si es que quiere- pueda realizar módulos idénticos y obteniendo así similares resultados.

En las figuras de a continuación se mostrarán las secuencias de devanado para obtener cada tipo de robot. Se emplean algunos colores que ayudarán a entender mejor el proceso de devanado: El color rojo brillante corresponde al canal que se está utilizando, el rojo oscuro corresponde al canal con fibra en su interior y la flecha roja brillante corresponde a la dirección en la cual se está colocando la fibra en ese canal. Es importante destacar que en el proceso de devanado no se debe estrangular la matriz con la fibra puesto que si esto se realiza, cambiará la geometría de la matriz y por tanto entregará resultados diferentes a los obtenidos en esta investigación.

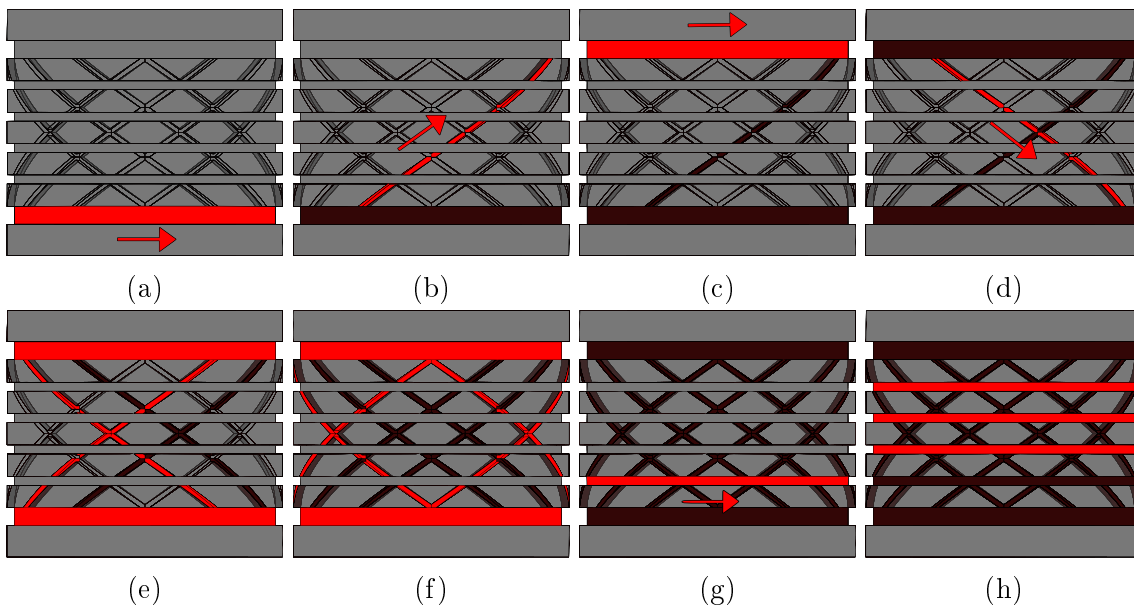


Figura 4.6: Devanado de la matriz interna del *Robot Tilt*

En la figura 4.6 se presenta la secuencia del devanado para la formación del *Robot Tilt*. Primeramente se fija la hebra inextensible a la matriz mediante un nudo y luego se procede a realizar dos vueltas en el mismo canal 4.6a. La fibra es colocada en el tercer canal ascendente -de izquierda a derecha- que conecta con el canal superior. 4.6b. Se realizan dos vueltas alrededor del canal superior 4.6c y se procede a bajar la hebra mediante el tercer canal descendente -de izquierda a derecha- 4.6d. Este proceso se repite para cada canal ascendente y descendente 4.6e, 4.6f. En la figura 4.6g se observa la manera que devanar los canales concéntricos de la matriz. En cada canal se realizan tres vueltas para asegurar que la hebra no deslice y que no provoque expansiones no deseadas 4.6h.

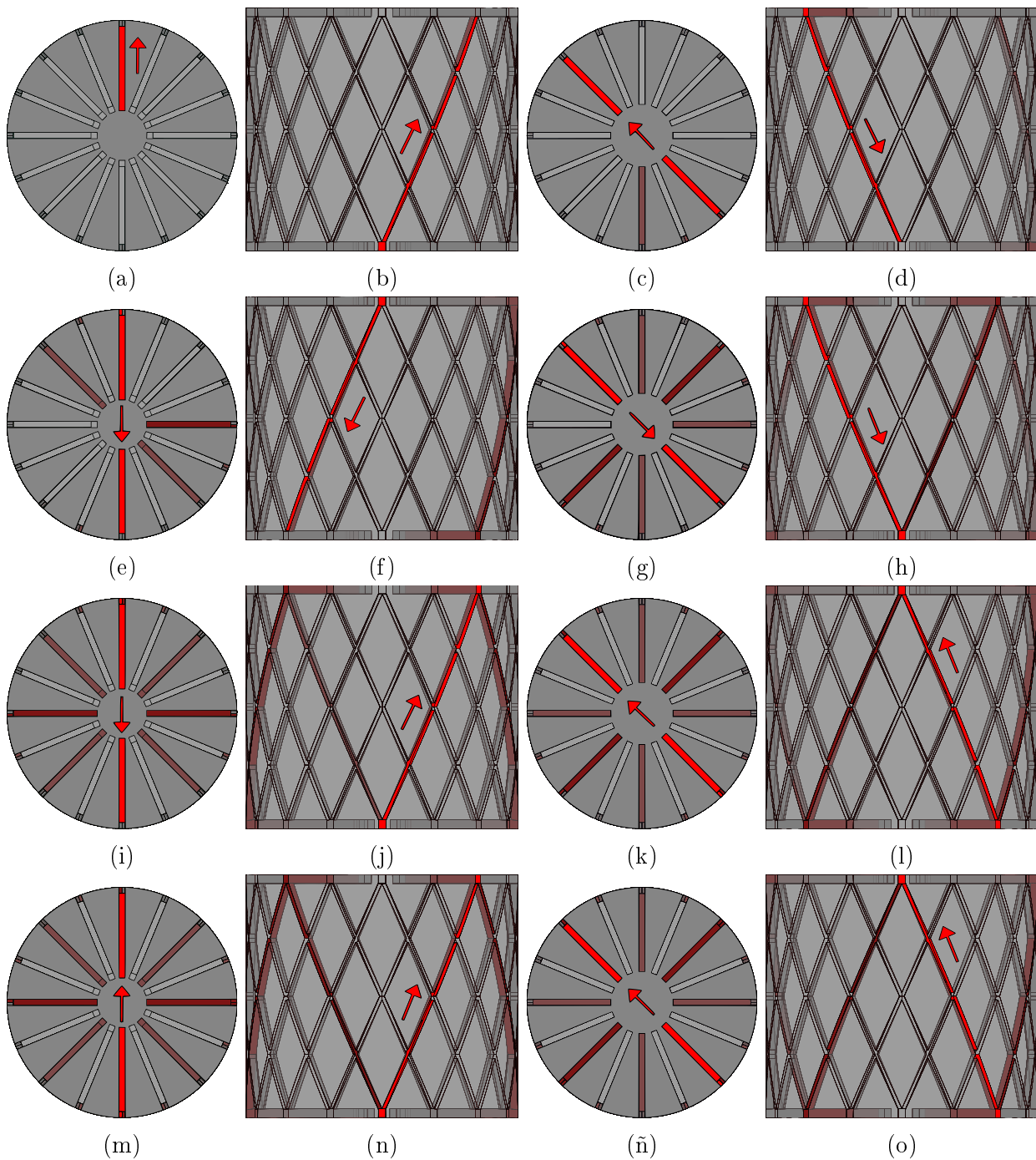


Figura 4.7: Devanado de la matriz interna del *Robot Biaxial*

En la figura 4.7 se presenta el devanado de la matriz interna de *Robot Biaxial*. En 4.7a se fija la fibra inextensible con una pequeña cantidad de silicona líquida para facilitar en devanado en la matriz. En la secuencia de figuras entre 4.7a y 4.7h la fibra se coloca en un solo canal hasta sobreponerse a sí misma 4.7i, pero al llegar a la bifurcación de canales se sigue por el cual no posee fibra 4.7k. Siguiendo la dirección de las flechas, se obtendrá un zigzag en la cara lateral y una cruz en cada base de la matriz. Este proceso se realiza en tres canales más para obtener el enmallado requerido de este robot. Cabe destacar que las figuras 4.7a, 4.7e, 4.7i, 4.7m corresponde a la cara superior de la matriz y 4.7c, 4.7g, 4.7k, 4.7ñ

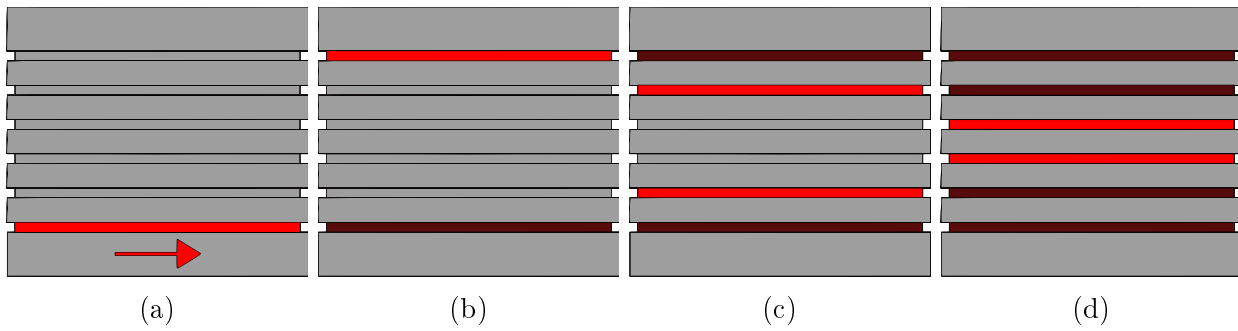


Figura 4.8: Devanado de la matriz interna del *Robot Uniaxial* y del *Robot Shear*

En la figura 4.8 se presenta el devanado del *Robot Uniaxial* y *Robot Shear*. El procedimiento para la obtención de este enmallado relativamente sencillo, la hebra es colocada en el canal inferior y es fijada mediante un nudo 4.8a. Como se muestra en la secuencia de devanado, se coloca la fibra en el canal superior 4.8b, después en el segundo y quinto canal -de abajo para arriba- 4.8c y por último los canales centrales 4.8d. Para cada canal se realizan tres vueltas obteniendo así el enmallado que se requiere para formar el *Robot Uniaxial* y *Robot Shear*.

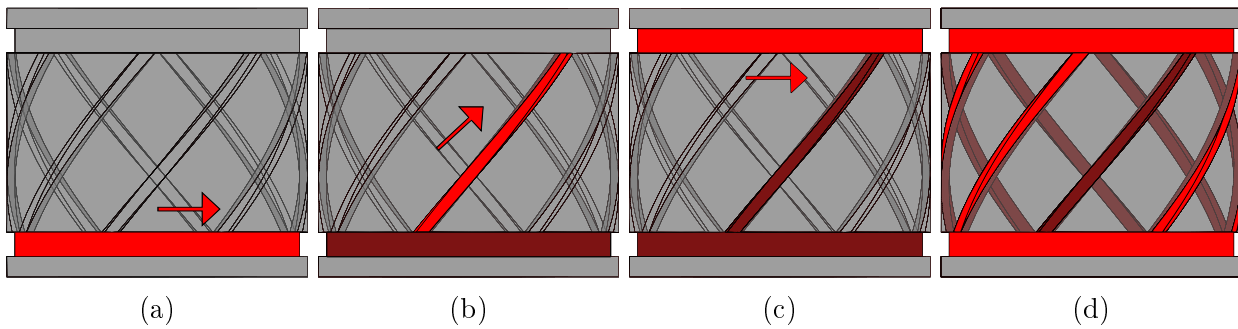


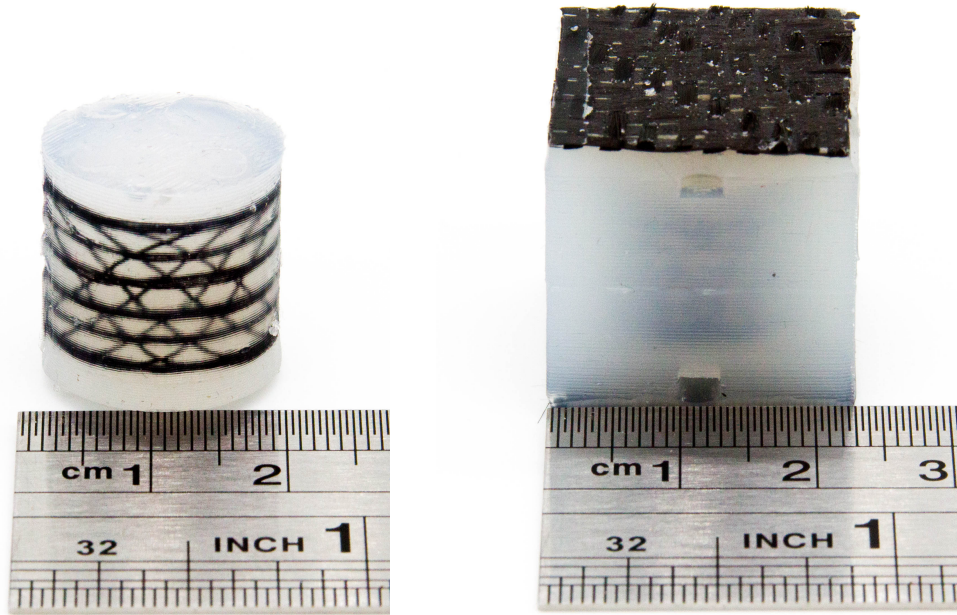
Figura 4.9: Devanado de la matriz interna del *Robot Rotator*

En la figura 4.9 se presenta el devanado del *Robot Rotator*. Para fijar la fibra al canal se hace un nudo y se realizan dos vueltas 4.9a. La fibra se coloca en un canal ascendente que conecta el canal inferior con el superior 4.9b y en este último canal mencionado se hacen dos vueltas y se efectúa el mismo tipo de nudo que se realiza en el canal inferior 4.9c. Este proceso se debe realizar en todos los canales ascendentes para obtener la matriz con el enmallado necesario para el *Robot Rotator* 4.9d.

4.7. Módulos fabricados

A continuación se mostrarán las matrices correspondientes a cada robot blando con su respectivo enmallado de fibra y también se mostrarán las unidades robóticas ya terminadas y listas para adquirir los resultados experimentales.

Cabe destacar que se decidió utilizar una malla de fibra de carbono en la cara superior e inferior de cada módulo para disminuir considerablemente la expansión -no deseada- por esas caras y potenciar la deformación de la matriz interna de cada robot mediante su enmallado.



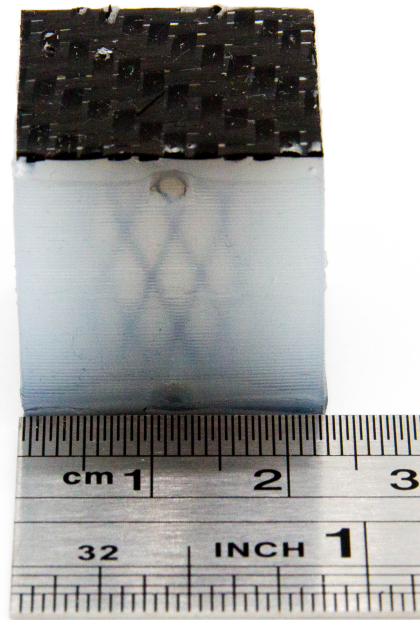
(a) Matriz interna del *Robot Tilt*

(b) *Robot Tilt* Fabricado

Figura 4.10: Módulo *Robot Tilt*

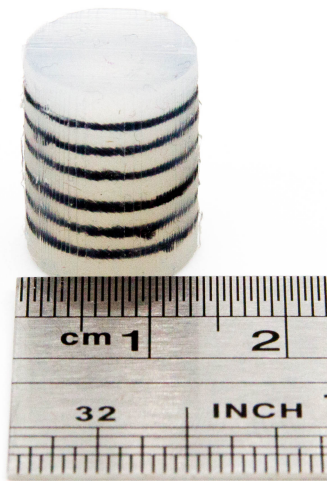


(a) Matriz interna del *Robot Biaxial*

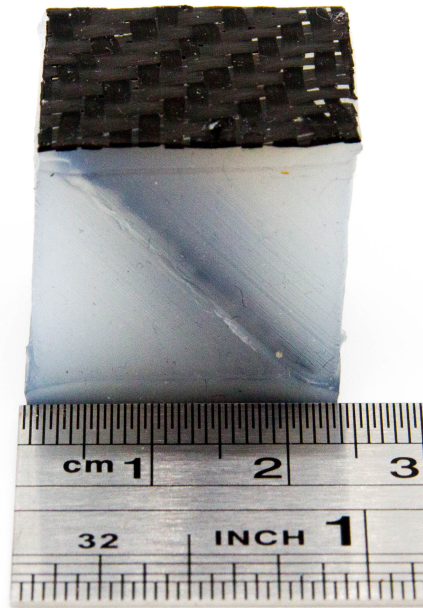


(b) *Robot Biaxial* Fabricado

Figura 4.11: Módulo *Robot Biaxial*

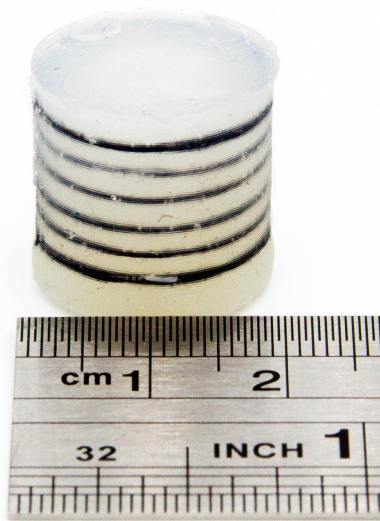


(a) Matriz interna del *Robot Shear*

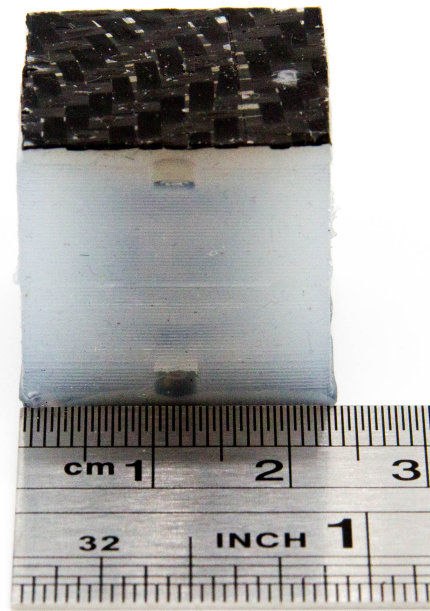


(b) *Robot Shear* Fabricado

Figura 4.12: Módulo *Robot Shear*



(a) Matriz interna del *Robot Uniaxial*

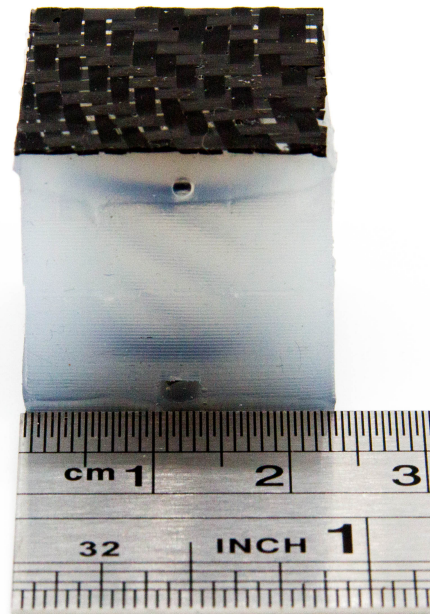


(b) *Robot Uniaxial* Fabricado

Figura 4.13: Módulo *Robot Uniaxial*



(a) Matriz interna del *Robot Rotator*



(b) *Robot Rotator* Fabricado

Figura 4.14: Módulo *Robot Rotator*

Capítulo 5

Control

En este capítulo se expondrá el sistema de control requerido para lograr la presurización y despresurización deseada. Primeramente se mostrarán los componentes utilizados para luego presentar los esquemáticos correspondientes al sistema de control electrónico.

5.1. Componentes

5.1.1. Compresor

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tales como gases y vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido, en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Las características del compresor se muestran en la tabla 5.1

Tabla 5.1: Características del compresor

Model	Koge KPM12A-3A
Rated Voltage	3.0V
Max Current	<460 mA
Noise	<65 dB
Free Flow	>650ml/min
Min Pressure	350mmHg

5.1.2. Válvula solenoide

Una válvula solenoide es una válvula eléctrica utilizada para controlar el paso de gas - sistemas neumáticos- o fluidos -sistemas hidráulicos-. La apertura o cierre de la válvula se basa en impulsos electromagnéticos de un electroimán que trabaja junto a un muelle diseñado para devolver a la válvula a su posición neutral cuándo el solenoide se desactiva. Este tipo de válvulas se suelen utilizar en sitios de difícil acceso, en sistemas multi-válvula y en sitios

de ambiente peligroso. Las válvulas solenoides ofrecen funciones de apertura o cierre total y no se pueden utilizar para la regulación del flujo de gas o fluido, en otras palabras, no se puede dejar pasar una parte del flujo controladamente. Existen válvulas solenoides que pueden trabajar con corriente alterna o con corriente continua y utilizar diferentes voltajes y duraciones de ciclo de funcionamiento.

Las características de la válvula solenoide se muestra en la siguiente tabla 5.2

Tabla 5.2: Características de la válvula

Model	ConJoin CJV23-C12A1
Rated Voltage	12 V
Rated Current	<110 mA
DC Resistance	114 Ω
Flow under Load	>11 L/min
Leakage	<1 CC/min

5.1.3. Micro-controlador

Arduino Uno es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328. Cuenta con 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM - Modulación por ancho de pulsos- y otras 6 son entradas analógicas.

En la siguiente tabla 5.3 se muestra las características del microcontrolador

Tabla 5.3: Características del microcontrolador

Model	Arduino UNO
Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5 V
Digital I/O Pins	14
Analog Input Pins	6
PWM Digital I/O Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Clock Speed	16 MHz

5.1.4. Sensor de presión

Los sensores de presión o transductores de presión, son muy habituales en cualquier proceso industrial o sistema de ensayo. Su objetivo es transformar una magnitud física en una eléctrica, en este caso transforman una fuerza por unidad de superficie en un voltaje equivalente a esa presión ejercida.

Para medir la presión se utilizan sensores que están dotados de un elemento sensible a la presión y que emiten una señal eléctrica al variar la presión o que provocan operaciones de conmutación si esta supera un determinado valor límite.

Las características del sensor de presión se muestran en la tabla 5.4

Tabla 5.4: Características del sensor de presión

Model	Honeywell 100PGAA5
Rated Voltage	5 V
Max Current	3.5 mA
Operating Pressure	100 PSI

5.1.5. Transistor

Un transistor es un dispositivo semiconductor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas y energía eléctrica. Está compuesto de material semiconductor usualmente con al menos tres terminales para la conexión a un circuito externo. Una tensión o corriente aplicada a un par de terminales del transistor controla la corriente a través de otro par de terminales. Debido a que la potencia controlada -salida- puede ser mayor que la potencia de control -entrada-, un transistor puede amplificar una señal.

Las características de los transistores utilizados se muestra en la tabla 5.5

Tabla 5.5: Características de los transistores

Model	IRF530	PN2222
Max Voltage DS / CE	100	30
Max Current D / C	14 A	600 mA
Maximum Power Dissipation	88 W	1.5 W
Temperature Range	-55 to +175	-55 to +150

5.2. Circuito

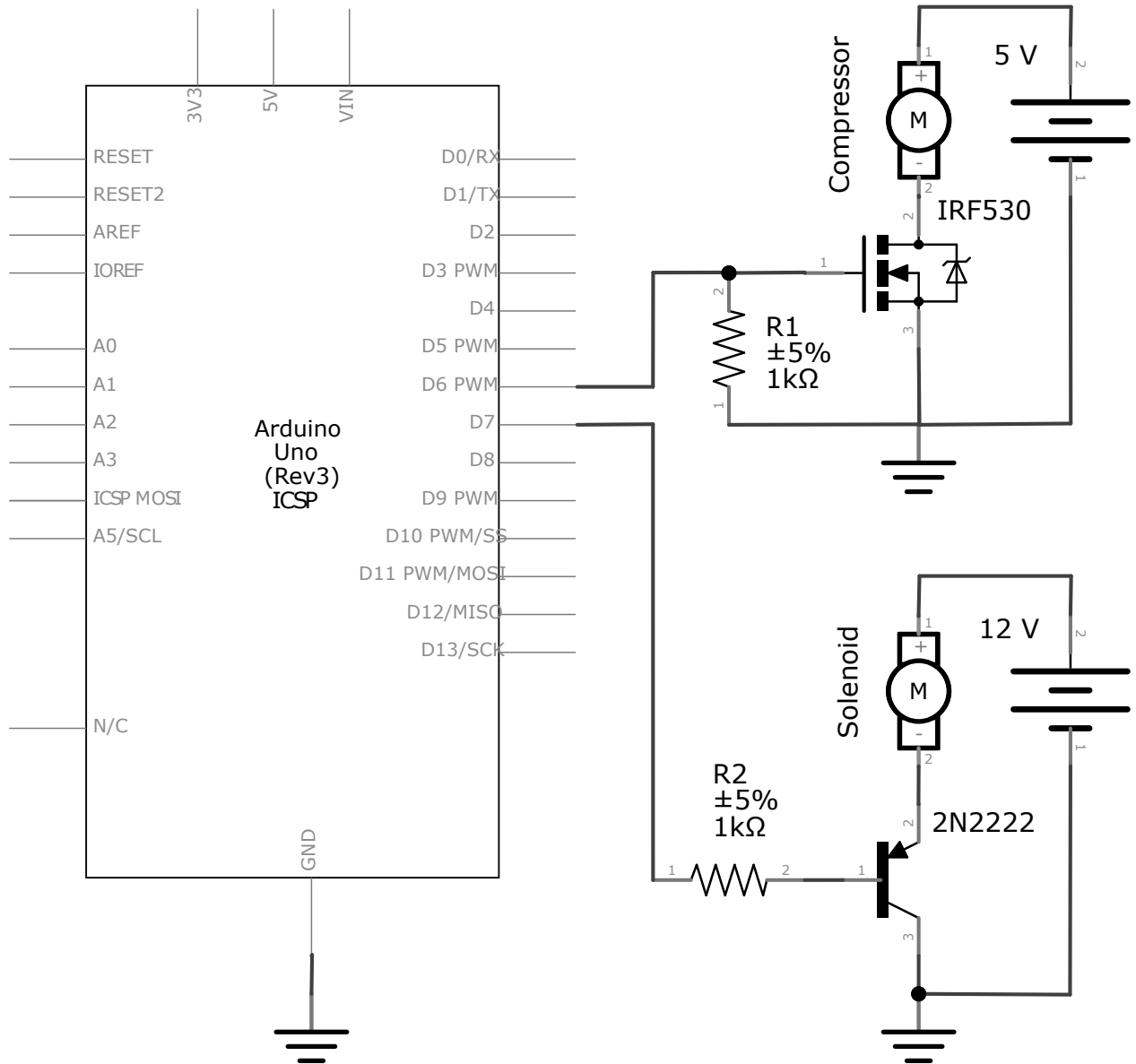


Figura 5.1: Esquemático del circuito para control de un robot modular

En la figura 5.1 se puede apreciar la conexión correspondiente al sistema de control que se utilizó para cada robot. Solo para una representación visual se utiliza un motor -señalado con una M- para simbolizar el compresor y el solenoide respectivamente. El sistema que controla el compresor tiene una fuente externa de 5 volts, un MOSFET IRF530 y una resistencia de $1k\Omega$. Por otro lado, el sistema que controla la solenoide tiene una fuente de voltaje de 12 V, un transistor bjt PN2222 y una resistencia de $1k\Omega$. El código utilizado en arduino para el control de un robot modular es presentado en anexo B.1, B.2 y B.3. El código implementado en arduino para el control de la plataforma XYZ se puede observar en anexo B.4, B.5 y B.6.

Capítulo 6

Resultados experimentales y verificación de modelos

La exigencia de conocer y entender el comportamiento neumático-elástico de cada robot modular, radica en la necesidad de poder controlar cada actuador obteniendo así, una expansión particular asociada a una presión aplicada al interior de cada módulo. En este capítulo se presenta el estudio del comportamiento para cada módulo sometido a una prueba experimental de presurizado y despresurizado con diez ciclos consecutivos. El comportamiento de la presión aplicada corresponde a una oscilación cosenoidal observado en la figura 6.1.

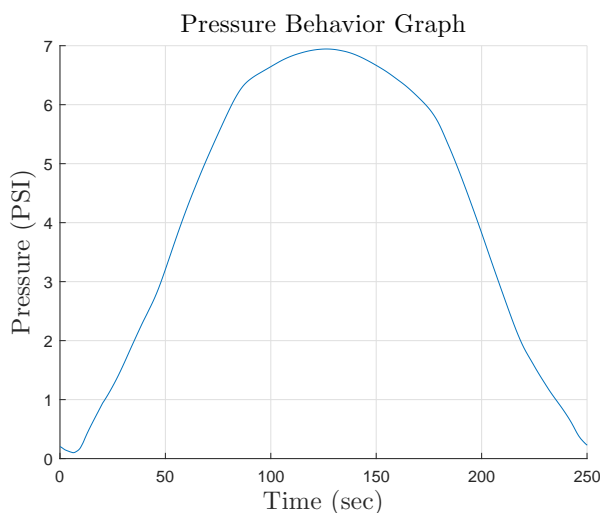


Figura 6.1: Promedio del comportamiento de la presión en un ciclo.

Ha sido utilizado un instrumento de medición llamado OptiTrack [1] para obtener datos de deformación. OptiTrack es un sistema de captura de movimiento y seguimiento de objetos en tiempo real. Está compuesto por un equipo trío de tres cámaras, y el software de captura Motive Tracker. El equipo captura datos con una resolución de 640x480 píxeles, a una tasa de 120 FPS, una precisión de $\pm 1\text{mm}$ y una latencia máxima de 8.3ms.

Utilizando esta prueba experimental, se podrá adquirir la presión necesaria para lograr un desplazamiento deseado, observar desplazamientos no deseados y obtener la presión requerida para obtener una rotación o inclinación. Cada robot es accionado por presión y presenta algún tipo de deformación mecánica, la que puede ser un tipo de desplazamiento y/o rotación. Para una debida comprensión del comportamiento que van a adquirir, es necesario definir la presión adecuada para alguna deformación requerida.

¹<https://optitrack.com/>

En las siguientes figuras se mostrará el comportamiento que presentan los robots blandos que conforman la población heterogénea en estudio. Para la adquisición del error estándar del desplazamiento y del ángulo, se utiliza la desviación estándar dividida por la raíz cuadrada del número de repeticiones. En cada gráfico, el desplazamiento generado por el inflado es la línea de color azul y el desplazamiento por el desinflado es la línea de color, el error estándar es el histograma de color rojo y la línea punteada es la simulación mediante *FEM*.

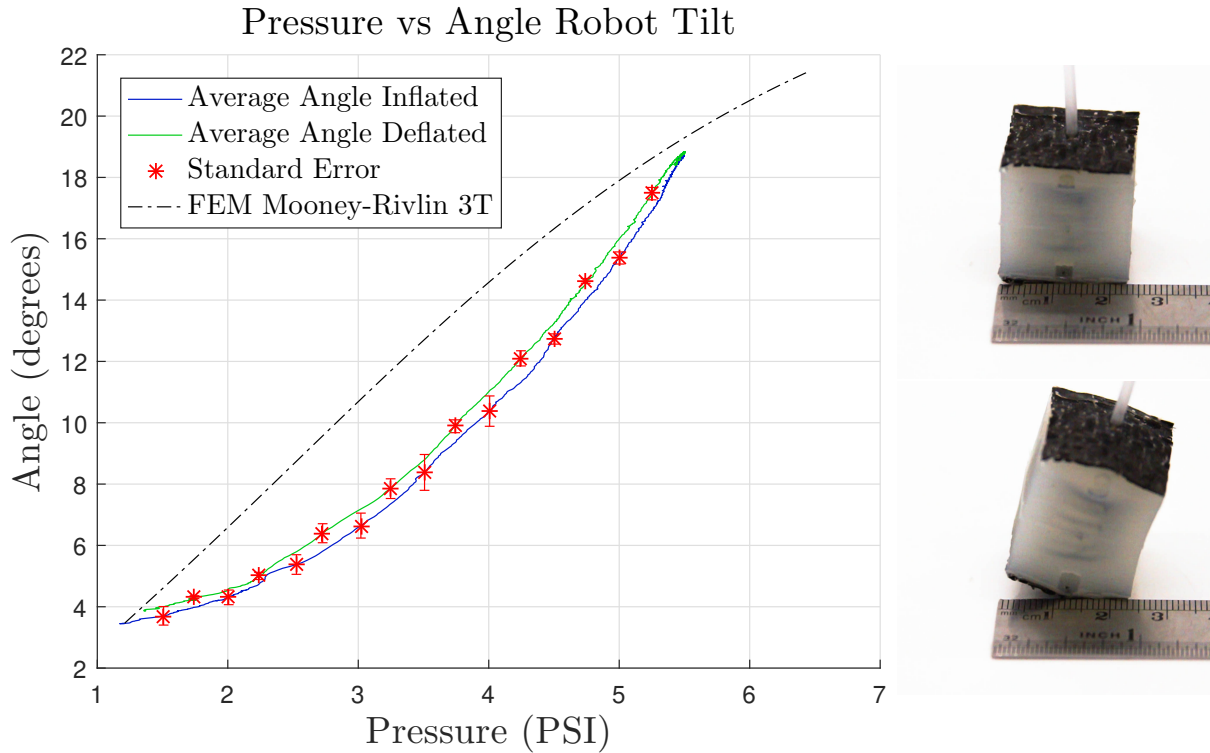


Figura 6.2: Ángulo respecto a la presión, $n=10$.

En la figura 6.2 se puede observar el ángulo adquirido en respuesta a la presión aplicada. El presurizado es iniciado cercano a 1.1 PSI y es finalizado en torno a 5.5 PSI, luego se inicia el despresurizado donde termina cercano a 1.3 PSI. Este robot es capaz de inclinar una de sus caras aproximadamente 19° a la máxima presión testeada. Alrededor de 2.25 PSI existe una singularidad donde el ángulo tiene un pequeño aumento y luego se estabiliza llegando a los 2.5 PSI, esta anomalía es producida por el enmallado interno del robot modular que al rigidizar algunas zonas, la presión se acentúa en otras libre del mallado facilitando la inclinación del robot. Se puede observar que entre el inicio del presurizado y el inicio de la singularidad el ángulo se comporta de forma lineal y después de la singularidad hasta el final del presurizado, el ángulo se comporta de forma exponencial.

La línea punteada en negro, corresponde a los datos obtenidos mediante el método de elementos finitos -FEM- utilizando el modelo de Mooney-Rivlin 3 términos.

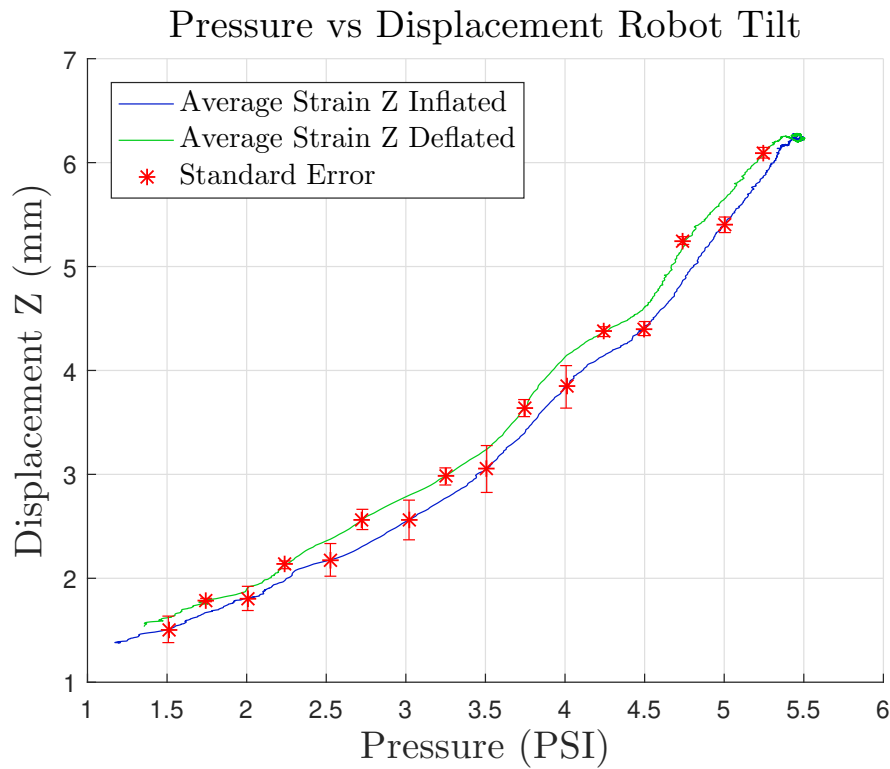


Figura 6.3: Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.

En la figura 6.3 se puede observar el desplazamiento adquirido en respuesta a la presión aplicada. El presurizado es iniciado cercano a 1.1 PSI y es finalizado alrededor a 5.5 PSI, luego se inicia el despresurizado donde termina cercano a 1.3 PSI. Este robot producto del presurizado presenta un desplazamiento vertical cercano a 6,5mm con una presión de 5.5 PSI. Existe una anomalía en el desplazamiento en Z del robot modular al ser presurizado entre 3.5 y 4.5 PSI 6.3.

Esta singularidad es producida por el enmallado interno del robot modular. En un inicio, el aire inyectado ejerce presión en las paredes internas de la matriz, expandiéndose en todas las direcciones. Al llegar a este rango de presión, se genera una resistencia extra para la expansión en el eje Z restringiendo este desplazamiento. Sin embargo, la inclinación que el sistema va adaptando no se ve afectado por esta restricción. Como la presión sigue aumentando, esta se concentra en la parte superior e inferior de la matriz interna facilitando la expansión vertical.

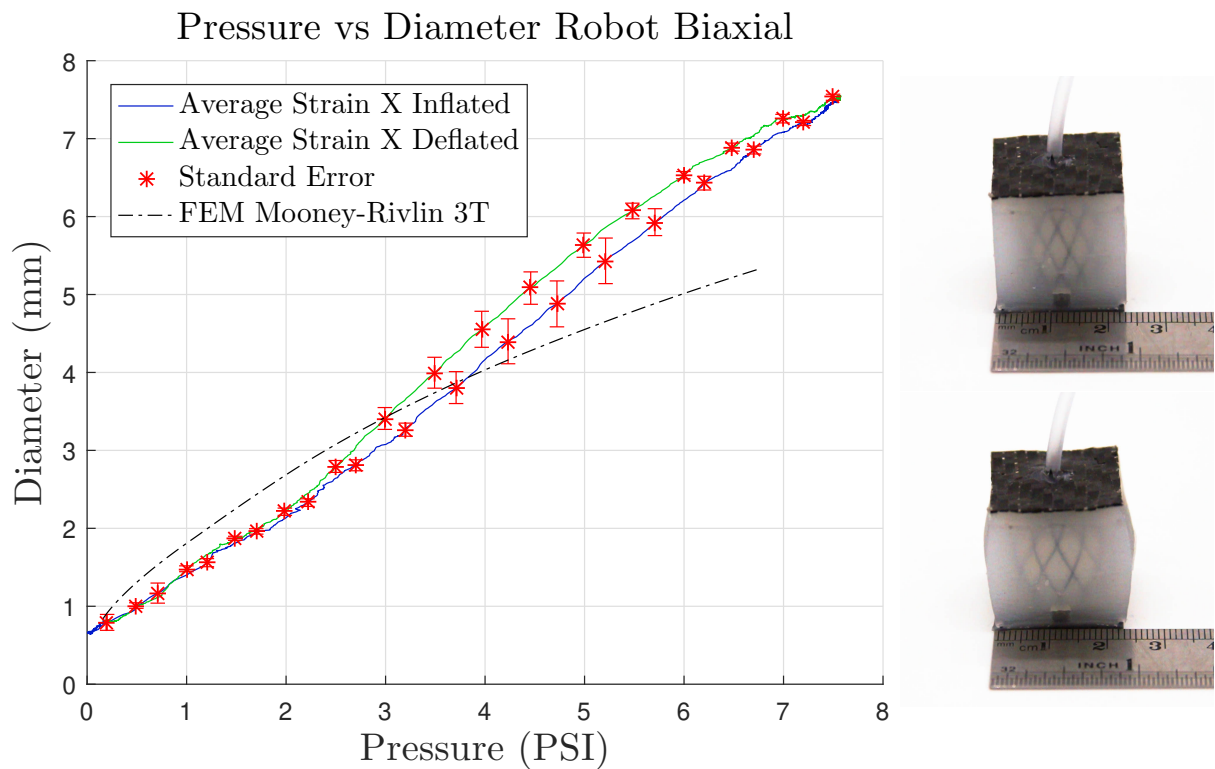


Figura 6.4: Incremento del diámetro con respecto a la presión, $n=10$.

En la figura 6.4 se presenta el comportamiento que adquiere el *Robot Biaxial* al ser presurizado y despresurizado. Se puede decir a simple vista que, la expansión diametral -o distancia entre caras del módulo- se comporta linealmente al aumentar la presión, salvo cuando se aplica la máxima presión donde se da a entender que existe una mayor resistencia a la expansión. Esto se debe a la geometría interna de la matriz que facilita la expansión diametral a costa de la deformación vertical de la misma.

En otras palabras, a aplicar una baja presión -hasta 3 PSI- existen deformaciones en todo el manto de la matriz enmallada que se ve reflejada en 6.4 como una expansión lineal. Entre 3 y 6 PSI la resistencia en el manto del cilindro es menor que en la cara superior e inferior, por tanto sigue expandiéndose diametralmente pero disminuyendo su deformación en el eje Z -en 6.4 la expansión sigue incrementándose pero en 6.5 el desplazamiento en Z empieza a disminuir-. Después de los 6 PSI, se logra un equilibrio estático evitando que las caras se acerquen y por tanto, se cancela la expansión diametral -en 6.4 la pendiente que corresponde a la expansión va disminuyendo hasta evitar la expansión-.

La línea punteada en negro, corresponde a los datos obtenidos mediante el método de elementos finitos -FEM- utilizando el modelo de Mooney-Rivlin 3 términos.

Pressure vs Displacement Robot Biaxial

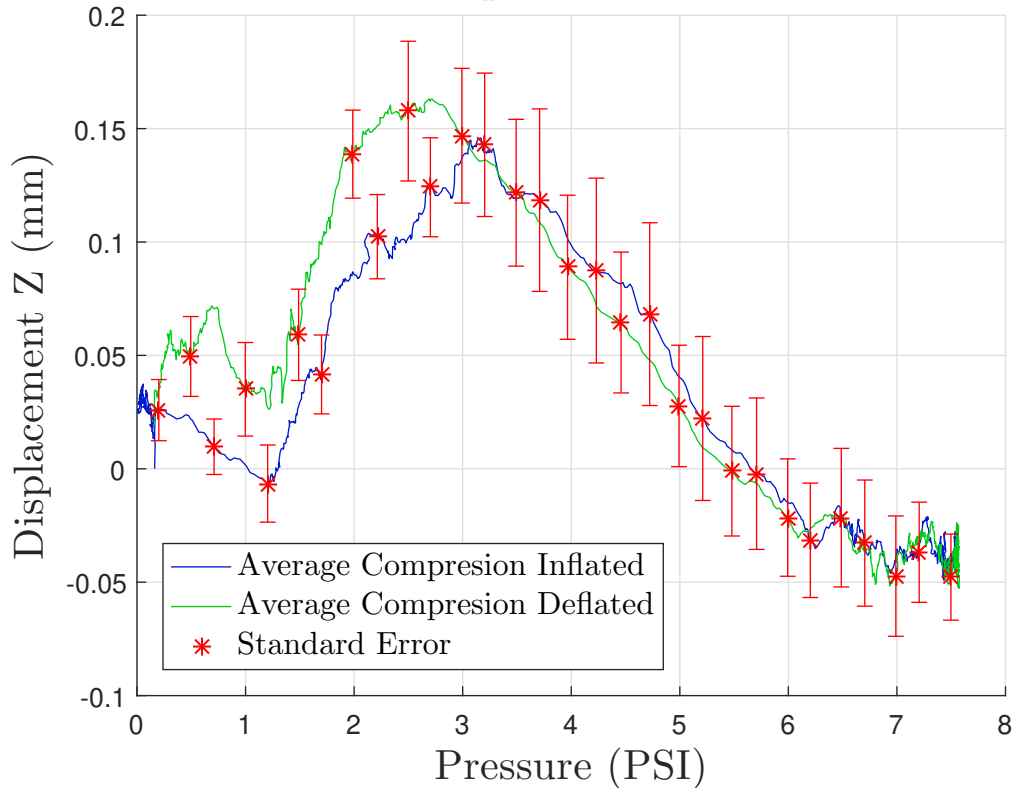


Figura 6.5: Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.

En la figura 6.5 se puede observar el desplazamiento en Z del *Robot Biaxial* el cual nos brinda conocimientos necesarios para entender de mejor manera el comportamiento del módulo. Esta respuesta a la presión se puede dividir en 4 partes las cuales se explicarán a continuación.

Entre 0 y 1 PSI y producto del enmallado, la presión aplicada en el manto del cilindro de la matriz es mayor a la presión entre las caras de la misma, es por ello que el desplazamiento va disminuyendo. Entre 1 y 3 PSI la presión aplicada logra ser mayor en las caras que en el manto del cilindro de la matriz, por tanto se puede observar un desplazamiento ascendente hasta llegar a un equilibrio estático. Entre 3 y 6 PSI y producto del enmallado, la presión vuelve a ser mayor en el manto que en las caras del cilindro facilitando la expansión diametral a costa de la deformación vertical. Y por último entre 6 y 7,5PSI se tiende a un equilibrio estático en el cual no existe desplazamiento en Z ni expansión diametral.

El *Robot Biaxial* puede aumentar su diámetro aproximadamente hasta 8mm a una presión cercana a los 7.5 PSI, lo que correspondería a una expansión del 35 %.

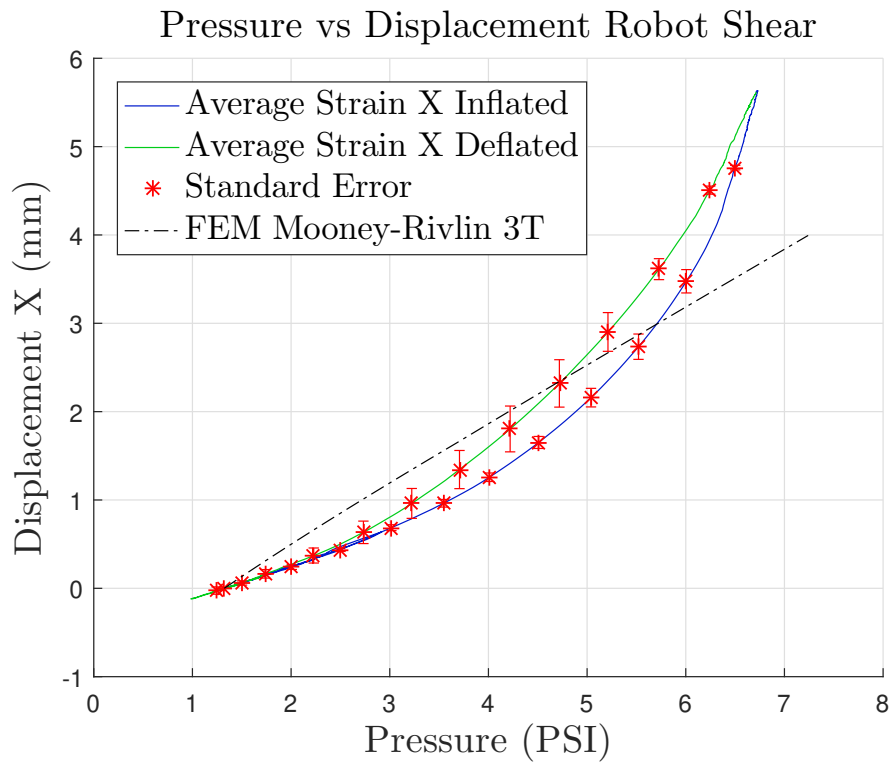


Figura 6.6: Desplazamiento en X respecto a la presión, n=10.

El comportamiento del *Robot Shear* se puede apreciar en la figura 6.6 en la cual se muestra su desplazamiento en X en respuesta a la presurización y despresurización. El módulo es capaz de realizar un movimiento de corte -cizalle- producto del posicionamiento de la matriz interna y su propio diseño, el cual logra una expansión lineal en la diagonal del *Robot Shear* desplazando una de sus cara en relación con su cara opuesta.

Se puede observar en la figura que con respecto al desplazamiento en X existe un incremento exponencial relacionado con el presurizado y un decrecimiento exponencial al ser despresurizado. También, se puede visualizar tanto en el inflado como en el desinflado, 3 zonas que son definidas por sus pendientes las cuales se explican a continuación.

Entre 1 y 3 PSI la pendiente que adquiere el desplazamiento en relación a la presión es casi lineal producido en gran parte por la expansión lineal de la matriz enmallada. Entre 3 y 6 PSI se puede observar que la pendiente del desplazamiento en X va aumentando en relación a la presión que se va aplicando, esto es producido por la presión que se concentra en las caras de la matriz enmallada hasta que la malla exterior retiene el desplazamiento. A los 6 PSI en adelante, la malla diametral del módulo facilita el desplazamiento aumentando su pendiente y por tanto facilitar el movimiento en X.

La línea punteada en negro, corresponde a los datos obtenidos mediante el método de elementos finitos -FEM- utilizando el modelo de Mooney-Rivlin 3 términos.

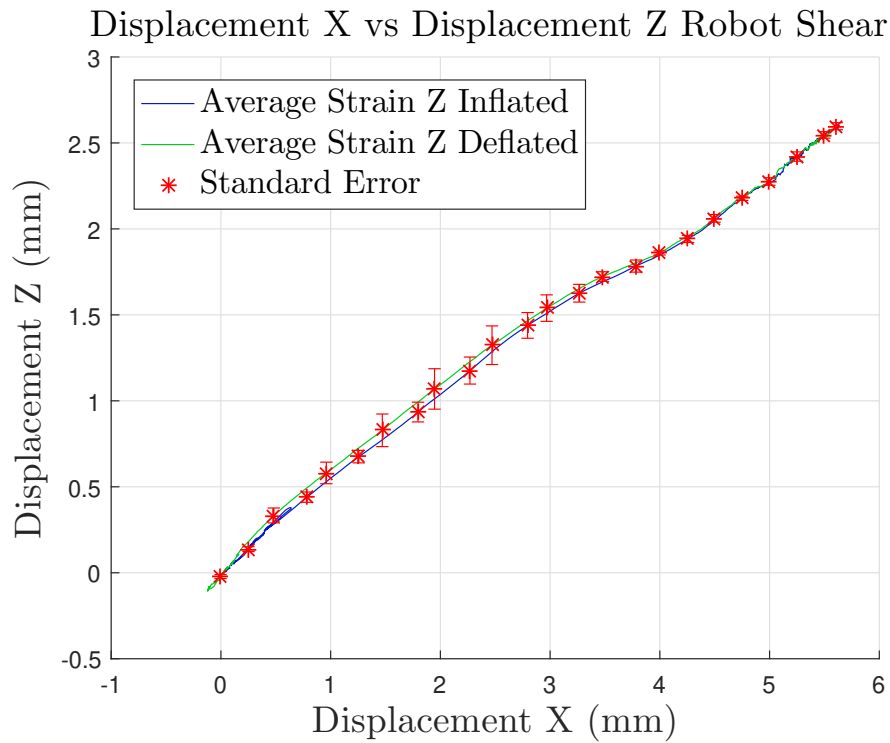


Figura 6.7: Desplazamiento Z respecto al desplazamiento en X, n=10.

Algo no menor es la deformación en Z producida en el módulo al realizar las pruebas antes mencionadas. En la figura 6.7 se observa el comportamiento no deseado -deformación en Z- en relación del desplazamiento en X, la cual brinda información necesaria para comprender por qué se genera el movimiento.

En esta figura se puede observar una aproximada relación lineal entre el desplazamiento en X y Z con tres pendientes diferentes. La primera pendiente -entre 0 y 3mm en X- está relacionada con la deformación en la matriz enmallada del módulo que afecta tanto al desplazamiento en X como al de Z. La segunda pendiente -entre 3 y 4mm en X- es la zona transitoria donde no solo los desplazamientos están relacionados con la deformación de la matriz enmallada, sino también por la malla inextensible en la diagonal, la cual van restringiendo poco a poco el desplazamiento en Z y facilitando el desplazamiento en X llegando a la tercera pendiente -entre 4 y 5.5mm en X- donde la incidencia de la malla en diagonal se estabiliza junto con los desplazamientos en X y Z.

El *Robot Shear* puede desplazar una de sus caras aproximadamente 5,5mm en relación a su cara opuesta aplicando una presión cercana a los 6.5 PSI.

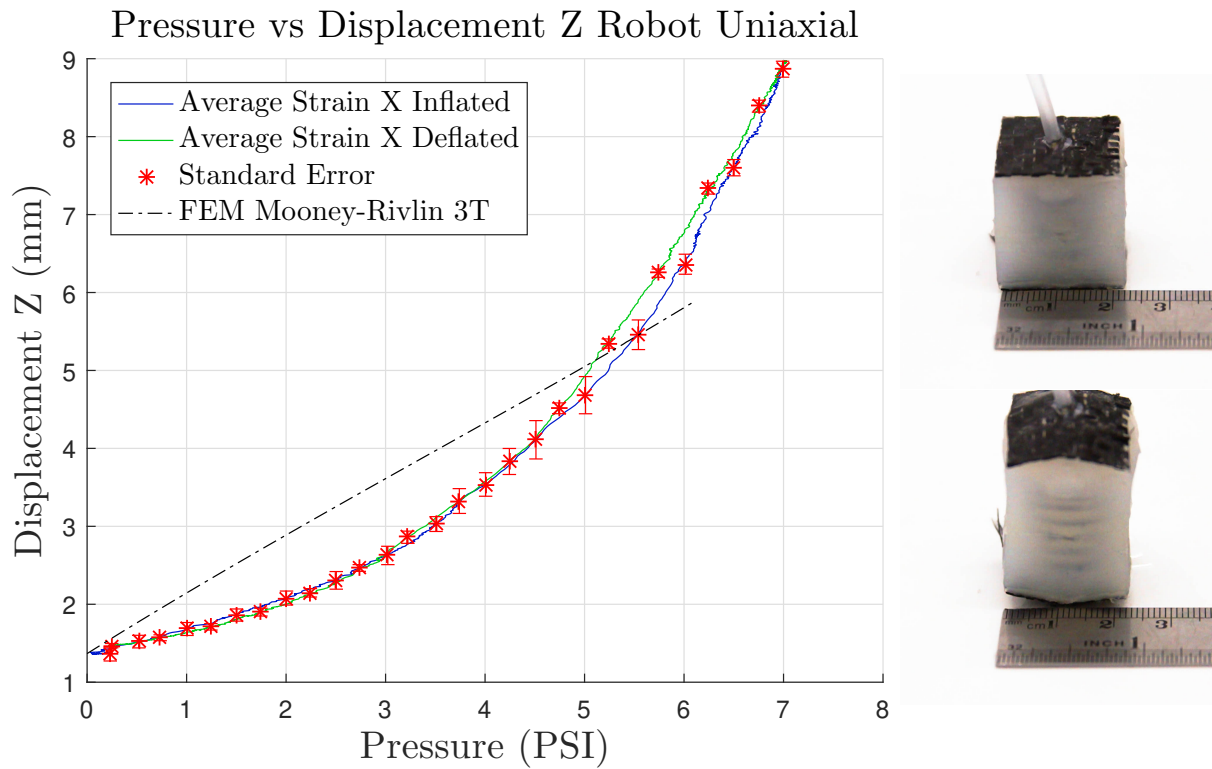


Figura 6.8: Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.

Se puede apreciar en la figura 6.8 el comportamiento que presenta el *Robot Uniaxial* sometido a la prueba de presurizado y despresurizado. El módulo es capaz de realizar un movimiento uniaxial debido al enmallado de la matriz interna. Se ve a simple vista que el desplazamiento máximo alcanzado llega a los 9mm con una presión de 7 PSI. También es visible que el desplazamiento en Z para presiones entre 0 y 5 PSI se comporta de manera similar al ser presurizado o despresurizado. Se observa una anomalía en relación al resto del desplazamiento entre 5 y 6 PSI producida por las presiones residuales aplicadas en la matriz enmallada y en las caras de la misma. .

En otras palabras la expansión es controlada por el enmallado de la matriz interna hasta llegar a los 5 PSI donde las presiones se acentúan en la cara superior e inferior de la misma -específicamente en el borde de las caras y el manto de la matriz- causando una expansión excesiva la cual es controlada por la malla externa.

La línea punteada en negro, corresponde a los datos obtenidos mediante el método de elementos finitos -FEM- utilizando el modelo de Mooney-Rivlin 3 términos.

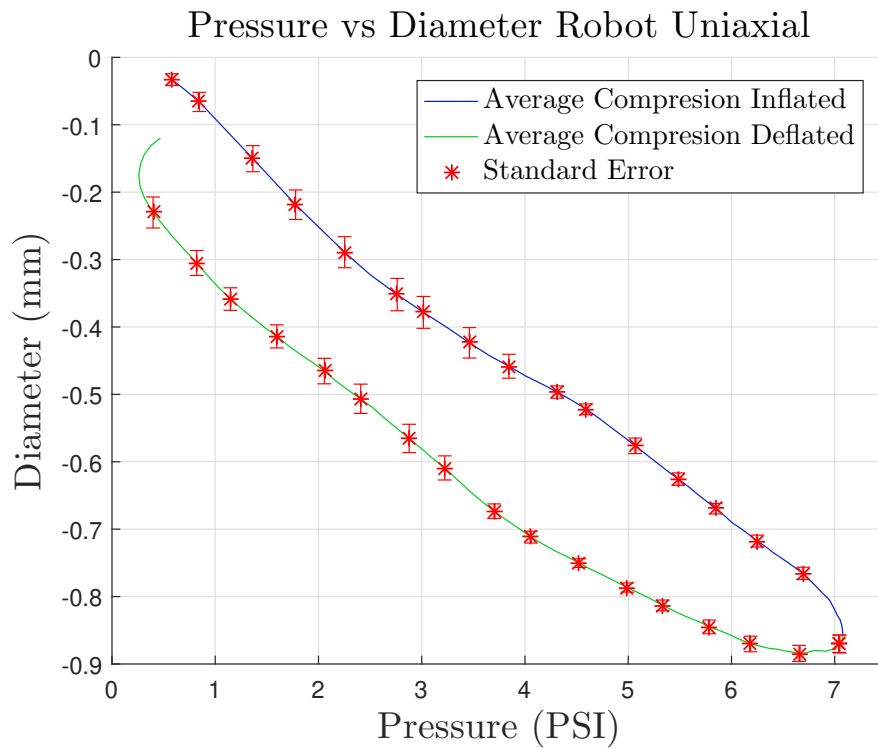


Figura 6.9: Disminución del diámetro con respecto a la presión, n=10.

Dentro del análisis realizado al *Robot Uniaxial* es de interés el saber el comportamiento del diámetro producto del presurizado y despresurizado de su propia matriz enmallada.

Se puede apreciar en la figura 6.9 el comportamiento del diámetro -o distancia entre un par de caras paralelas- al ser presurizado entre 0 y 7 PSI. Como era de esperar, el tamaño del *Robot Uniaxial* se redujo en casi 1 mm al realizar el presurizado. También se puede observar que la pendiente lineal define el modo de estrangulamiento -o disminución de diámetro- que presenta el módulo.

En resumen, el *Robot Uniaxial* se puede estirar casi un 40 % de su tamaño y disminuye su diámetro aproximadamente 4% al ser presurizado hasta 7 PSI.

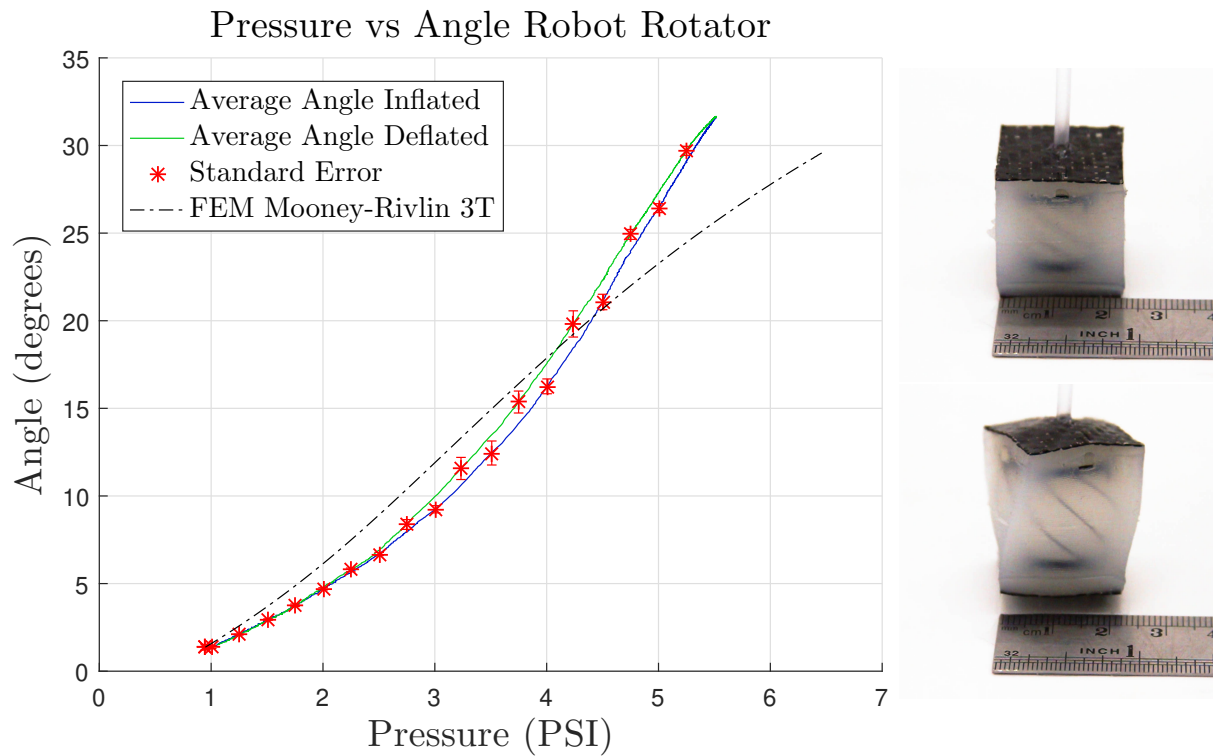


Figura 6.10: Angulo rotacional respecto a la presión, n=10.

En la figura 6.10 se presenta la deformación que sufre el *Robot Rotator* producido por el presurizado y por su matriz enmallada que logra rotar en sentido horario.

Se puede observar que hasta los 3 PSI la relación entre la presión y el ángulo es lineal, esto es ocasionado por las concentraciones de presiones de la misma magnitud, que son aplicadas en todo el cuerpo interno de la matriz enmallada. Después de los 3 PSI, el módulo presenta un incremento exponencial en el ángulo producido por la presión la cual es aplicada tanto en el manto como en las caras de la matriz siendo más concentradas en estas últimas producida por la resistencia que presenta -siendo menor debido a su espesor-.

La línea punteada en negro, corresponde a los datos obtenidos mediante el método de elementos finitos -FEM- utilizando el modelo de Mooney-Rivlin 3 términos.

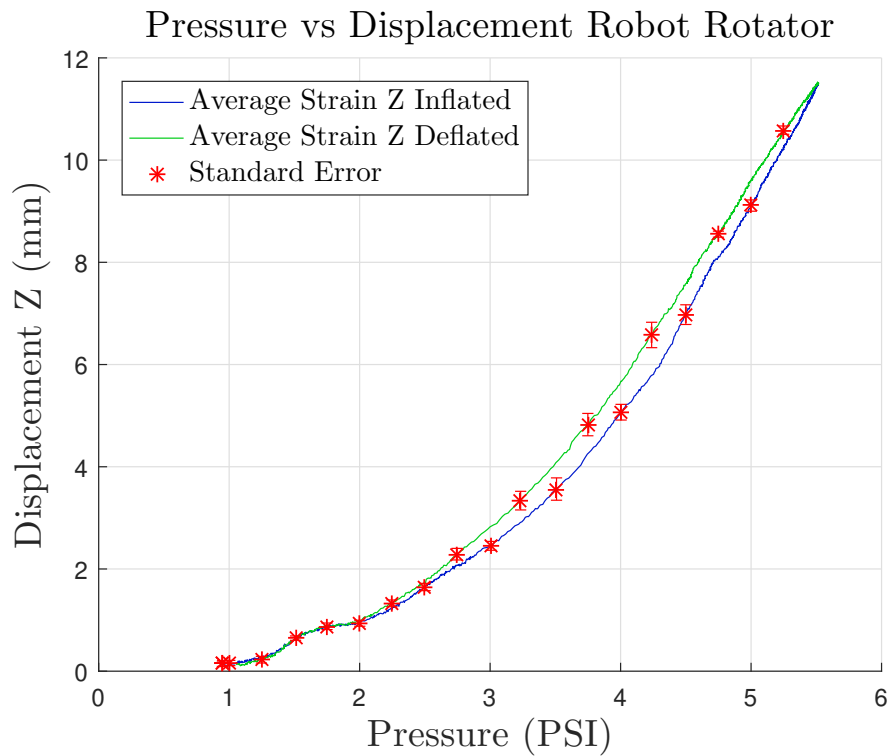


Figura 6.11: Desplazamiento en Z respecto a la presión, n=10.

En la figura 6.11 se presenta el comportamiento del desplazamiento en Z a medida que se va incrementando la presión. En el presurizado, se observa un aumento exponencial en el desplazamiento y en el despresurizado, un decrecimiento exponencial. Se puede apreciar una anomalía en el presurizado hasta 2 PSI, la cual puede ser producida por la geometría interna del módulo, que al incrementar su presión presenta una expansión en todo su matriz, sin embargo, esa disminución en el desplazamiento se da a entender porque la presión es mayor en el manto que en las caras del módulo y por tanto existe este estancamiento en el desplazamiento. Luego de esta singularidad, la presión se va concentrando en las caras del cilindro logrando la expansión en Z.

El *Robot Rotator* tiene la capacidad de rotar sobre los 30° y puede desplazarse en Z cerca de 11mm a una presión de 5.5 PSI.

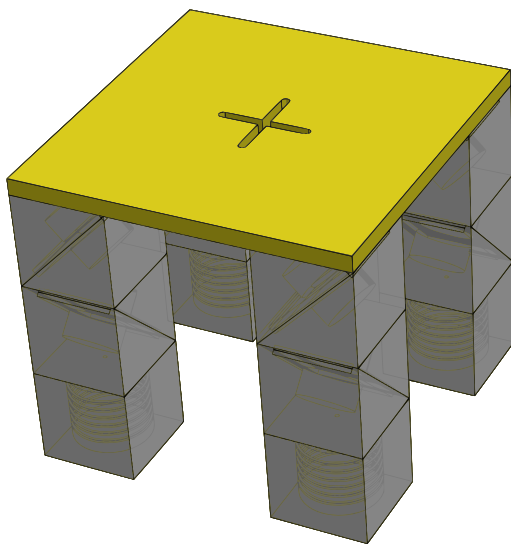
6.1. Plataforma móvil

Con el fin de indagar los potenciales usos de los robots modulares estudiados, se realiza una prueba con *Robots Shear* y *Robots Uniaxial* el cual consta de recrear el sistema de movilidad que poseen las impresoras 3D. Para ello se crean cuatro pilares, cada una de ellas está formada por dos *Robots Shear* -uno en dirección X y otro en dirección Y- y un *Robot Uniaxial* -en dirección Z-.

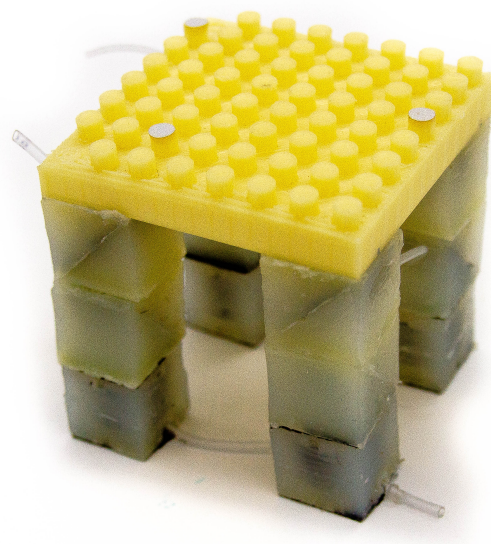
6.1.1. Esquema 3D

El esquema en 3D del sistema de movilidad en tres direcciones es presentado a continuación. Las dimensiones de esta plataforma móvil son 90 x 80 x 80mm. El sistema consta con tres válvulas solenoides y tres compresores, cada uno de ellos controla un grupo de cuatro módulos del mismo tipo y que estén en una misma dirección. El código de control puede ser observado en los anexos B.4 B.5 B.6.

En la figura 6.12a se presenta el diseño preliminar realizado en un software CAD y en la figura 6.12b se muestra la plataforma móvil implementada y lista para la adquisición datos de movimiento. Cabe destacar que en la parte superior de 6.12b se colocan tres marcadores que son utilizados por el Sistema OptiTrack para la obtención de los datos de posición.



(a) Diseño preliminar



(b) Plataforma móvil implementada

Figura 6.12: Sistema plataforma móvil en tres direcciones

6.1.2. Comportamiento

Para una mejor comprensión del comportamiento del sistema, se ha decidido presentar sus desplazamientos en tres diferentes gráficos -movimientos en X-Y X-Z e Y-Z-, los cuales mostrarán los datos adquiridos en el centro de la plataforma -simbolizado con una cruz-. Cada gráfico es obtenido mediante el control de compresores y solenoides. Para estos últimos se les envía un pulso logrando abrir y cerrar la válvula en un pequeño lapso de tiempo, el cual va incrementando hasta despresurizar completamente el módulo. Se realiza de este modo para lograr una despresurización controlada evitando movimientos bruscos que perturben la adquisición de datos del sistema. Para obtener el error estándar del desplazamiento y del ángulo, se utiliza la desviación estándar dividida por la raíz cuadrada del número de repeticiones -diez en total-. Para los módulos *Robot Shear* y *Robot Uniaxial* se utiliza un presurizado de 5 PSI y de 4 PSI respectivamente.

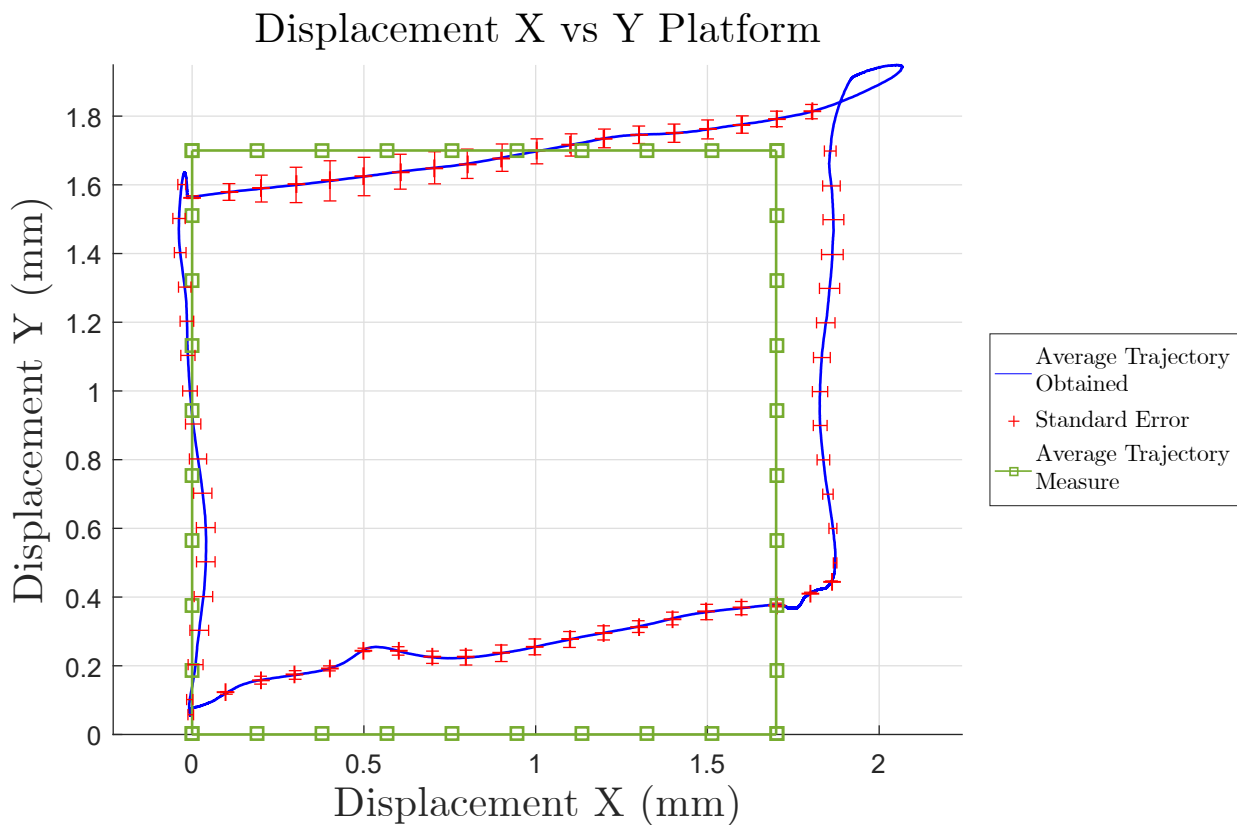


Figura 6.13: Desplazamiento X e Y de la plataforma móvil, n=10.

En la figura 6.13 se puede observar el comportamiento de la plataforma en los ejes X e Y. Para llevar a cabo esta prueba, se han presurizado las unidades correspondientes al desplazamiento en X y posterior al desplazamiento en Y, y después se despresurizan en el mismo orden. Se observa una anomalía en la parte superior derecha de la gráfica, momento exacto cuando los módulos están completamente presurizados. Por otro lado, se puede visualizar que el comportamiento del desplazamiento X posee una pendiente hasta su completo inflado y posterior desinflado, este fenómeno está asociado a la presurización y despresurización del *Robot Shear* que se ve afectado por un desplazamiento en el eje Z.

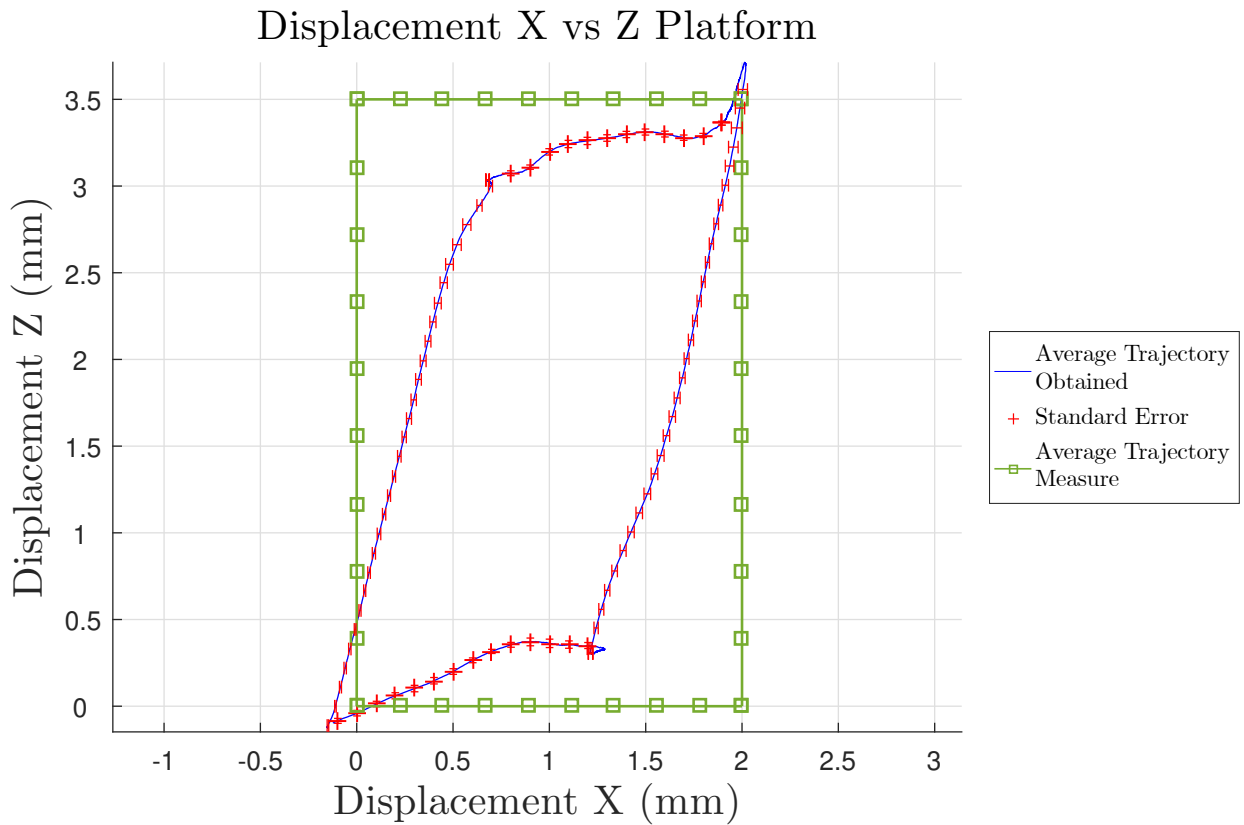


Figura 6.14: Desplazamiento X y Z de la plataforma móvil, n=10.

En la figura 6.14 se ve el comportamiento de la plataforma al moverse en X y Z. Para hacer esta prueba se ha presurizado el módulo correspondiente al desplazamiento en X y luego al desplazamiento en Z y después se despresuriza en el mismo orden. A simple vista se puede observar que, al realizar el primer presurizado no solo la trayectoria obtenida no llega a la deseada, sino también existe una pendiente que se hace presente hasta lograr estabilizarse, esta pendiente es provocada por la conducta que presenta los *Robots Shear* que, al ser presurizados presentan no solo un desplazamiento en X sino también en Z. Con respecto al segundo presurizado se observa una pendiente casi lineal, la cual es provocada por la inclinación que tiene el sistema gracias al modo de inyectar presión y al modo de acople entre módulos. Por último existe una anomalía al momento de iniciar el despresurizado de los módulos correspondientes al desplazamiento en X. Esta disminución brusca en el desplazamiento en Z se le atribuye a los módulos *Robots Shear* porque ellos presentan, no solo una expansión en X sino también en Z, la cual se ve plasmada en esta singularidad.

Displacement Y vs Z Platform

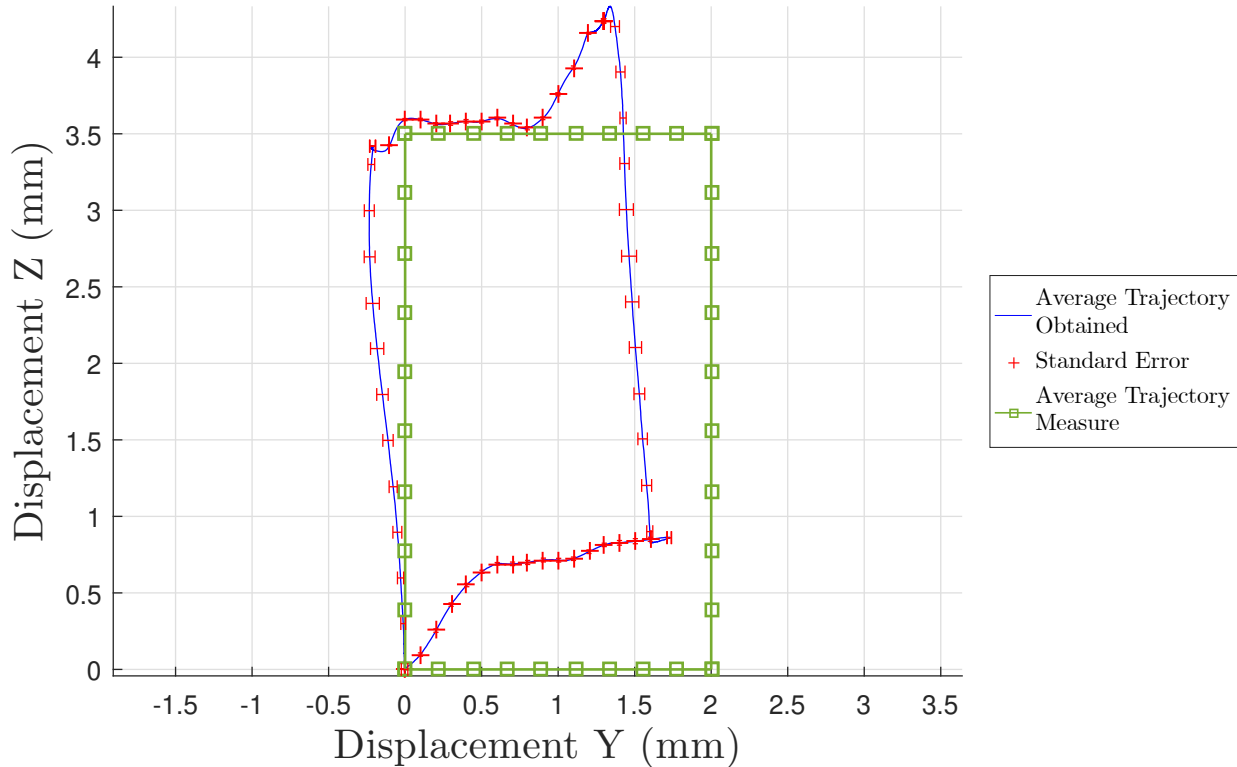


Figura 6.15: Desplazamiento Y y Z de la plataforma móvil, $n=10$.

En la figura 6.15 se ve el comportamiento de la plataforma al realizar movimientos en Y y Z. Para hacer esta prueba se ha presurizado el módulo correspondiente al desplazamiento en Y y luego al desplazamiento en Z y después se despresuriza en el mismo orden. Al ejecutar el primer presurizado, se observa que la trayectoria obtenida no es la trayectoria esperada y también existe una pendiente que se hace presente al inicio del presurizado hasta lograr estabilizarse, esta pendiente es provocada por el comportamiento natural de los *Robots Shear* que, al ser presurizados presentan no solo un deslizamiento en Y sino también un desplazamiento en Z. Al presurizar los segundos módulos para realizar el movimiento en Z se observa que su comportamiento es el esperado, donde el desplazamiento es casi perpendicular. Luego al efectuar el despresurizado se puede percibir una gran disminución en el desplazamiento en Z acompañado del desplazamiento que se requiere obtener, este fenómeno es explicado -al igual que en el presurizado- porque los *Robots Shear* presentan un deslizamiento en Y y un desplazamiento en Z. Y por último y al igual que el presurizado de los *Robots Uniaxial* se revela que el desplazamiento en Z se comporta de forma casi perpendicular.

6.1.3. Secuencia de movimiento

A continuación se muestra una secuencia correspondiente al movimiento realizado por la plataforma móvil al ser sometida a las pruebas de la sección anterior. Cabe destacar que se utilizó un espejo colocado en 45° para observar el desplazamiento con dos puntos de vista en simultáneo.

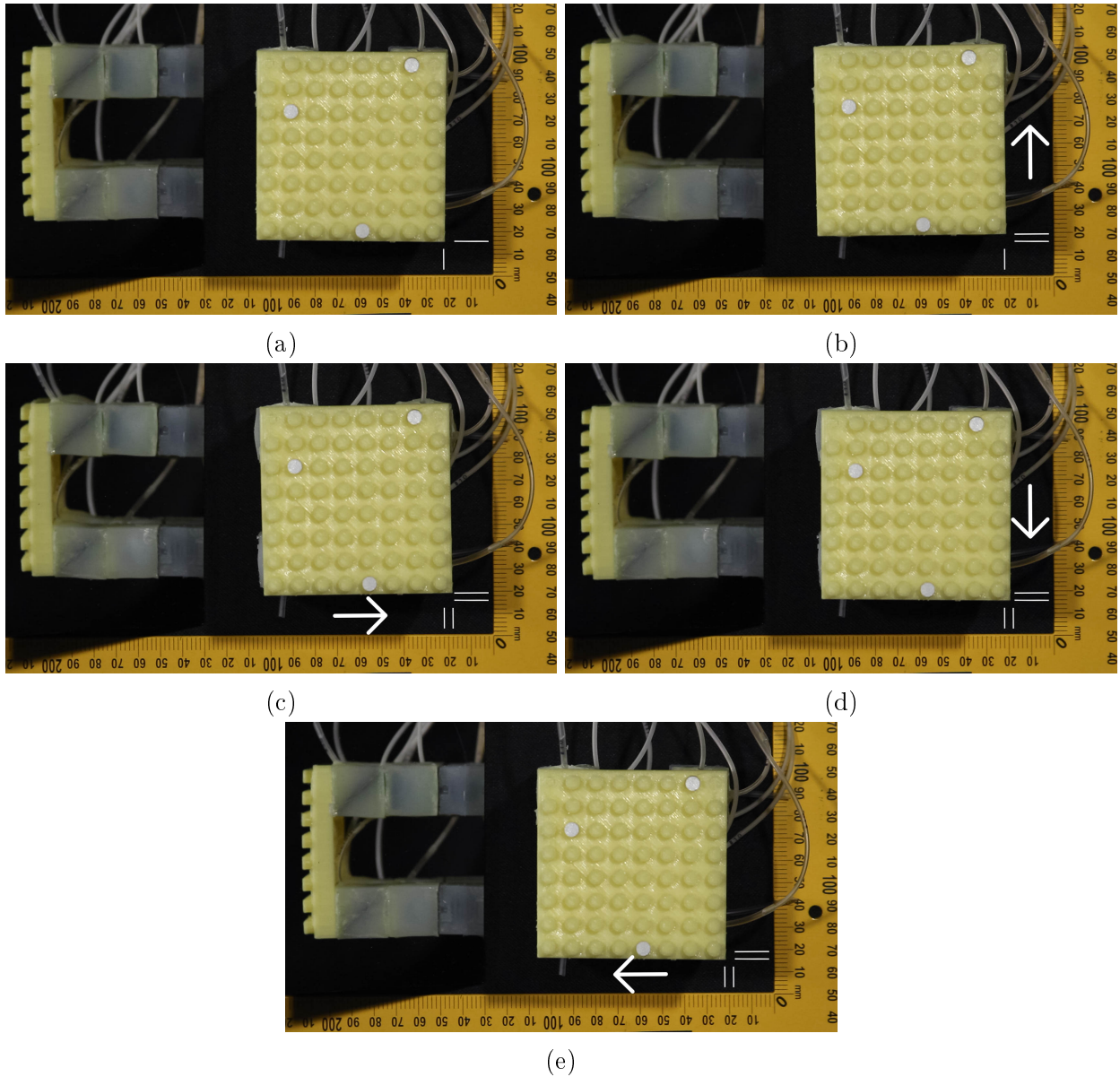


Figura 6.16: Movimiento de la plataforma móvil en X e Y

En la figura 6.16 se realiza un movimiento describiendo una figura cuadrada. En la figura 6.16a se presenta el sistema en reposo y se colocan dos marcas para diferenciar el movimiento. La figura 6.16b muestra el desplazamiento en el eje Y positivo, presurizando los módulos que corresponden a ese eje hasta llegar a la presión -o al desplazamiento- deseado. Para la figura 6.16c se realiza el mismo procedimiento que en la figura anterior salvo por la dirección de desplazamiento que se cambia por el eje X positivo. En las figuras 6.16d y 6.16e se realizan el despresurizado para cada eje -Y y X respectivamente- hasta que el sistema llegue al reposo

-sin presión en los módulos-

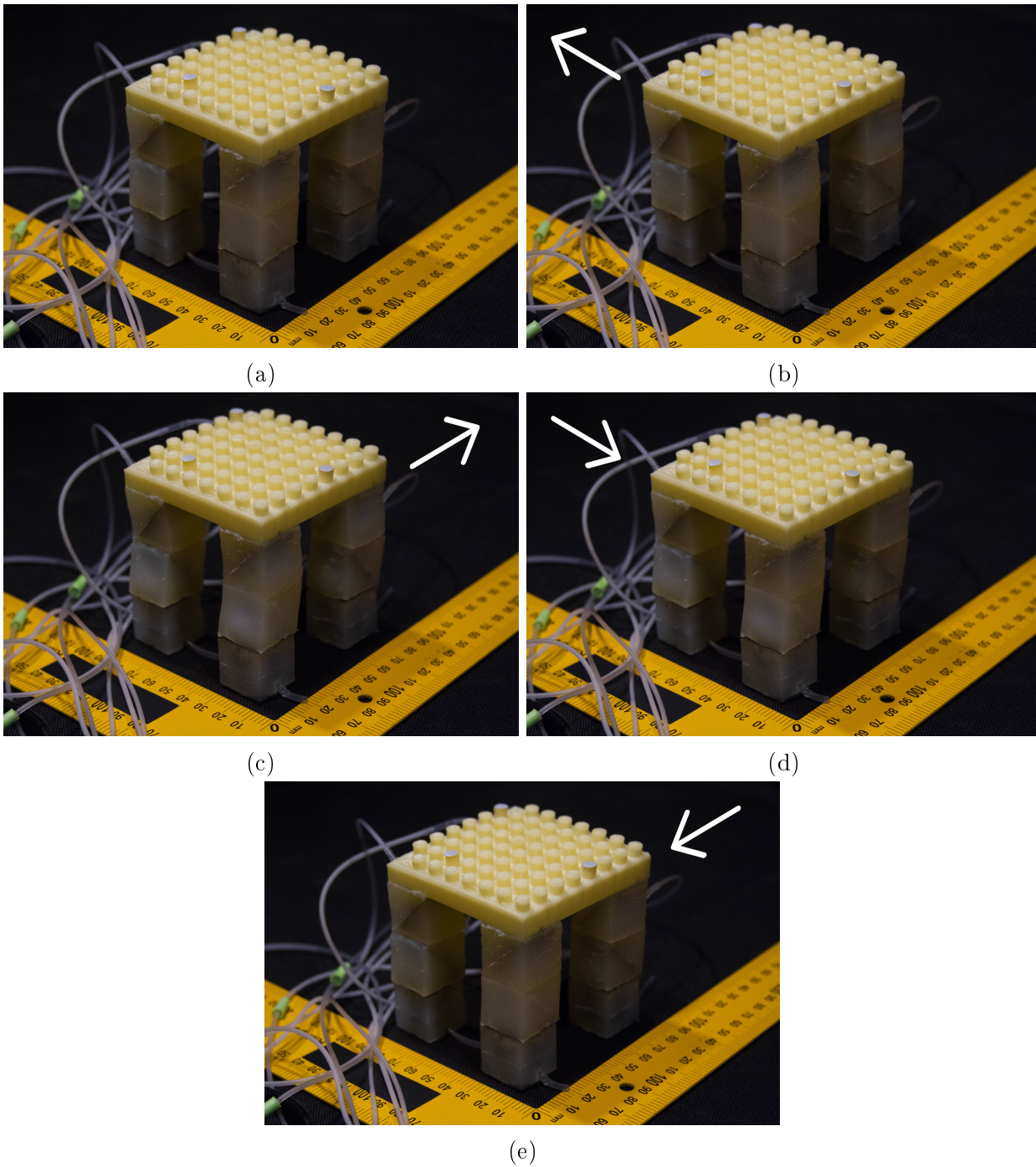


Figura 6.17: Movimiento de la plataforma móvil en X e Y

La figura 6.17 corresponde a la misma secuencia que la figura 6.16 pero con una vista isométrica. Las flechas en blanco muestran la dirección del desplazamiento de la plataforma móvil.²

²<https://www.youtube.com/watch?v=wDNx-ZRgSBI>

Capítulo 7

Discusión

En los capítulos anteriores se han presentado la manera de abordar el problema planteado en el inicio de esta tesis, desarrollando un análisis mediante modelamiento matemático y resultados experimentales. Habiendo realizado las pruebas necesarias, se exponen y se discuten en el presente capítulo los datos adquiridos en conjunto con su propio análisis.

7.1. Diseño

Cada molde diseñado cumple con las características necesarias para lograr el comportamiento esperado. Los módulos no requieren circuitos ni mecanismos internos para lograr el funcionamiento del sistema, solo es necesario un sistema neumático que presurice y despresurice la cámara interna de cada módulo. Lo anterior es posible por el diseño interno de cada robot y el uso de un material inextensible para lograr restringir el movimiento de la matriz interna en ciertas direcciones.

Dentro del diseño no se contempla la conexión entre módulos, ya que esto ya fue demostrado en [16]. Para la creación de sistemas con varias unidades heterogéneas, solo se unen mediante el mismo elastómero siendo imposible la auto-configuración del sistema.

El diseño de cada módulo han brindado resultados esperados, sin embargo se han identificado algunas características que podrían ser mejoradas. Es recomendable disminuir el tamaño de la matriz interna de cada robot modular el cual le daría más robustez al sistema. Por otro lado, es necesario encontrar una interfaz óptima para el accionamiento neumático, ya que la unión entre la silicona y la manguera tiende a tener fugas. Y por último, se debe encontrar un método de acoplamiento entre cada módulo para lograr sistemas reconfigurables, sin alterar el comportamiento de dichas unidades.

7.2. Modelado

Las simulaciones obtenidas mediante los modelos FEM en el software Ansys, no muestran el comportamiento esperado en relación a los resultados experimentales de cada robot modular.

Como los datos utilizados en el modelamiento no son obtenidos mediante un análisis de esfuerzo-deformación propio de cada sistema, la información recopilada en la base de datos nos brindan resultados lejanos a los obtenidos experimentalmente. No obstante, para obtener coeficientes de mejor calidad, se hace necesario adquirir las propiedades mecánicas correspondientes a cada módulo, realizando pruebas de tensión y compresión. Ya que existen una amplia gama de investigaciones relacionadas con el elastómero utilizado en esta tesis, se decide aplicar la teoría para lograr discernir datos de interés para la simulación de cada módulo.

Si bien los datos simulados presentan resultados alejados a los experimentales, el emplear un computador que no está dotado con componentes idóneos para la simulación en 3D ralentiza el proceso de solución del modelo matemático. Por el contrario, el uso de un computador adecuado, no solo disminuiría el tiempo del cálculo de la solución, sino también es posible definir un mallado más detallado y así obtener datos más fidedignos.

7.3. Fabricación

El proceso de fabricación no es complejo, sin embargo es necesario conocer los tiempos óptimos para evitar que el elastómero se cure antes de tiempo. Es fundamental utilizar una cámara de vacío que elimine el aire de la mezcla, puesto que las burbujas en el módulo son perjudiciales para el comportamiento del mismo.

Se debe considerar que en la fabricación de los moldes, la resolución utilizada de la impresora 3D fue de 0.1mm. Esto es ajustado a ese valor para obtener piezas con una buena calidad superficial para que los moldes no tengan patrones que afecten su comportamiento. La fabricación de los moldes con una precisión deficiente podría resultar en módulos defectuosos, logrando que el elastómero no alcance a rellenar todo el volumen o en filtraciones fuera de los moldes.

La falla más observada en la fabricación de los módulos es la interfaz entre la silicona y la manguera producida por la incompatibilidad entre los materiales. Para forzar la unión entre ambos elementos se utiliza un pegamento de contacto que el cual mejora notablemente la adherencia entre ambos materiales pero se genera una zona rígida que modifica en menor escala el comportamiento en dicha zona del módulo.

Otro de los problemas que es importante mencionar es la expansión excesiva que se obtiene en la parte superior e inferior de cada módulo -con excepción del Robot Biaxial- al ser presurizado. Esto es controlado colocando una malla inextensible -fibra de carbono- que controla dicha expansión.

7.4. Control

Para la parte de control, se utilizó un circuito sencillo pero eficiente donde fue posible controlar con facilidad el presurizado y despresurizado de cada robot modular blando.

Los componentes utilizados en los circuitos de control y de neumática son encontrados en el laboratorio, y estos son implementados en dichos esquema para optimizar el tiempo en la

realización de pruebas experimentales. Sin embargo es importante seleccionar componentes que se ajusten a las necesidades del sistema y no componentes electrónicos con mayores o menores capacidades que las requeridas. Para obtener mejores resultados es necesario utilizar compresores de mejor calidad o implementar un método de control más eficiente para el control del presurizado y despresurizado de cada módulo.

7.5. Resultados y verificación de modelos

De los resultados obtenidos de los ensayos experimentales se puede decir que los módulos exhiben grandes deformaciones a presiones bajas. Gracias a esto se han podido utilizar compresores de menor capacidad, los cuales no consumen una gran cantidad de energía y al operar a presiones bajas, brinda mayor seguridad de trabajo.

Sobre las curvas de deformación, es posible exponer que su deformación era la esperada y que se comporta como un típico elastómero, donde la deformación elástica no es lineal, y la resistencia interna de cada módulo es alta hasta un punto en el cual al cambiar levemente la presión se va generando una mayor variación en su volumen. Al realizar las pruebas correspondientes a cada módulo, se observa que la expansión volumétrica no deteriora el comportamiento de los mismos, que se quiere decir con esto, luego de realizar 10 pruebas de presurizado y despresurizado en cada módulo, la expansión y el desplazamiento experimental no se ve afectado. Por tanto se puede reafirmar que su comportamiento es elástico no lineal, tal como se ven en las curvas de deformación.

De la comparación entre los resultados obtenidos mediante el modelado *FEM* -Mooney-Rivlin 3T- y los experimentales, se puede observar una gran diferencia en la simulación de cada robot en contraste con la información experimental adquirida. Esto se puede explicar porque en las simulaciones se definieron parámetros que en lo experimental no se fijaron, e.g. caras del módulo fijas. Y también en las simulaciones no se tomaron en consideración procedimientos que influyeron en el comportamiento de cada robot, e.g. el uso de mangueras para el presurizado, irregularidades geométricas en el módulo.

La prueba de la plataforma móvil ha entregado resultados esperados, sin embargo las dimensiones y su precisión son insuficientes para ser utilizado como una plataforma eficiente y ser implementada como una impresora 3D. Para obtener mejores resultados es trascendental poder controlar el modo de despresurizado de la plataforma móvil, y así lograr un control mayor al obtenido hasta el momento. Siguiendo con el mismo tema, el uso de componentes que no satisfacen los requerimientos mínimos, provoca errores de lectura y del comportamiento del sistema -e.g. conexión entre mangueras, *fittings*, compresores, válvulas y módulos-.

Capítulo 8

Conclusión

8.1. Cumplimiento de objetivos

En relación a los objetivos específicos planteados en esta investigación, podemos decir que,

- Se han diseñado cinco tipos de robots modulares blandos capaces de realizar diferentes movimientos y/o rotaciones tales como la expansión uniaxial, expansión biaxial, rotación, inclinación y deslizamiento. Estas deformaciones son logradas mediante la inyección de presión mediante un mini compresor y solenoides que regulan la presión interna.
- El cuerpo de los robots modulares blandos han sido fabricados con la técnica de litografía blanda utilizando silicona ecoflex 00-30 y moldes impresos en 3D. También, los módulos han sido reforzados con fibra inextensible que han dotado al sistema un método de restricción de expansión o movimiento facilitando la deformación en otras áreas logrando así los movimientos requeridos planteados en la tesis.
- Se han caracterizado cada robot modular blando utilizando el Método de Elementos Finitos con un modelo para materiales hiperelásticos llamado Modelo Mooney-Rivlin de tres términos. De estos modelos se obtuvieron el comportamiento de cada robot generando así curvas de presión-deformación para luego ser comparados con los resultados experimentales generados mediante el sistema de adquisición de datos OptiTrack.
- Se ha creado un sistema capaz de simular el movimiento de una impresora 3D cartesiana que, si bien presenta ciertas limitaciones tanto en la precisión como en la dimensión máxima, cumple con lo básico para ser catalogado como un sistema de impresora 3D.
- Se ha caracterizado el comportamiento del sistema presentado en el objetivo anterior utilizando el mismo sistema de adquisición de datos OptiTrack, logrando obtener curvas de las deformaciones presentadas cada dos ejes analizados.

Por tanto se cumplen en su totalidad los objetivos específicos fijados.

8.2. Conclusiones generales

En esta investigación se ha creado por primera vez una población de robots modulares blandos heterogéneos que logran movimientos únicos mediante el diseño de la matriz interna al ser presurizado con aire comprimido.

La población de robots modulares blandos ha presentado un gran potencial para ser utilizado en diferentes áreas de la investigación. Si bien en esta tesis solo se ha realizado y se ha analizado un sistema en específico -plataforma móvil tipo impresora 3D cartesiana-, los robots modulares brindan una gran versatilidad para lograr una variada gama de configuraciones y obteniendo diferentes movimientos o imitando comportamientos de equipos conocidos.

Si bien el uso de una fibra de refuerzo -*Fiber Reinforced*- ya ha sido utilizada en actuadores logrando un sistema controlado y brindando grados de libertad adicionales, se ha demostrado que el uso de una hebra inextensible ha dotado en cada módulo, una configuración predeterminada, capaz de lograr movimientos únicos guiados exclusivamente por el devanado.

Una de las características que han presentado estos robots ha sido la simpleza en el proceso de manufactura, logrando que la investigación se pueda replicar de manera exacta obteniendo los mismos resultados.

Las simulaciones realizadas mediante el método de elementos finito para materiales hiperelásticos han entregado una idea preliminar del comportamiento que presentarían los módulos bajo presión. Sin embargo, ha sido necesario definir áreas rígidas para que el modelamiento pueda converger afectando en gran medida la respuesta que entrega el sistema y por ende, los datos de la simulación y los datos adquiridos experimentalmente difieren entre sí.

Ha quedado en evidencia que el elastómero utilizado posee una histéresis en su deformación al ser sometido a una prueba experimental de presurizado y despresurizado de forma paulatina [51]. Este fenómeno ha sido observado en la variación de su volumen al aumentar y disminuir la presión interna aplicada.

Con respecto a la plataforma móvil implementada se puede decir que, la diferencia entre las trayectorias obtenidas y las esperadas corresponden a las deformaciones requeridas y a la suma de errores de las deformaciones no controladas de cada módulo. Cada pilar de la plataforma móvil presenta una configuración serial, donde el error de cada módulo se va sumando aumentando el error.

8.3. Limitaciones

- El movimiento de cada robot modular se ve afectado por las conexiones de presión. Este enlace genera zonas rígidas que son producidas por el pegamento de contacto utilizado para sellar la unión.
- El material que se ha utilizado para la confección de los robots modulares brinda flexibilidad y resiliencia al sistema, logrando grandes deformaciones sin dañar o fatigar el material. Sin embargo este elastómero hiperelástico es extremadamente frágil contra geometrías que presenten áreas filosas o punzantes.
- El error existente producido por las deformaciones no deseadas, provoca que la precisión en una población unida se vea afectada notoriamente, limitando su uso a configuraciones que no requieran un control exacto.

8.4. Trabajos Futuros

- Cambiar o modificar el modo de presurizado y despresurizado, logrando u obteniendo un sistema que sea lo menos invasivo para los robots.
- Realizar ensayos de tensión y compresión uniaxial, biaxial y planar para adquirir datos correspondientes a cada robot modular blando.
- Utilizar equipos y componentes que satisfagan las necesidades que requiere la parte de control.
- Realizar configuraciones donde se aprecien más las características que cada módulo puede aportar al sistema.
- Escalar estos módulos, para observar si el diseño y su devanado son afectado por la disminución de tamaño.

Bibliografía

- [1] R. F. M. Garcia, A. Lyder, D. J. Christensen, and K. Stoy, “Reusable electronics and adaptable communication as implemented in the odin modular robot,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, may 2009.
- [2] R. F. M. Garcia, J. D. Hiller, K. Stoy, and H. Lipson, “A vacuum-based bonding mechanism for modular robotics,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, pp. 876–890, oct 2011.
- [3] K. Stoy, D. Brandt, and D. J. Christensen, *Self-Reconfigurable Robots: An Introduction*. MIT PR, 2010.
- [4] M. Yim, W. min Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins, and G. Chirikjian, “Modular self-reconfigurable robot systems [grand challenges of robotics],” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 14, pp. 43–52, mar 2007.
- [5] P. Glick, S. A. Suresh, D. Ruffatto, M. Cutkosky, M. T. Tolley, and A. Parness, “A soft robotic gripper with gecko-inspired adhesive,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, pp. 903–910, apr 2018.
- [6] J. Zehnder, E. Knoop, M. Bächer, and B. Thomaszewski, “Metasilicone,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 36, pp. 1–13, nov 2017.
- [7] A. A. Calderon, J. C. Ugalde, J. C. Zagal, and N. O. Perez-Arancibia, “Design, fabrication and control of a multi-material-multi-actuator soft robot inspired by burrowing worms,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, dec 2016.
- [8] N. Saga and T. Nakamura, “Development of a peristaltic crawling robot using magnetic fluid on the basis of the locomotion mechanism of the earthworm,” *Smart Materials and Structures*, vol. 13, pp. 566–569, may 2004.
- [9] F. Renda, M. Giorelli, M. Calisti, M. Cianchetti, and C. Laschi, “Dynamic model of a multibending soft robot arm driven by cables,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, pp. 1109–1122, oct 2014.
- [10] M. Wehner, R. L. Truby, D. J. Fitzgerald, B. Mosadegh, G. M. Whitesides, J. A. Lewis, and R. J. Wood, “An integrated design and fabrication strategy for entirely soft,

autonomous robots,” *Nature*, vol. 536, pp. 451–455, aug 2016.

- [11] K. Suzumori, S. Endo, T. Kanda, N. Kato, and H. Suzuki, “A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot,” in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4975–4980, April 2007.
- [12] S. Kim, C. Laschi, and B. Trimmer, “Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics,” *Trends in biotechnology*, vol. 31, no. 5, pp. 287–294, 2013.
- [13] R. Kang, Y. Guo, K. Cheng, and L. Chen, “Design and control of a soft actuator driven by pneumatic muscles,” in *Industrial Automation, Information and Communications Technology (IAICT), 2014 International Conference on*, pp. 26–30, IEEE, 2014.
- [14] E. T. Roche, R. Wohlfarth, J. T. Overvelde, N. V. Vasilyev, F. A. Pigula, D. J. Mooney, K. Bertoldi, and C. J. Walsh, “A bioinspired soft actuated material,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 8, pp. 1200–1206, 2014.
- [15] S. C. Obiajulu, E. T. Roche, F. A. Pigula, and C. J. Walsh, “Soft pneumatic artificial muscles with low threshold pressures for a cardiac compression device,” in *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. V06AT07A009–V06AT07A009, American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [16] A. Vergara, Y. sheng Lau, R.-F. Mendoza-Garcia, and J. C. Zagal, “Soft modular robotic cubes: Toward replicating morphogenetic movements of the embryo,” *PLOS ONE*, vol. 12, p. e0169179, jan 2017.
- [17] J.-Y. Lee, W.-B. Kim, W.-Y. Choi, and K.-J. Cho, “Soft robotic blocks: Introducing SoBL, a fast-build modularized design block,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 23, pp. 30–41, sep 2016.
- [18] G. S. Chirikjian, “Kinematics of a metamorphic robotic system,” in *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 449–455 vol.1, May 1994.
- [19] A. Pamecha, I. Ebert-Uphoff, and G. S. Chirikjian, “Useful metrics for modular robot motion planning,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, pp. 531–545, Aug 1997.
- [20] D. J. Christensen, E. Ostergaard, and H. H. Lund, “Metamodule control for the atron self-reconfigurable robotic system,” *Proceedings of the the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems (ias-8)*, pp. 685–692, 2004.
- [21] H. Zhang, J. Gonzalez-Gomez, Z. Me, S. Cheng, and J. Zhang, “Development of a low-cost flexible modular robot gz-i,” in *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 223–228, July 2008.
- [22] E. Sahin, T. H. Labella, V. Trianni, J. L. Deneubourg, P. Rasse, D. Floreano, L. Gambardella, F. Mondada, S. Nolfi, and M. Dorigo, “Swarm-bot: pattern formation in a swarm

- of self-assembling mobile robots,” in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 4, pp. 6 pp. vol.4–, Oct 2002.
- [23] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, V. Mattoli, and M. R. Cutkosky, “Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot,” in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1268–1273, April 2007.
- [24] S. Kim, J. E. Clark, and M. R. Cutkosky, “isprawl: Design and tuning for high-speed autonomous open-loop running,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 9, pp. 903–912, 2006.
- [25] S. Avadhanula and R. S. Fearing, “Flexure design rules for carbon fiber microrobotic mechanisms,” in *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pp. 1579–1584, IEEE, 2005.
- [26] R. J. Wood, S. Avadhanula, R. Sahai, E. Steltz, and R. S. Fearing, “Microrobot design using fiber reinforced composites,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, no. 5, p. 052304, 2008.
- [27] E. Feilden, E. G.-T. Blanca, F. Giuliani, E. Saiz, and L. Vandeperre, “Robocasting of structural ceramic parts with hydrogel inks,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 36, no. 10, pp. 2525–2533, 2016.
- [28] A. D. Marchese, R. K. Katzschmann, and D. Rus, “A recipe for soft fluidic elastomer robots,” *Soft Robotics*, vol. 2, no. 1, pp. 7–25, 2015.
- [29] Y. Xia and G. M. Whitesides, “Soft lithography,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 37, no. 5, pp. 550–575, 1998.
- [30] D. Qin, Y. Xia, and G. M. Whitesides, “Soft lithography for micro- and nanoscale patterning,” *Nature Protocols*, vol. 5, pp. 491–502, feb 2010.
- [31] D. Rus and M. T. Tolley, “Design, fabrication and control of soft robots,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, p. 467, 2015.
- [32] Z. Wang, P. Polygerinos, J. T. B. Overvelde, K. C. Galloway, K. Bertoldi, and C. J. Walsh, “Interaction forces of soft fiber reinforced bending actuators,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, pp. 717–727, April 2017.
- [33] P. Polygerinos, Z. Wang, J. T. B. Overvelde, K. C. Galloway, R. J. Wood, K. Bertoldi, and C. J. Walsh, “Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, pp. 778–789, June 2015.
- [34] G. Krishnan, J. Bishop-Moser, C. Kim, and S. Kota, “Evaluating mobility behavior of fluid filled fiber-reinforced elastomeric enclosures,” in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 1089–1099, American Society of Mechanical Engineers, 2012.

- [35] J. Bishop-Moser and S. Kota, “Design and modeling of generalized fiber-reinforced pneumatic soft actuators,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, pp. 536–545, June 2015.
- [36] F. Connolly, P. Polygerinos, C. J. Walsh, and K. Bertoldi, “Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle,” *Soft Robotics*, vol. 2, pp. 26–32, mar 2015.
- [37] C. Kopic and K. Gohlke, “Inflatibits: A modular soft robotic construction kit for children,” *Proceedings of the TEI ’16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI ’16)*, 2016.
- [38] P. J. White, K. Kopanski, and H. Lipson, “Stochastic self-reconfigurable cellular robotics,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA. 2004*, vol. 3, pp. 2888–2893 Vol.3, April 2004.
- [39] J. Germann, M. Dommer, R. Pericet-Camara, and D. Floreano, “Active connection mechanism for soft modular robots,” *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 7, pp. 785–798, 2012.
- [40] A. M. Bertetto and M. Ruggiu, “Characterization and modeling of air muscles,” *Mechanics Research Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 185 – 194, 2004.
- [41] P. Polygerinos, S. Lyne, Z. Wang, L. F. Nicolini, B. Mosadegh, G. M. Whitesides, and C. J. Walsh, “Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation,” in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1512–1517, Nov 2013.
- [42] R. W. Ogden, “Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids,” *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 326, no. 1567, pp. 565–584, 1972.
- [43] O. Yeoh, “Some forms of the strain energy function for rubber,” *Rubber Chemistry and technology*, vol. 66, no. 5, pp. 754–771, 1993.
- [44] E. M. Arruda and M. C. Boyce, “A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 41, no. 2, pp. 389–412, 1993.
- [45] H.-G. Kilian, H. Enderle, and K. Unseld, “The use of the van der waals model to elucidate universal aspects of structure-property relationships in simply extended dry and swollen rubbers,” *Colloid and Polymer Science*, vol. 264, no. 10, pp. 866–876, 1986.
- [46] M. Mooney, “A theory of large elastic deformation,” *Journal of applied physics*, vol. 11, no. 9, pp. 582–592, 1940.
- [47] R. Rivlin and D. Saunders, “Large elastic deformations of isotropic materials,” in *Collected Papers of RS Rivlin*, pp. 157–194, Springer, 1997.
- [48] L. J. Huat, *Customizable Soft Pneumatic Gripper Devices*. PhD thesis, National University of Singapore, 2015.
- [49] P. Moseley, J. M. Florez, H. A. Sonar, G. Agarwal, W. Curtin, and J. Paik, “Mode-

ling, design, and development of soft pneumatic actuators with finite element method,” *Advanced Engineering Materials*, vol. 18, no. 6, pp. 978–988, 2016.

- [50] Y. Huang, Y. Wang, L. Xiao, H. Liu, W. Dong, and Z. Yin, “Microfluidic serpentine antennas with designed mechanical tunability,” *Lab on a Chip*, vol. 14, no. 21, pp. 4205–4212, 2014.
- [51] D. Moore and W. Geyer, “A review of hysteresis theories for elastomers,” *Wear*, vol. 30, no. 1, pp. 1 – 34, 1974.

Anexo Diseños

Robot Tilt

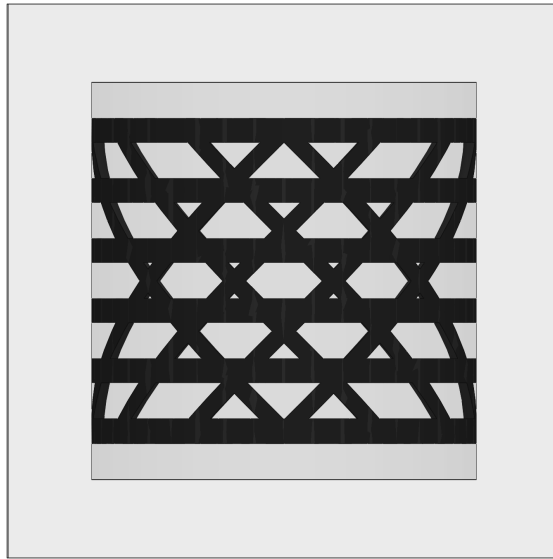


Figura A.1: Vista lateral diseño *Robot Tilt*

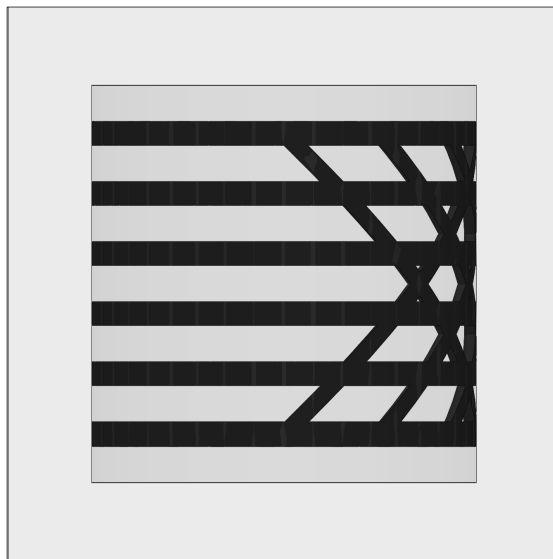


Figura A.2: Vista alzado diseño *Robot Tilt*

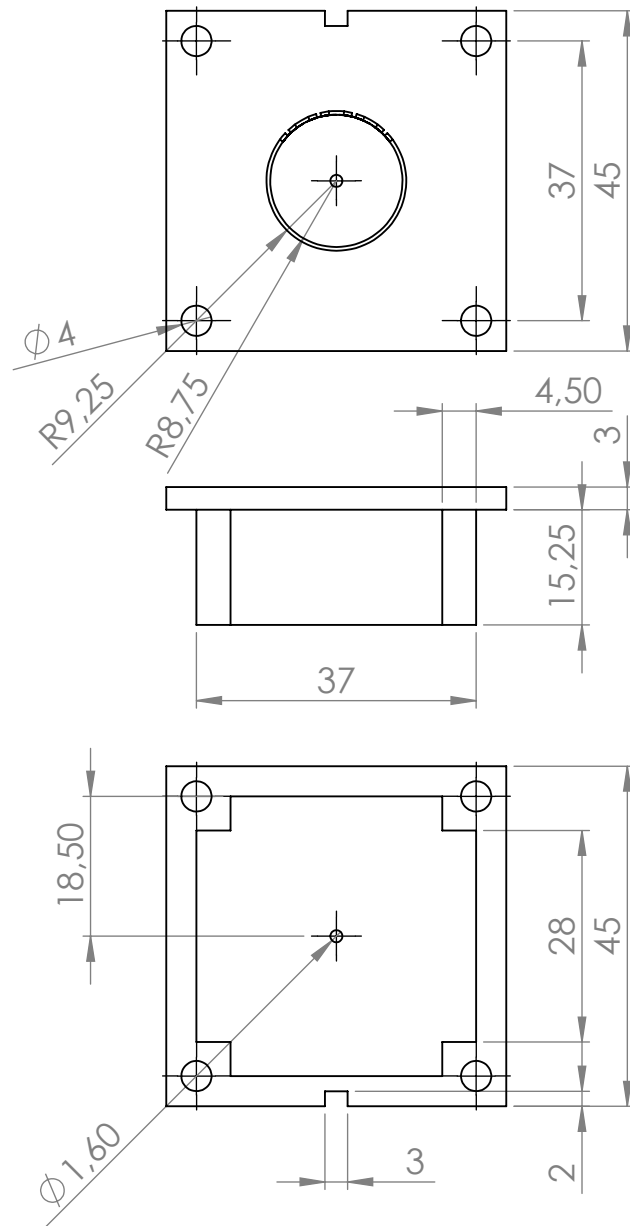


Figura A.3: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Tilt* parte A

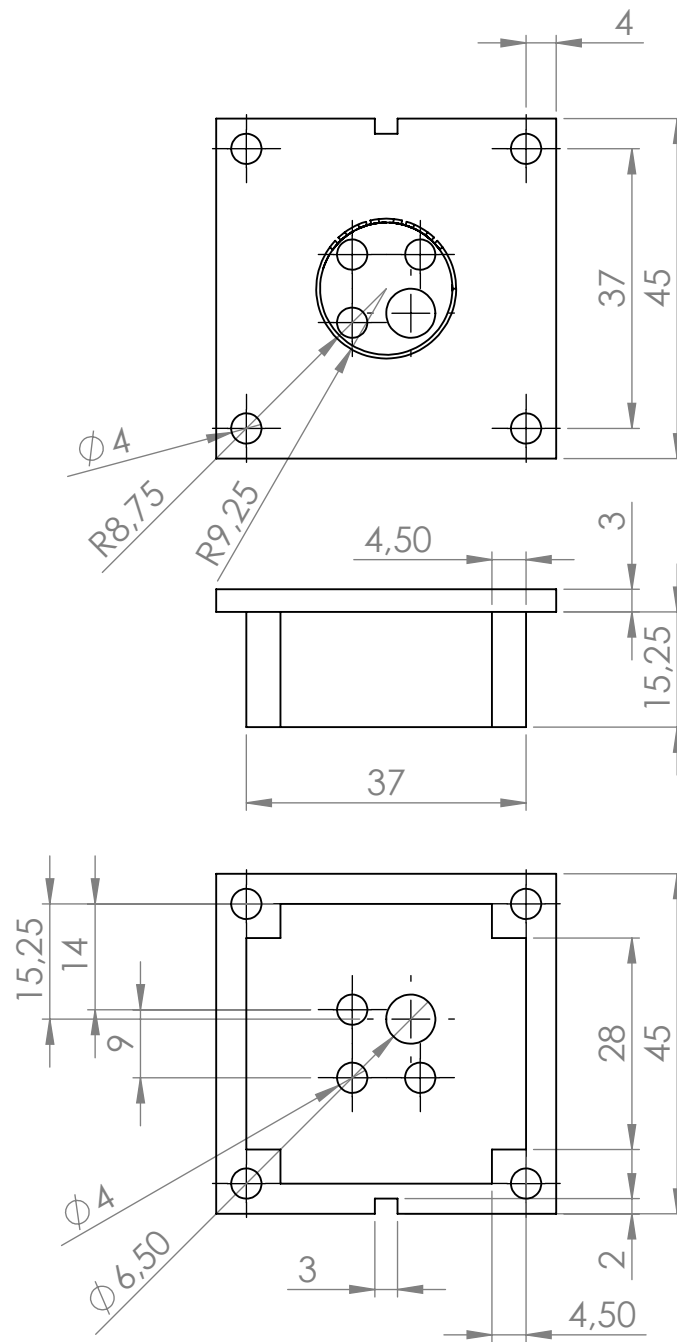


Figura A.4: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Tilt* parte B

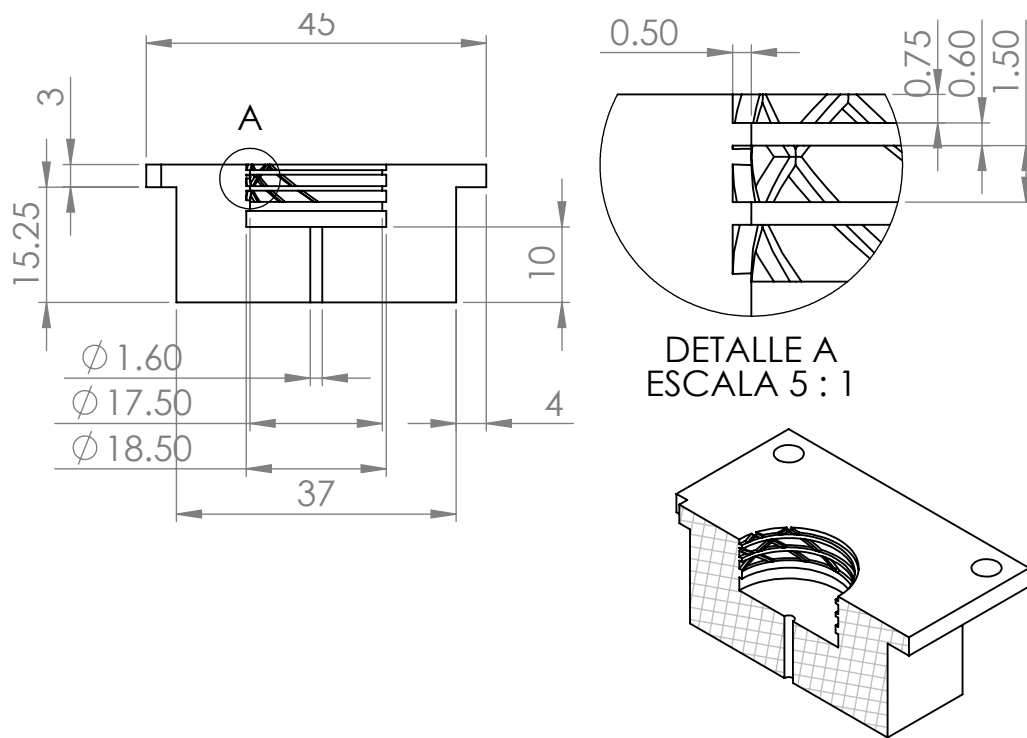


Figura A.5: Vista en corte del molde del *Robot Tilt* parte A

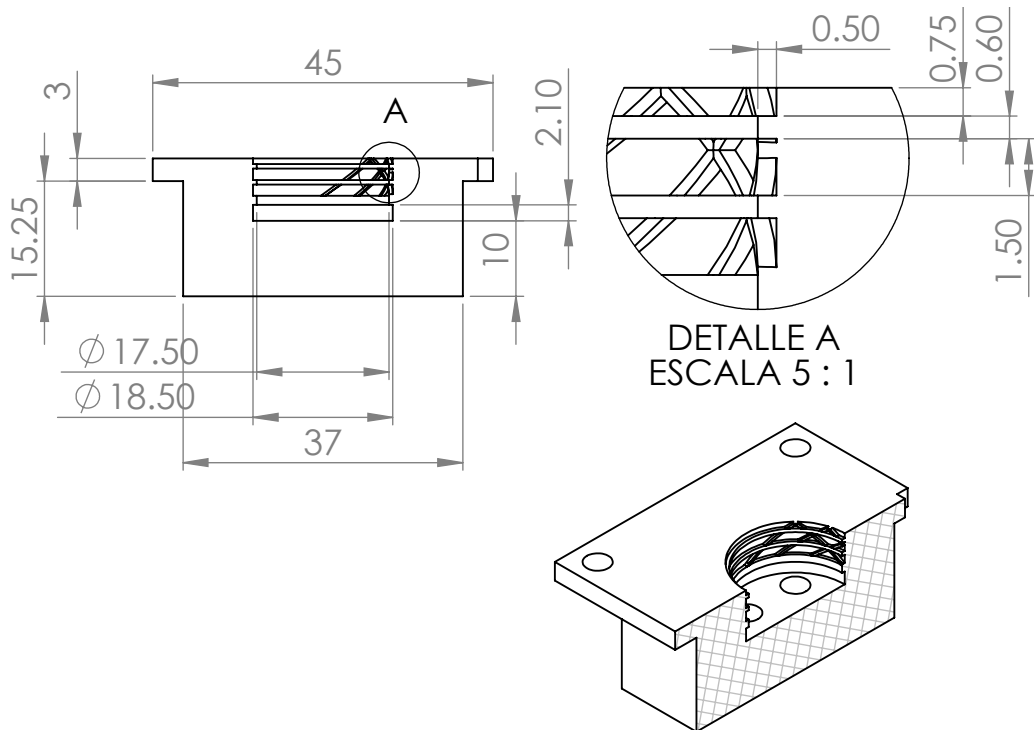


Figura A.6: Vista en corte del molde del *Robot Tilt* parte B

Robot Biaxial

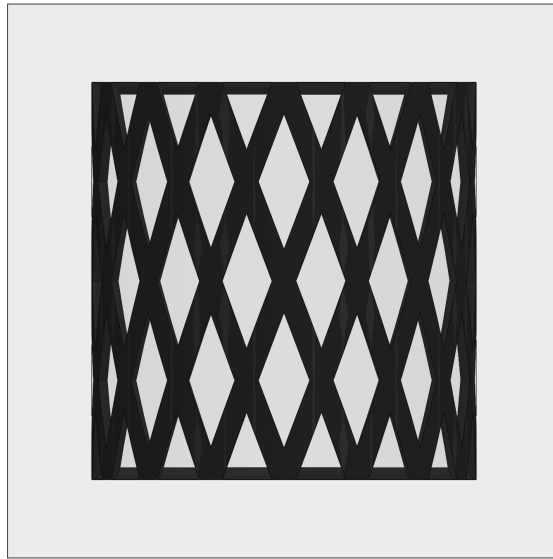


Figura A.7: Vista lateral del diseño *Robot Biaxial*

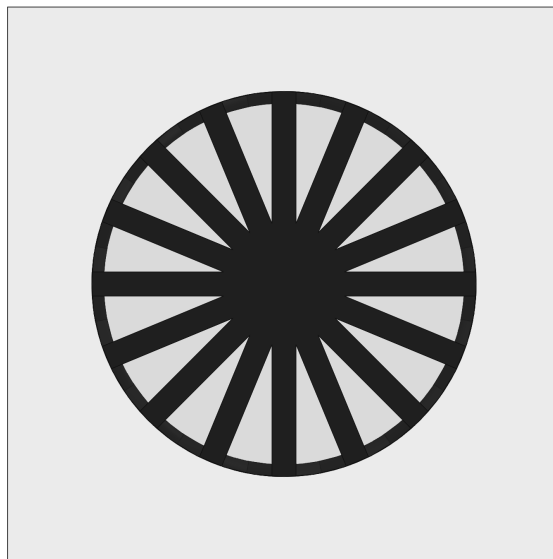


Figura A.8: Vista planta del diseño *Robot Biaxial*

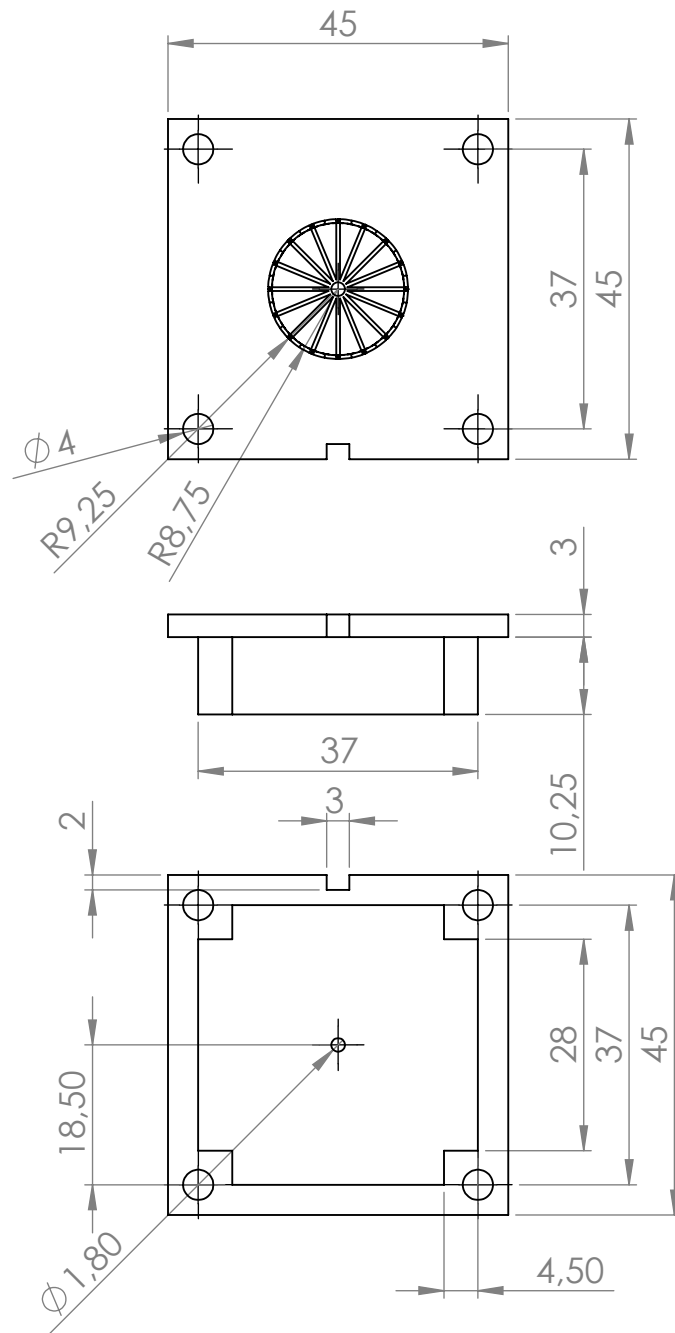


Figura A.9: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Biaxial* parte A

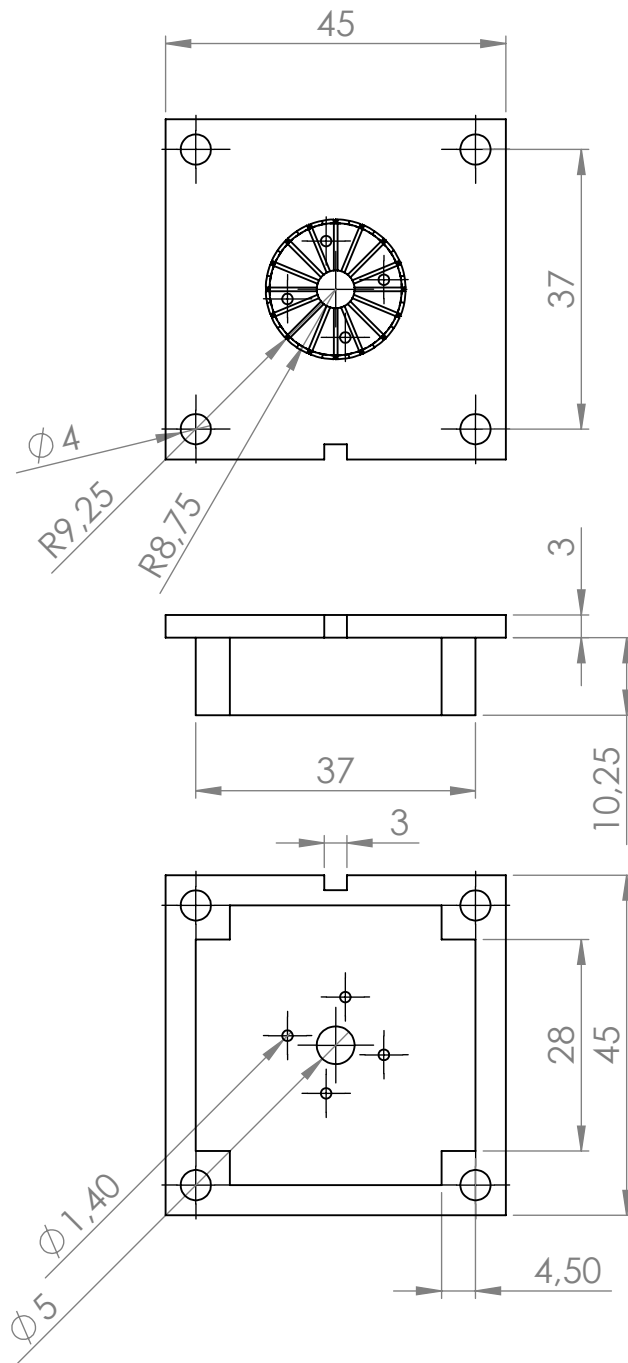


Figura A.10: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Biaxial* parte B

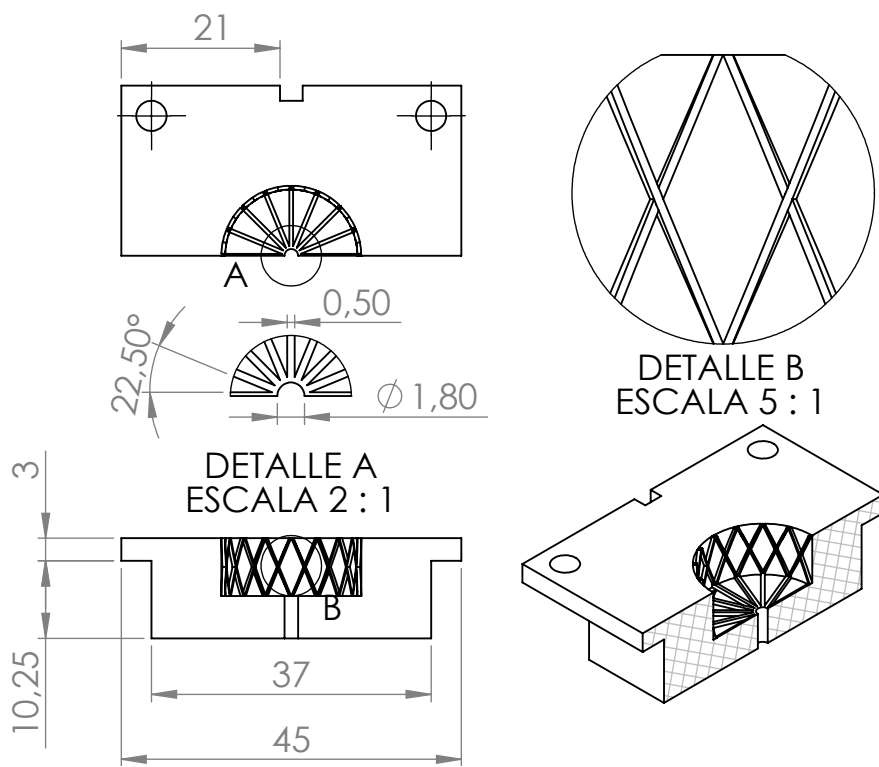


Figura A.11: Vista en corte del molde del *Robot Biaxial* parte A

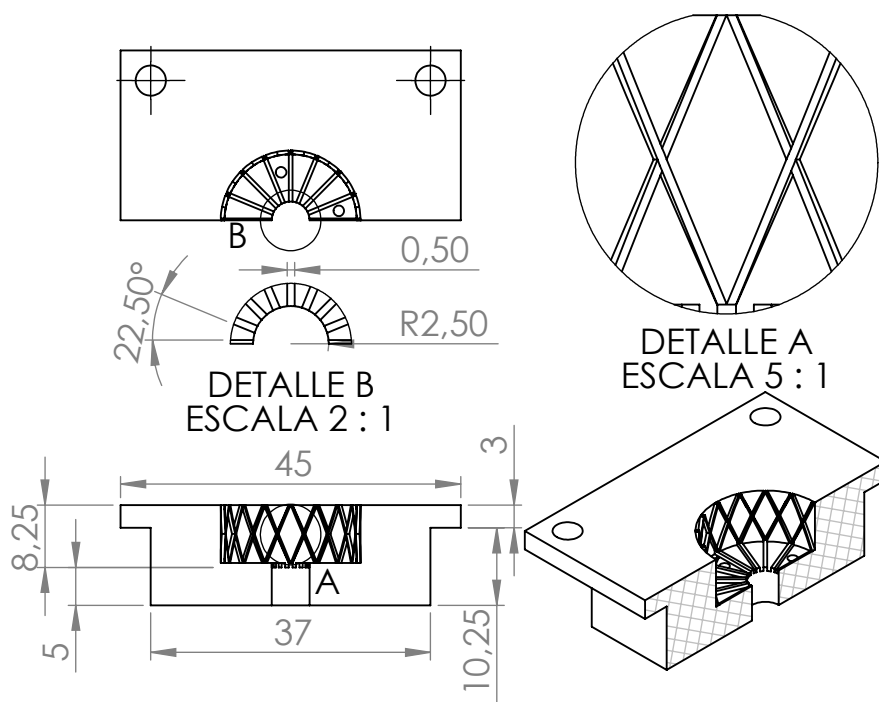


Figura A.12: Vista en corte del molde del *Robot Biaxial* parte B

Robot Shear

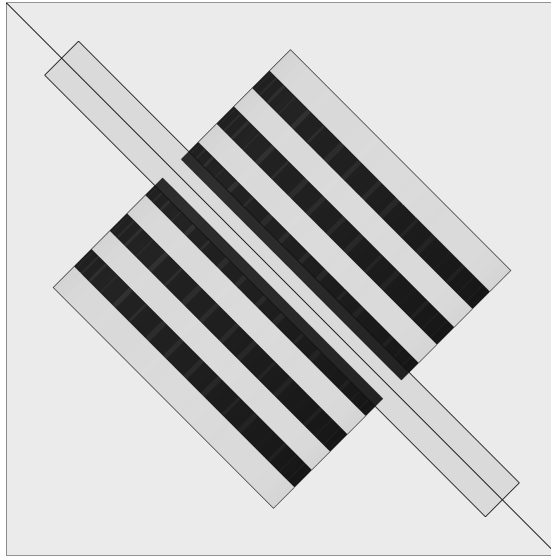


Figura A.13: Vista lateral del *Robot Shear*

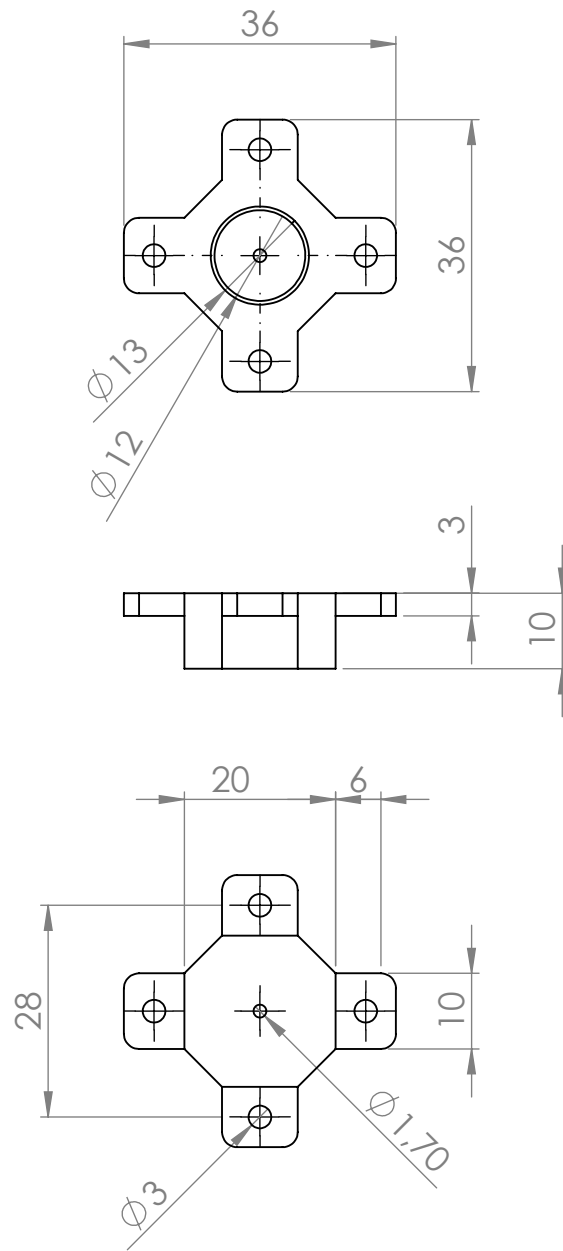


Figura A.14: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Shear* parte A

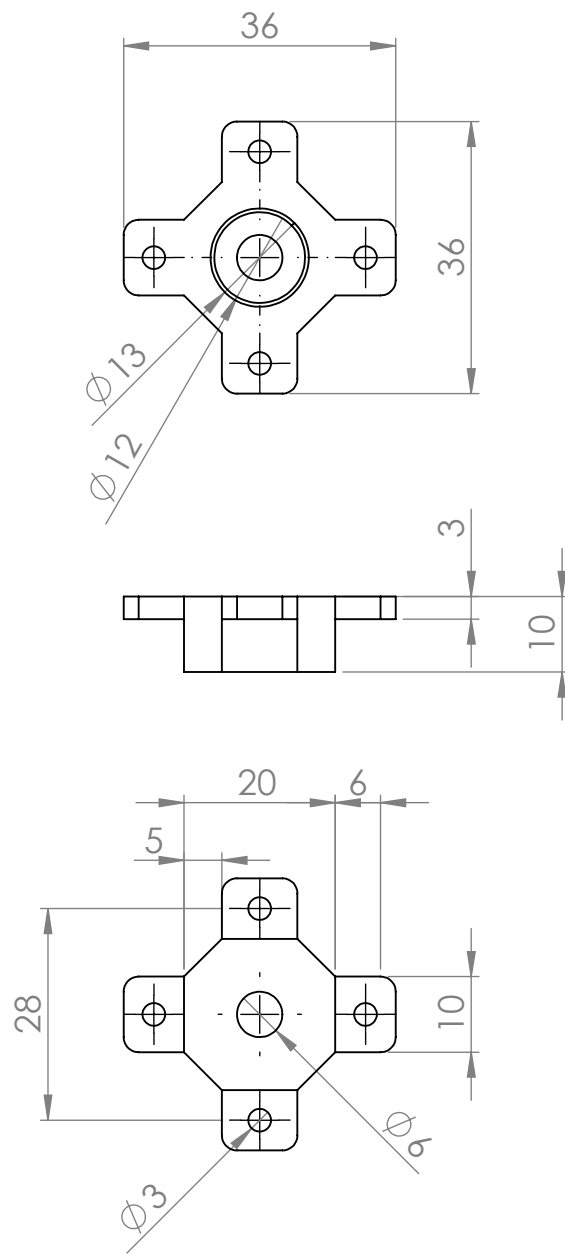


Figura A.15: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Shear* parte B

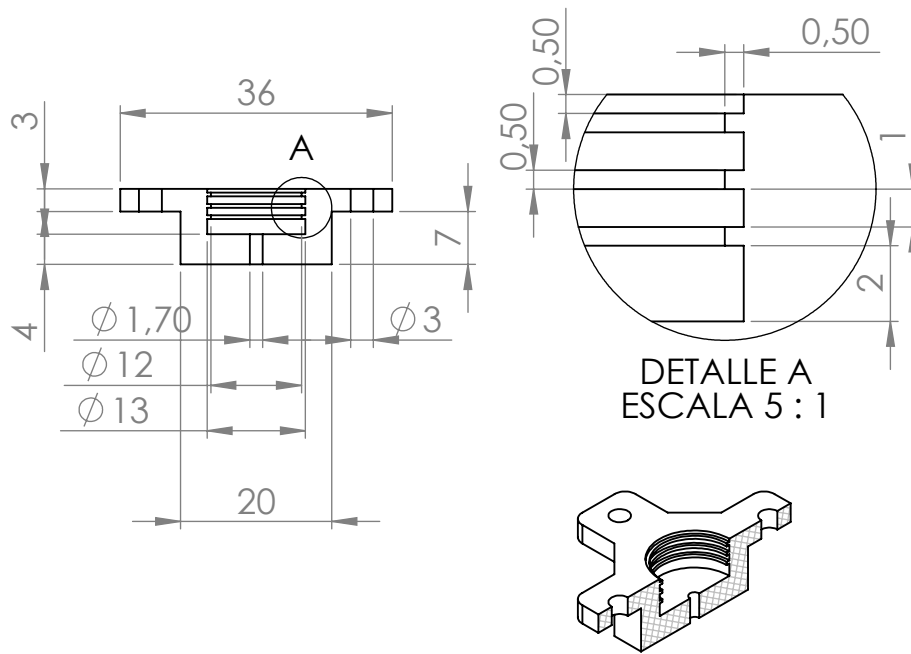


Figura A.16: Vista en corte del molde del *Robot Shear* parte A

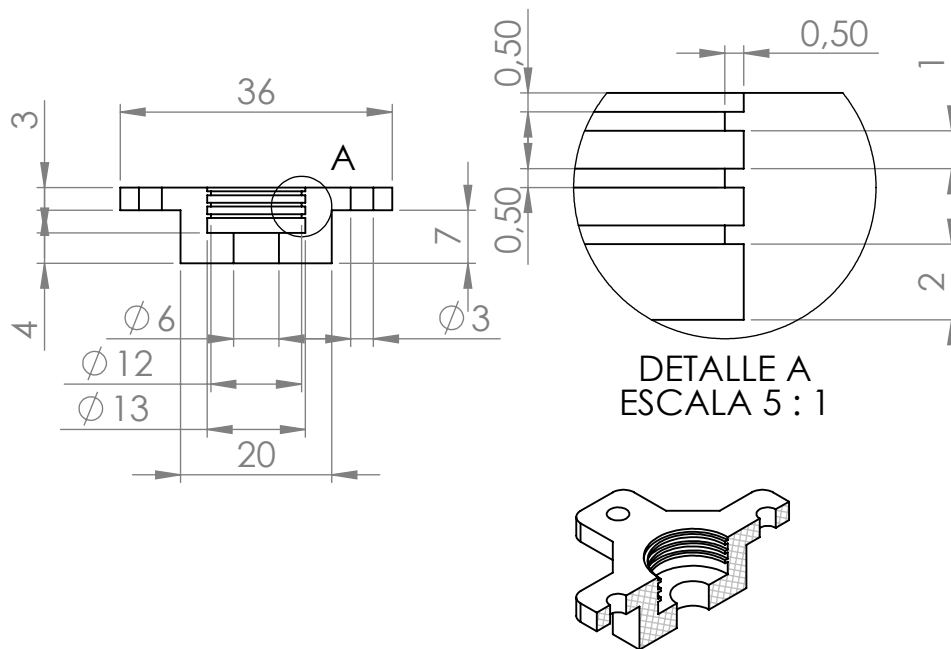


Figura A.17: Vista en corte del molde del *Robot Shear* parte B

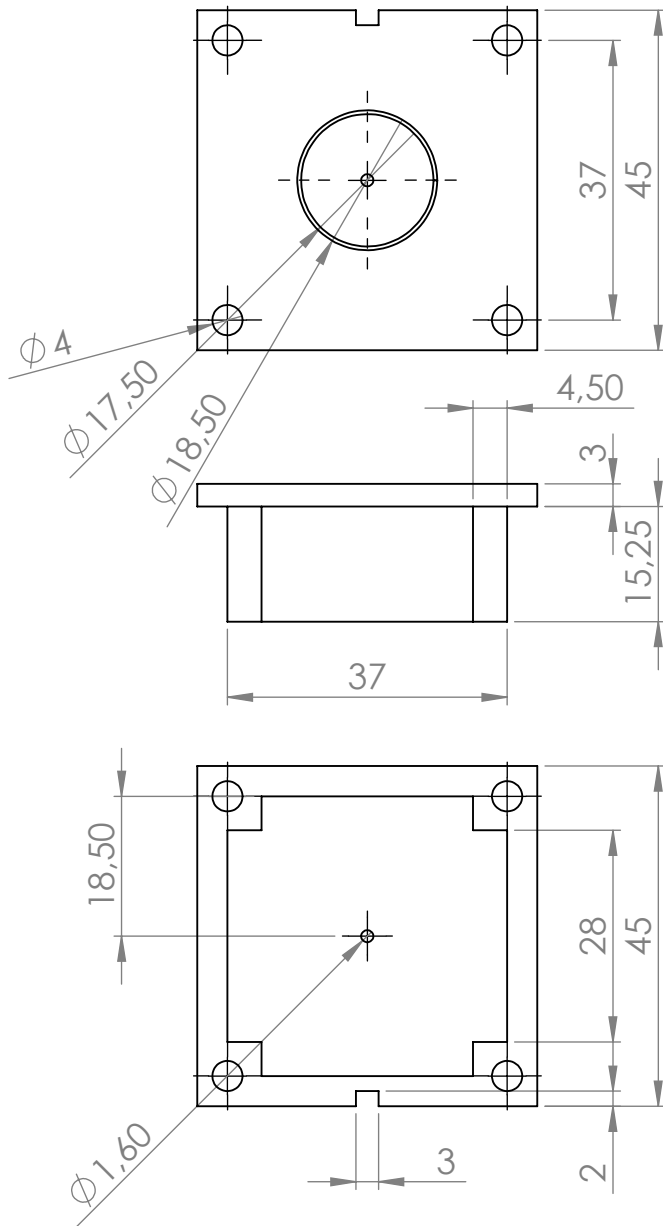


Figura A.19: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Uniaxial* parte A

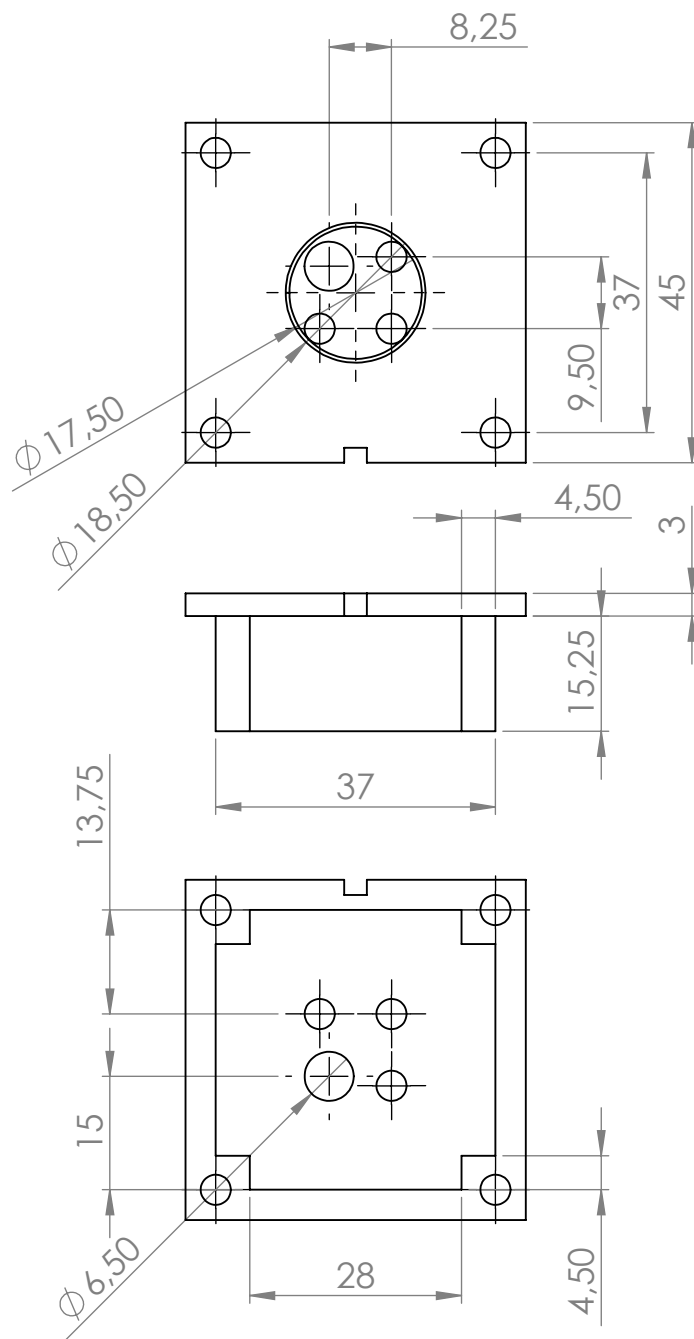


Figura A.20: Diseño del molde para enmallado interno del *Robot Uniaxial* parte B

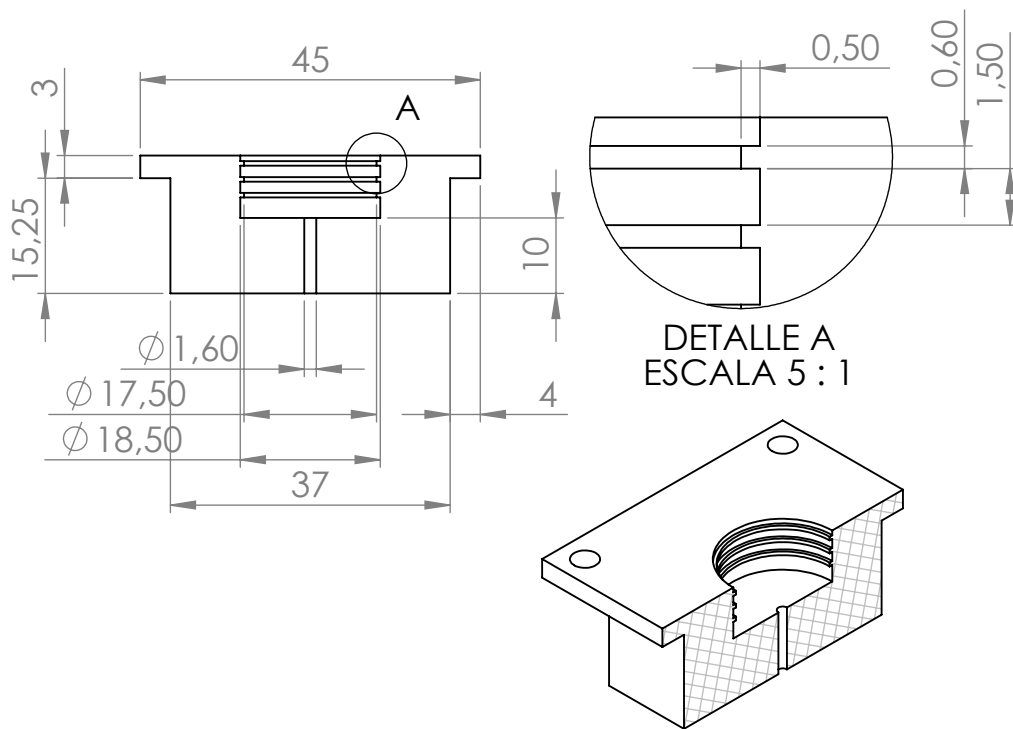


Figura A.21: Vista en corte del molde del *Robot Uniaxial* parte A

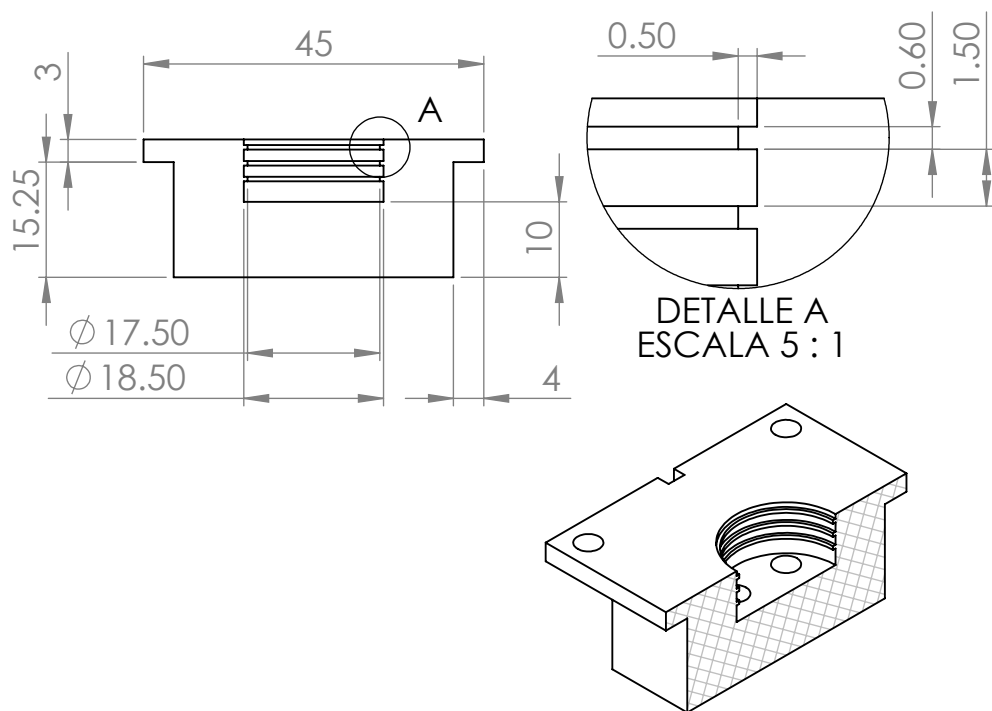


Figura A.22: Vista en corte del molde del *Robot Uniaxial* parte B

Robot Rotator

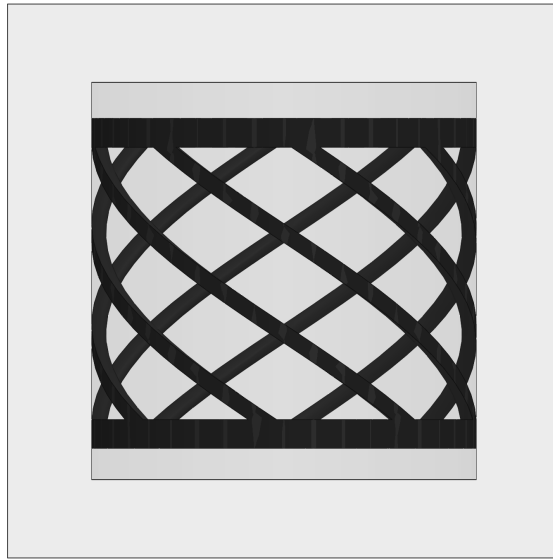


Figura A.23: Vista lateral del diseño *Robot Rotator*

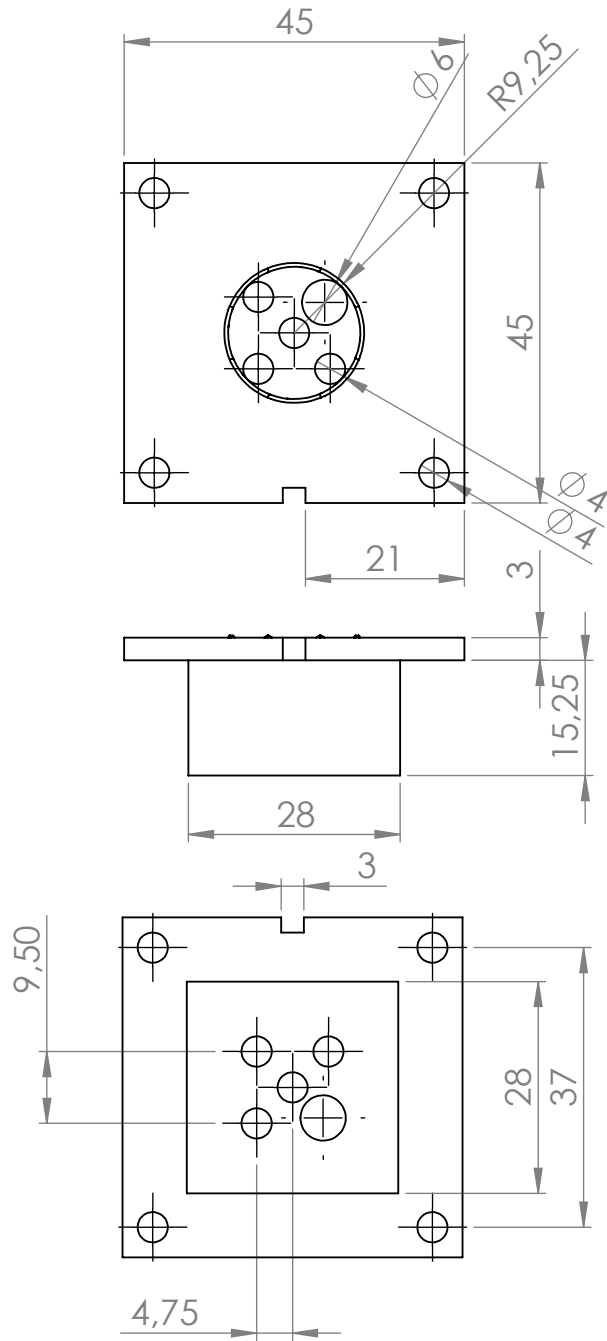


Figura A.25: Diseño del molde para enmallado interno del Robot Rotador parte B

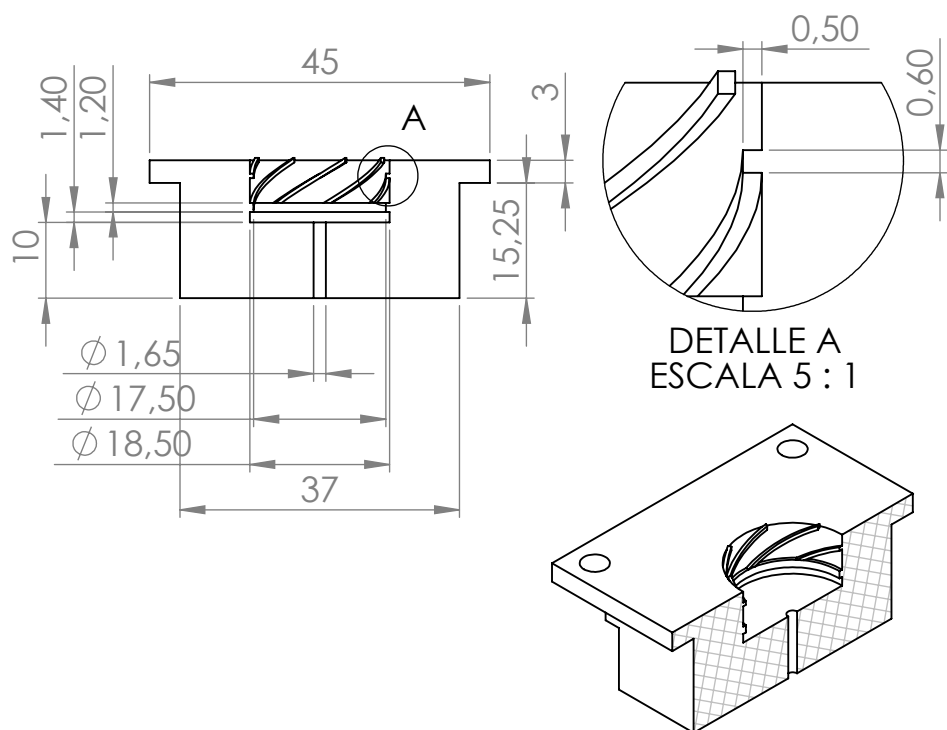


Figura A.26: Vista en corte del molde del *Robot Rotator* parte A

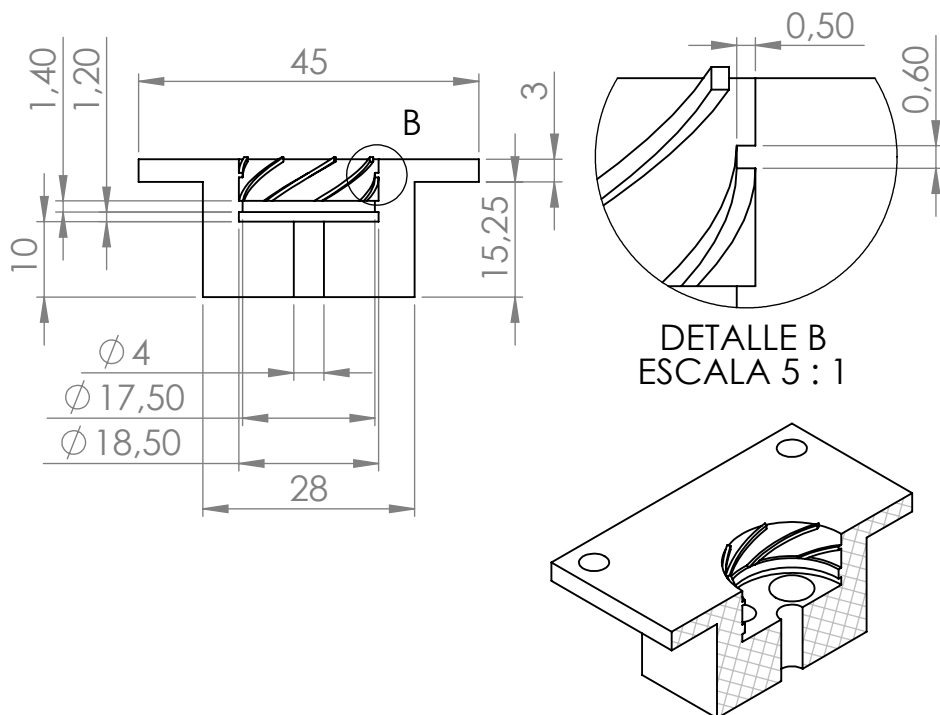


Figura A.27: Vista en corte del molde del *Robot Rotator* parte B

Moldes Cúbicos

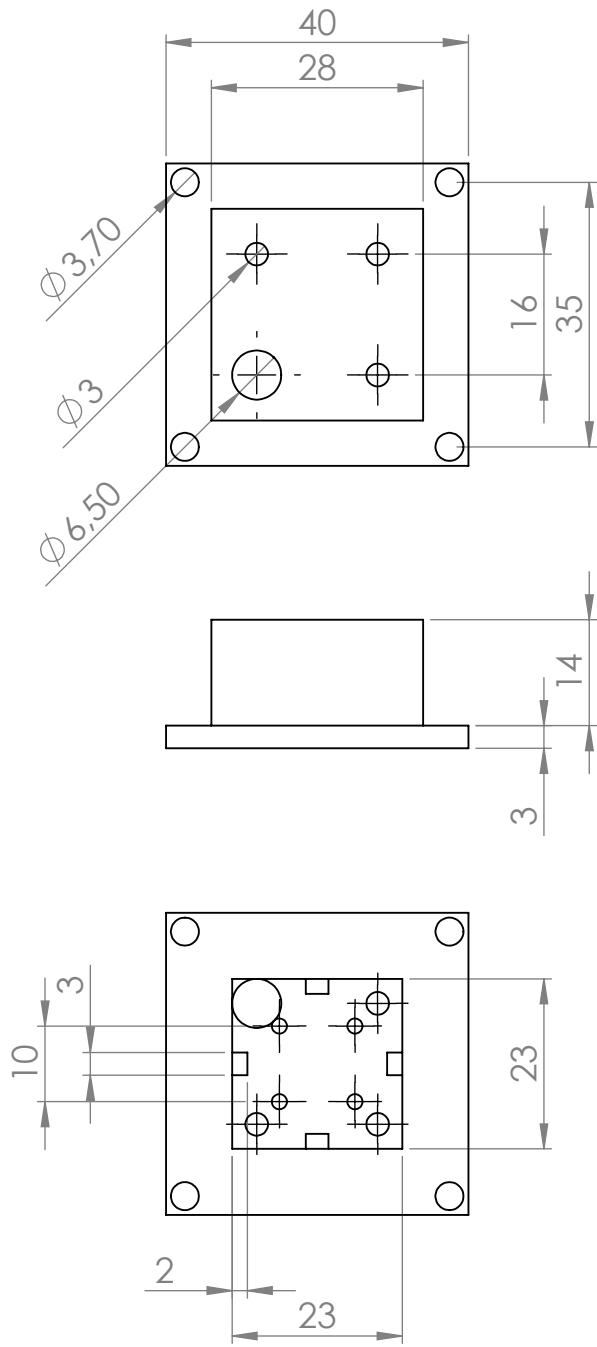


Figura A.28: Diseño del molde A exterior de cada robot

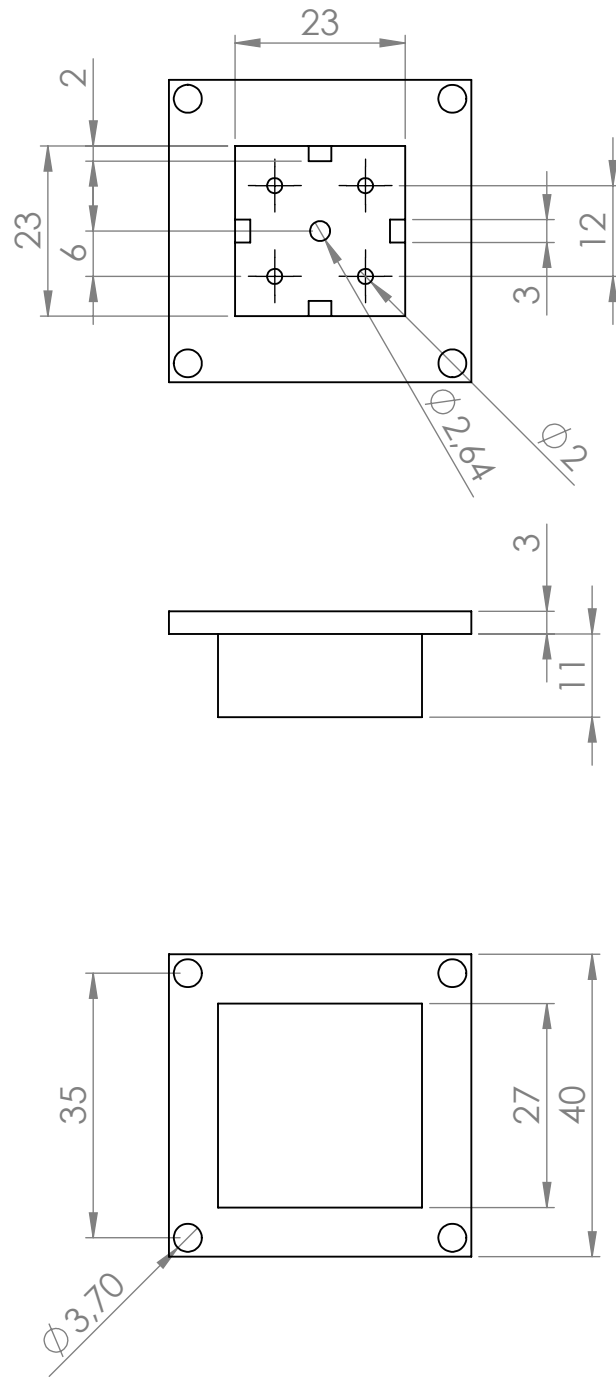


Figura A.29: Diseño del molde B exterior de cada robot

Codigo de Control

Código Arduino

```
int val4 = 4;
int comp4 = 6;
int comp5 = 3;
const int analogInPin = A0;
int signal_opt = 12;
int pwm_min = 5000;
int pwm_max = 12000;
int t_val = pwm_min;
int sensorValue = 0;
const float reference_voltage_mv = 5000.0;
const int Pmax = 100;
const int Pmin = 0;
float voltage_mv = 0.0;
float voltage_v = 0.0;
float output_pressure = 0.0;
float vacuum_pressure = 0.0;
const int ADCFULLSCALE = 1023;
int deltaP = 0;
int mv = 0;
int k = 0;
int j = 0;
float t = 0;
float T = 0;
float SensorPSI;
unsigned long inicio;
boolean nt = false;
boolean Prog = false;
boolean comp = false;
boolean valv = false;
int repeat = 10;

void setup() {
  pinMode(signal_opt, OUTPUT);
  pinMode(comp4, OUTPUT);
  pinMode(comp5, OUTPUT);
  pinMode(val4, OUTPUT);
  digitalWrite(comp4, LOW);
  digitalWrite(comp5, LOW);
  digitalWrite(val4, LOW);

  Serial.begin(9600);
  Serial.println("<Arduino is ready>");
  Serial.print("Sensor_PSI");
  Serial.println("\tTime");
}
```

Figura B.1: Código utilizado en arduino para el control de un robot modular parte A

```

}

void loop() {
  if ((Serial.available() > 0) && (nt == false) && (k == 0)) {
    inicio = millis();
    Prog = true;
    nt = true;
    comp = true;
  }
  if (Prog == true) {
    digitalWrite(signal_opt, HIGH);
    digitalWrite(signal_opt, LOW);
    sensorValue = analogRead(analogInPin);
    voltage_mv = (sensorValue * reference_voltage_mv) / ADCFULLSCALE;
    voltage_v = voltage_mv / 1000;
    deltaP = Pmax - Pmin;
    mv = reference_voltage_mv / 1000;
    output_pressure = (((voltage_v - (0.10*mv)) * (deltaP)) / (0.8*mv)) + Pmin;
    Serial.print(output_pressure);
    Serial.print(",");
    t = millis() - inicio;
    T = t / 1000;
    Serial.println(T);

    if ((j >= 0) && (j < 50) && (comp == true) && (valv == false)) {
      digitalWrite(comp4, HIGH);
      digitalWrite(comp5, HIGH);
    }
    if ((j == 50) && (comp == true) && (valv == false)) {
      digitalWrite(comp4, LOW);
      digitalWrite(comp5, LOW);
      comp = false;
      valv = true;
    }
    if ((comp == false) && (valv == true)) {
      digitalWrite(val4, HIGH);
      delayMicroseconds(t_val);
      digitalWrite(val4, LOW);
      delayMicroseconds(t_val);
      t_val = t_val + 50;
    }
  }
}

```

Figura B.2: Código utilizado en arduino para el control de un robot modular parte B

```

if ((t_val == pwm_max) && (comp == false) && (valv == true)) {
  j = 0;
  t_val = pwm_min;
  valv = false;
  comp = true;
  k++;
}
delay(100);
j++;
}

if ((k == repeat) && (Prog == true)) {
  digitalWrite(comp4, LOW);
  digitalWrite(comp5, LOW);
  digitalWrite(val4, LOW);
  Prog = false;
  nt = false;
  Serial.println("Test Finished");
}
}

```

Figura B.3: Código utilizado en arduino para el control de un robot modular parte C

```

int comp1 = 11;
int comp2 = 10;
int comp3 = 9;
int comp4 = 6;

int val1 = 8;
int val2 = 7;
int val3 = 5;
int val4 = 4;

int signal_opt = 12;
int pwm_min = 2000;
int pwm_max = 9000;
int t_val = 50;

int f = 100;
int k = 0;
int j = 0;
int i = 0;
float t = 0;
float T = 0;
unsigned long inicio;

boolean nt = false;
boolean Prog = false;
boolean comp = false;
boolean valv = false;
boolean pres = false;

int repeat = 10;
char inChar;

```

Figura B.4: Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte A

```

void setup() {
  pinMode(signal_opt, OUTPUT);
  pinMode(comp1, OUTPUT);
  pinMode(comp2, OUTPUT);
  pinMode(comp3, OUTPUT);
  pinMode(comp4, OUTPUT);
  pinMode(val1, OUTPUT);
  pinMode(val2, OUTPUT);
  pinMode(val3, OUTPUT);
  pinMode(val4, OUTPUT);
  pinMode(signal_opt, OUTPUT);

  digitalWrite(signal_opt, LOW);
  digitalWrite(val1, LOW);
  digitalWrite(val2, LOW);
  digitalWrite(val3, LOW);
  digitalWrite(val4, LOW);
  digitalWrite(comp1, LOW);
  digitalWrite(comp2, LOW);
  digitalWrite(comp3, LOW);
  digitalWrite(comp4, LOW);

  Serial.begin(9600);
  Serial.println("<Arduino is ready>");
  Serial.print("Sensor_PSI");
  Serial.println("\tTime");
}

void loop() {
  if ((Serial.available() > 0) && (Prog == false) && (k == 0)) {
    inicio = millis();
    Prog = true;
    nt = true;
    comp = true;
    valv = false;
    pres = false;
  }
  if ((Prog == true)) {
    digitalWrite(signal_opt, HIGH);
    digitalWrite(signal_opt, LOW);
    t = millis() - inicio;
    T = t / 1000;
  }
}

```

Figura B.5: Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte B

```

Serial.println(T);

if ((j >= 0) && (j < f) && (comp == true) && (valv == false) && (pres == false)) {
    digitalWrite(comp2, HIGH);
    digitalWrite(comp1, HIGH);
}
if ((j == f) && (comp == true) && (valv == false) && (pres == false)) {
    digitalWrite(comp2, LOW);
    digitalWrite(comp1, LOW);
    comp = false;
    valv = false;
    pres = true;
    i = 0;
}
if ((i >= 0) && (i < f) && (comp == false) && (valv == false) && (pres == true)) {
    digitalWrite(comp3, HIGH);
    digitalWrite(comp4, HIGH);
}
if ((i == f) && (comp == false) && (valv == false) && (pres == true)) {
    digitalWrite(comp3, LOW);
    digitalWrite(comp4, LOW);
    comp = false;
    valv = true;
    pres = true;
}
if ((comp == false) && (valv == true) && (pres == true)) {
    digitalWrite(val2, HIGH);
    delayMicroseconds(t_val);
    digitalWrite(val2, LOW);
    delayMicroseconds(t_val);
    t_val = t_val + 50;
}
if ((t_val == pwm_max) && (comp == false) && (valv == true) && (pres == true)) {
    t_val = pwm_min;
    valv = true;
    comp = false;
    pres = false;
}
if ((comp == false) && (valv == true) && (pres == false)) {
    digitalWrite(val3, HIGH);
    delayMicroseconds(t_val);
    digitalWrite(val3, LOW);
    delayMicroseconds(t_val);
}

```

Figura B.6: Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte C


```

    t_val = t_val + 50;
}
if ((t_val == pwm_max) && (comp == false) && (valv == true) && (pres == false)) {
    j = 0;
    i = 0;
    t_val = pwm_min;
    valv = false;
    comp = true;
    pres = false;
    k++;
}
delay(100);
j++;
i++;
}

if ((k == repeat) && (Prog == true)) {
    digitalWrite(comp1, LOW);
    digitalWrite(comp2, LOW);
    digitalWrite(comp3, LOW);
    digitalWrite(comp4, LOW);
    digitalWrite(val2, LOW);
    digitalWrite(val3, LOW);
    Prog = false;
    valv = false;
    comp = false;
    pres = false;
    nt = false;
    Serial.println("Test Finished");
}
}

```

Figura B.7: Código utilizado en arduino para el control de la plataforma parte D