



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

**METAMATERIALES CONSTRUIDOS EMPLEANDO ROBOTS MODULARES
BLANDOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DIEGO MARTÍN LANDABUR MELLA

PROFESOR GUÍA:
JUAN CRISTÓBAL ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
BRUNO GROSSI CÓRDOVA
RUBÉN FERNANDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: **DIEGO MARTÍN LANDABUR MELLA**
FECHA: 2020
PROF. GUÍA: JUAN CRISTÓBAL ZAGAL

METAMATERIALES CONSTRUIDOS EMPLEANDO ROBOTS MODULARES BLANDOS

Los metamateriales corresponden a uno de los últimos desarrollos en lo que a materiales respecta, como lo indica su nombre, estos son algo más allá que los materiales en sí, generando un nuevo espectro de desarrollo e innovación. Sus llamativas cualidades se deben a que los metamateriales están contruidos en base a estructuras únicas y específicas, que otorgan al material completo propiedades distintas a las que tienen sus elementos constituyentes, por lo cual, tienen comportamientos mecánicos e incluso magnéticos, poco intuitivos o naturales.

Durante este trabajo de título el estudio se centró en los metamateriales mecánicos blandos, y en una característica de estos en específico: La capacidad de construir estructuras auxéticas con ellos, es decir, estructura con coeficiente de Poisson negativo. Un metamaterial mecánico blando posee características mecánicas las cuales difieren de sus constituyentes, siendo estos “blandos”, es decir, que está construido de algún elastómero que le permita doblarse sin fallar. Por otro lado, para conseguir la auxeticidad del material, es necesario que la estructura de este siga un patrón determinado.

El objetivo de este trabajo de título es la construcción y evaluación de un metamaterial blando auxético capaz de, en tiempo real, variar su grado de auxeticidad y, por ende, su respuesta al ser sometido a esfuerzos de compresión. Para lograr este cambio en la auxeticidad, se buscó hacer uso de robots modulares blandos, capaces de expandirse y alterar la estructura del metamaterial, esto controlado por medio de actuadores neumáticos.

Para la construcción de este metamaterial, se selecciona el patrón formulado por Blumine Robert y Jules Gautier en su reporte “3D Soft Metamaterial With Auxetic Behaviour”[5]. Primero, se realizó una simulación en Abaqus para corroborar el comportamiento auxético del patrón seleccionado, luego se procedió a la fabricación de la pieza auxetica por medio de impresión 3D. Se crearon 4 moldes distintos para la manufactura de las 9 piezas que componen una unidad mínima del metamaterial, y a su vez, se fabricaron 3 estructuras auxeticas ligeramente distintas.

Finalmente, se fabricaron los actuadores neumáticos para la estructura, una vez entregados estos en ella, se realizaron los ensayos de esfuerzo compresión para distintas configuraciones creadas.

*A todos quienes por medio de su amistad y cariño, me acompañaron a sacar la vuelta,
prolongando así, la duración de este trabajo de título.*

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a las personas más importantes de mi vida: mi madre y mi abuela, quienes desde siempre me han dado su amor y cariño incondicional, y a ellas les debo todo lo que soy hoy. Gracias por todo lo que han hecho por mí: criarme, educarme, cuidarme y todas aquellas otras pequeñas y grandes cosas que no soy capaz de ver. Gracias por todo el apoyo y aguante estos últimos 6 años, acompañándome las largas noches de estudio y soportando aquellas pocas noches de juerga.

También quiero agradecer al resto de mi familia, mis tíos y primos, quienes en cada junta y evento familiar comparten su cariño, ya sea en forma de un abrazo, una rica comida, un consejo o incluso una conversación polémica. Quiero agradecer en especial a mi primo Claudio, quien me enseñó a creer en mí y me salvó en cada trabajo que dejé para última hora.

No puedo pasar por alto a mis amigos de toda la vida: Emanuel, Boro, Lucas, Marco y Camila, son una segunda familia para mí. Hemos estado juntos en las buenas y en las malas, en festividades, clases, marchas, rupturas, vacaciones, etc... agradezco cada momento que hemos pasado juntos, gracias por tanto. Hablando de gente que conozco desde el colegio quiero aprovechar de agradecer al profe Héctor, al profe Richi y al profe Pedro, solo Dios sabe qué hubiera sido de mí sin todos los traumas de niñez que me causaron.

Llegando a una época más contemporánea, voy a agradecer a quienes tuve el gusto de conocer durante estos 6 años de Universidad, comenzando con el auto denominado "Pelotón Vikingo", un grupo que alcanzó el balance perfecto entre salvar ramos, procrastinar y comer pizza, los quiero demasiado muchachos: Viki, Cristián, Sasi, Jota, Oveja, Nico, Benja, Carlos, Mati Flores, Mati Valdivia, Camilo, Jordo, Nano, Erick, Javier, Marco, Charlie, Alexis y Edrian; gracias por las infinitas horas de diversión y las anécdotas de biblioteca. Una vez entré a mecánica tuve la suerte de encontrar otro grupo de gente maravillosa, y creo que sin todos ellos y su apoyo no hubiera podido terminar la carrera, gracias por todos lo vivido mi "Gente bonita del 4to": Corrales, Tiare, Nicolás, Eduardo, Kati, Dani, Cony, Mauri, Suelto, Cata, Nicole, Seba, Tolueno y Francis. Finalmente, quiero agradecer a aquellas personas a las que no puedo asociar a ningún grupo pero que no quita el cariño, los buenos momentos y la ayuda brindada: Cony Urbina, Steffi, Cami Roman, Meickel, Mardini, Mauri, Susana Carrasco, Maria Eugenia, Maricarmen y todo el personal administrativo y técnico de mecánica.

Bueno, en conclusión y en caso de que se me pase alguien: Gracias, a todo quien que tuvo para conmigo un gesto amable en estos 6 años, ya que son estos gestos, estas interacciones, las que hicieron que todo fuera mas a menos y que finalmente valiera la pena.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Metamateriales Auxéticos Blandos	3
2.1.1. Cualidades y Ventajas	3
2.1.2. Diseño del Patrón	5
2.2. Robots Modulares Blandos	7
3. Validación de herramientas	9
4. Metodología	12
4.1. Diseño: Estructura	12
4.2. Fabricación: Estructura	14
4.3. Diseño: Actuadores	17
4.4. Fabricación: Actuadores	18
4.5. Ensayo	18
5. Resultados y análisis	21
5.1. Análisis Computacional	21
5.2. Diseño y Fabricación	22
5.3. Ensayo de Compresión	27
6. Conclusiones	36
Bibliografía	37

Índice de Tablas

4.1. Datos usados en la simulación	13
--	----

Índice de Ilustraciones

2.1.	Estrés y Módulo de Young para distintas estructuras	4
2.2.	Cambio en los coeficientes de Poisson según deformación	4
2.3.	Ejemplos de porosidades	6
2.4.	Comparación de resultados experimentales con análisis numérico	6
2.5.	Efecto de la porosidad sobre las propiedades mecánicas	7
2.6.	Respuesta volumétrica de los Robots blandos	8
3.1.	Validación: Esfuerzos de Compresión	9
3.2.	Validación: Deformación	10
4.1.	Metamateriales Blandos Auxeticos Propuestos	12
4.2.	Posiciones actuadores neumáticos	13
4.3.	Vistas moldes	15
4.4.	Ensamble Set 1	15
4.5.	Molde 1 ensamblado	16
4.6.	Ejemplo borde irregular estructura 2	17
4.7.	Diseño actuador neumático	17
4.8.	Sistema neumático	18
4.9.	Montaje de los actuadores en la estructura 2	19
4.10.	Montaje de los actuadores en la estructura 3	20
5.1.	Resultados Simulación explícita	21
5.2.	Primeros 2 modos de deformación	22
5.3.	Piezas de los moldes para las estructuras	22
5.4.	Piezas de silicona con excesos	23
5.5.	Piezas de silicona sin excesos	23
5.6.	Estructura 1	23
5.7.	Estructura 2	24
5.8.	Estructura 3	24
5.9.	Moldes actuador neumático	25
5.10.	Piezas del actuador neumático	26
5.11.	Medición de control: Estructura 1 deformación	27
5.12.	Medición de control: Estructura 1 gráfico	27
5.13.	Medición de control: Estructura 2 deformación	28
5.14.	Medición de control: Estructura 2 deformación lateral	28
5.15.	Medición de control: Estructura 2 gráfico	28
5.16.	Medición de control: Estructura 3 deformación	29
5.17.	Medición de control: Estructura 3 deformación lateral	29
5.18.	Medición de control: Estructura 3 gráfico	30
5.19.	Medición a 0 bar: Estructura 2 deformación	30

5.20.	Medición a 0 bar: Estructura 2 gráfico	31
5.21.	Medición a 0 bar: Estructura 3 deformación	31
5.22.	Medición a 0 bar: Estructura 3 gráfico	32
5.23.	Medición actuadores 300 mbar: Estructura 2 deformación	33
5.24.	Medición actuadores 300 mbar: Estructura 2 deformación lateral	33
5.25.	Medición actuadores 300 mbar: Estructura 2 gráfico	33
5.26.	Comparación estructura 2	34
5.27.	Coefficiente de Poisson 0 y 300 bar	34

Capítulo 1

Introducción

Los metamateriales han generado un gran interés en el ámbito científico los últimos años, esto debido tanto a sus cualidades y comportamientos únicos, como la distinta gama de aplicaciones posibles de estos mismos, abarcando desde usos estructurales hasta médicos. Dentro de los distintos tipos de metamateriales, el estudio se centrará en los metamateriales auxéticos blandos, es decir, aquellos construidos en base a materiales flexibles (Usualmente silicona) y cuyo diseño estructural periódico otorga a la estructura completa su auxeticidad, lo que significa que poseen un coeficiente de Poisson negativo ante determinados esfuerzos.

El diseño del patrón de la estructura interna de los metamateriales determina el cómo y en cuánto se deforman ante distintos esfuerzos aplicados. Así, existe una gran variabilidad en lo que a metamateriales respecta, distintos patrones y combinaciones de estos pueden generar una infinidad de resultados.

Otro concepto importante a destacar, son los robots modulares blandos. Robots de tamaño reducido construidos en base a silicona, los cuales son capaces de realizar distintas deformaciones mecánicas accionadas de forma remota (neumática o hidráulicamente por ejemplo). Estos robots poseen la capacidad de realizar movimientos más complejos, como re-configurar su propia estructura o imitar movimientos celulares, demostrando que solo se necesita de una óptima configuración y coordinación de un movimiento de inflación/deflación para llevarlos a cabo. Algunos ejemplos de esto se pueden apreciar en los trabajos de Rus D. y Onal C. D. [2] y Lau Y. S. et al. [8].

Debido a que el patrón de la estructura de los metamateriales es quien determina sus comportamientos frente a los esfuerzos, es natural pensar que de poder controlarse este patrón, sería posible la creación de un material capaz de variar sus características físicas según sea necesario y sin la necesidad una intervención externa. Siguiendo este afán, es que la incorporación de los robots modulares blandos a la matriz estructural del metamaterial se vuelve razonable, puesto que estos permitirían, al deformarse, variar el patrón del metamaterial, modificando consigo el comportamiento de este.

Para el desarrollo de esta estructura de metamaterial con robots blandos integrados, es necesario definir algunos aspectos. Primero, se debe definir el patrón estructural del metamaterial, y verificar que este otorgue el comportamiento auxético. Para esto último, se hace uso de las herramientas computacionales de simulación por elementos finitos. A posteriori, se debe definir el método de construcción. Debido a la compleja geometría de las estructuras

auxéticas, la forma más práctica de construcción es la fabricación de moldes por impresión 3D que permitan obtener las geometrías buscadas en silicona.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de título es el diseño y manufactura de celdas unitarias (Unidades mínimas de un patrón), capaces de experimentar cambios geométricos producidos en forma intencional al variar el nivel de inflado interno. Logrando de esta manera controlar el comportamiento global del metamaterial.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir la forma óptima para integrar los robots modulares blandos a la matriz del metamaterial.
- Diseñar un módulo (Celda unitaria) que tenga propiedades auxéticas capaces de variar su grado de auxeticidad mediante un actuador.
- Modelar el comportamiento mediante el uso de herramientas de simulación.
- Fabricar los sistemas modulares auxéticos e integrar los robots modulares de forma funcional.
- Caracterizar el desempeño de los sistemas en el plano esfuerzo-deformación.
- Demostrar la capacidad de modular el grado de auxeticidad en tiempo real.

1.2. Alcances

Los alcances de este trabajo de título abarcan el diseño del patrón y su evaluación, tanto de manera computacional como de forma experimental, así también la construcción de una celda unitaria de dicho metamaterial, capaz de variar su grado de auxeticidad en tiempo real. Esto implica a su vez, la construcción de moldes para la fabricación de la estructura, como la adaptación de los diseños existentes de robots blandos para ajustarlos a la estructura diseñada y la fabricación de los elementos para su construcción.

Capítulo 2

Antecedentes

Para llevar a cabo este trabajo de título se realizó un estudio de los métodos de fabricación de los dos componentes principales, siendo estos los metamateriales blandos y los robots modulares blandos. Además, se investigaron trabajos relacionados al efecto del diseño del patrón del metamaterial, sobre el comportamiento de este y sus características físicas.

2.1. Metamateriales Auxéticos Blandos

Los metamateriales auxéticos blandos corresponden a estructuras construidas en base un material blando (Usualmente silicona o un parecido), el cual sigue un patrón de construcción regular, diseñado específicamente para que, ante la presencia de diversos esfuerzos o estímulos, se genere un determinado cambio en la estructura del metamaterial, teniendo como resultado deformaciones con un coeficiente de Poisson negativo.[6]

2.1.1. Cualidades y Ventajas

En la publicación de Chen Y. et al. [1] se desarrolla una comparación entre 4 enmallados distintos, construidos por medio de manufactura aditiva, los cuales comprenden 2 estructuras auxéticas (En distintos grados) y 2 estructuras no auxéticas las cuales funcionan como punto de referencia. A estas estructuras se les realizan tanto pruebas experimentales como análisis de elementos finitos para determinar su comportamiento frente a la compresión. Los resultados obtenidos se pueden observar en los gráficos de las Figuras 2.1 y 2.2.

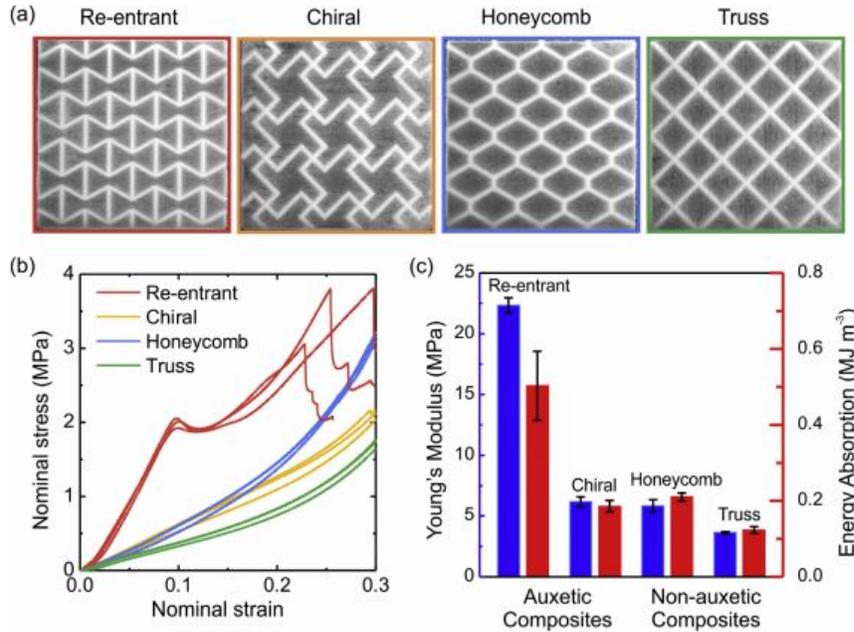


Figura 2.1: Respuesta mecánica de las diversas estructuras ante una prueba uniaxial de compresión. (a) Estructuras de prueba construidas por medio de manufactura aditiva (b) Curvas de esfuerzo y tensión nominal para los distintos diseños. Por cada diseño se realizaron tres pruebas para asegurar los resultados. (c) Módulo de Young y energía absorbida para cada diseño.

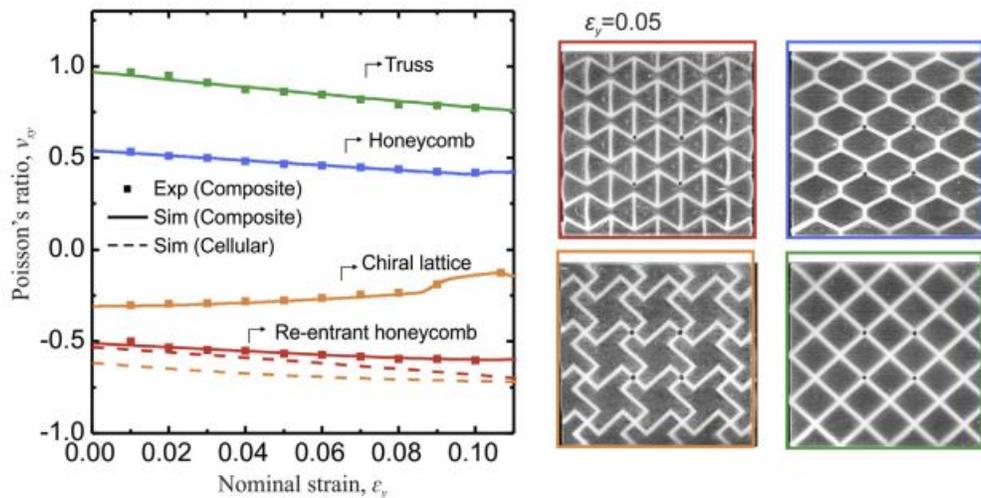


Figura 2.2: Resultados experimentales y numéricos de los coeficientes de Poisson de las estructuras bajo una prueba de compresión uniaxial.

Los resultados obtenidos dejan en claro que los metamateriales auxéticos demuestran tener propiedades mecánicas superiores, como una mayor resistencia al impacto y una mayor resistencia a la deformación, incluso bajo las mismas condiciones de elaboración y usando los mismos materiales que estructuras similares pero no auxéticas.

2.1.2. Diseño del Patrón

El patrón de porosidades de la estructura del metamaterial define tanto el nivel de deformación que este sufre frente a esfuerzos, como la naturaleza de esta misma. Debido a la importancia de la forma y tamaño de las porosidades en los metamateriales es que estos son el elemento mediante el cual los definimos y distinguimos unos de otros, por lo cual, se hace necesario una modo de estandarizar sus medidas y formas. En el artículo Shan S. et Al. [6], los autores definen una serie de parámetros para caracterizar poros con simetría en los ejes X e Y (centrados en el poro), normalizando así las dimensiones y las formas de estos. El contorno de las porosidades del metamaterial son definidos de la siguiente forma:

$$x_1 = r\theta\cos(\theta) \quad (2.1)$$

$$x_2 = r\theta\sin(\theta) \quad (2.2)$$

$$r(\theta) = r_0[1 + c_1\cos(4\theta) + c_2\cos(8\theta)] \quad (2.3)$$

Donde

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

El parámetro r_0 controla el tamaño del poro y los parámetros c_1 y c_2 la forma de este. El tamaño de los poros (r_0), la distancia entre ellos (L_0) y la porosidad del metamaterial (ϕ) se relacionan de la siguiente forma:

$$r_0 = \frac{L_0\sqrt{2\phi}}{\sqrt{\pi(2 + c_1^2 + c_2^2)}} \quad (2.4)$$

Debemos notar que para mantener la integridad de la estructura del poro, c_1 y c_2 deben ser seleccionados con tal de cumplir que:

$$0 \leq x_1 \leq 0.5L_0$$

$$0 \leq x_2 \leq 0.5L_0$$

Usando las formulas 2.1, 2.2 y 2.3 se puede definir una amplia gama de patrones de porosidades, debido a esto, es que este es el modelo de diseño seleccionado para el presente trabajo de título. En la figura 2.3 vemos distintas porosidades logradas con este método.

Las configuraciones de porosidades utilizadas en la publicación (Imágenes de la derecha de la figura 2.3) son evaluadas tanto experimental como analíticamente para esfuerzos de compresión uniaxiales. De los resultados obtenidos (figura 2.4), queda demostrado que los resultados experimentales se comportan según lo previsto por el modelo numérico, por lo cual es posible realizar una optimización de la configuración de porosidades, mediante análisis numéricos sin tener mayores dudas de la eficacia de este.

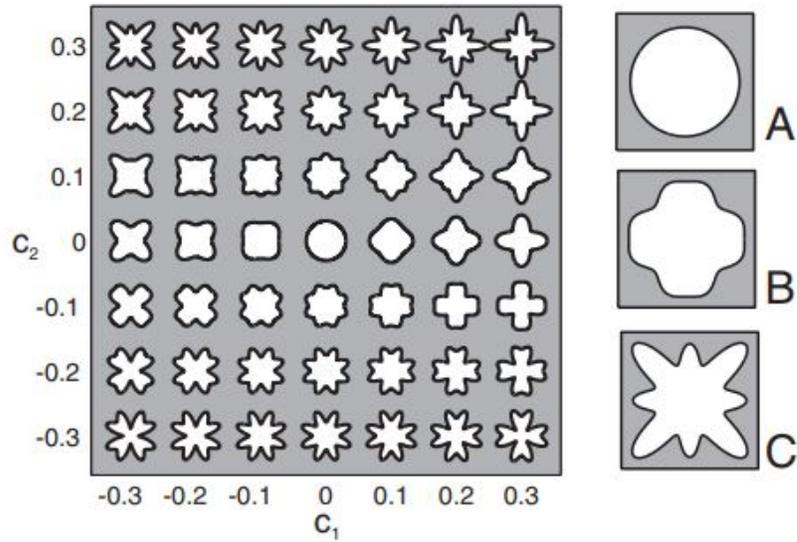


Figura 2.3: Izquierda: Formas obtenidas usando las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3, con c_1 y c_2 variando en $-0.3:0.1:0.3$, manteniendo r_0 constante. Derecha: Porosidades utilizadas en la publicación [6], éstas están definidas por: $(\phi^A, c_1^A, c_2^A) = (0.46, 0, 0)$; $(\phi^B, c_1^B, c_2^B) = (0.47, 0.11, -0.05)$; $(\phi^C, c_1^C, c_2^C) = (0.44, -0.21, 0.28)$.

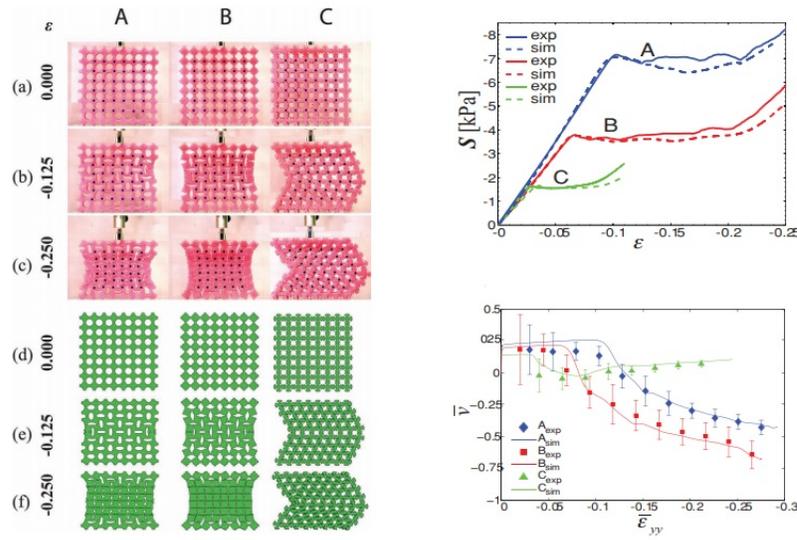


Figura 2.4: Izquierda: Pruebas experimentales (Arriba) y numéricas (abajo) de las estructuras según porosidades A, B y C, para distintos niveles de deformación. Derecha: Comparación de curvas de esfuerzo (arriba) para caso experimental (línea continua) y para simulaciones (líneas punteadas), y variación del coeficiente de Poisson para las 3 estructuras (abajo)

Uno de los resultados más útiles y llamativos de esta publicación [6] corresponde al efecto de las porosidades sobre el comportamiento global de la estructura (Figura 2.5), puesto que, el generar cambios en las propiedades mecánicas del metamaterial es el objetivo de integrar

los robots modulares en la matriz.

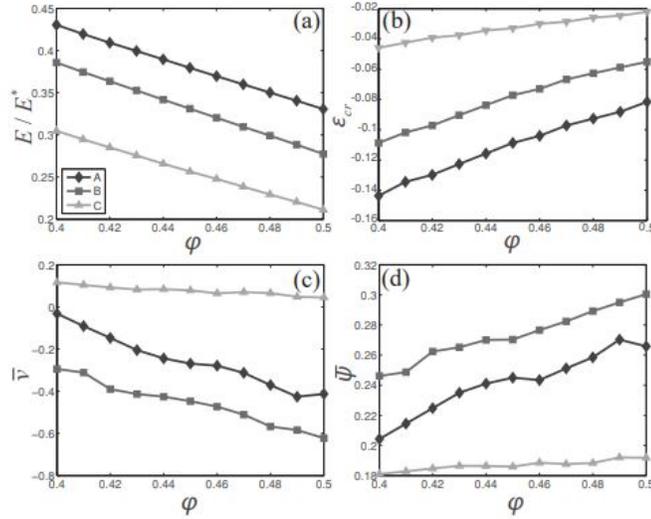


Figura 2.5: Resultados del efecto de la porosidad ϕ sobre las 3 estructuras. (a) Modulo Efectivo E/E^* . (b) Esfuerzo critico ϵ_{cr} . (c) Coeficiente de Poisson para un esfuerzo de $\epsilon_{yy} = 0.2$. (d) Deformación ψ para un esfuerzo de $\epsilon_{yy} = 0.2$.

Según lo demostrado en la publicación de Li S. y Sengupta S. [3], al variar de forma estratégica la posición o la forma de determinadas unidades en un arreglo, es posible controlar, en un amplio espectro, el grado de efectividad total de este, o en este caso, el comportamiento auxético total de la estructura. Por lo tanto, al momento de diseñar y seleccionar los patrones de las porosidades es necesario tener en cuenta el rango de deformación de estas mismas, así como la capacidad para controlar el grado de auxeticidad que tiene el deformar solo una parte de las porosidades.[7] [4]

2.2. Robots Modulares Blandos

De acuerdo a lo visto en [2] la mayor ventaja de los robots blandos corresponde a su adaptabilidad (además del poco riesgo que implica su manejo). La base de su funcionamiento corresponde a unidades modulares operadas por presión (hidráulica o neumática), capaces de deformarse al ser presurizados y luego volver a su forma original. A pesar de lo simple de su diseño y fabricación, un conjunto de estos robots modulares, apropiadamente ordenados, puede lograr una amplia gama de movimientos complejos y funciones sin la necesidad de ser intervenidos. Un ejemplo de esto es lo visto en el artículo Lau Y. et al. [8], donde se explica la construcción de un determinado tipo de robot modular, y la capacidad de estos para replicar los movimientos celulares ocurridos durante la morfogénesis.

Basándonos en este último artículo [2], es que se desarrollaran los robots blandos de este trabajo de título, por lo cual, se deberá tener en cuenta, al momento de diseñar, las características del comportamiento de estos robots al expandirse y contraerse, y los valores de presión a los cuales opera (Figura 2.6)

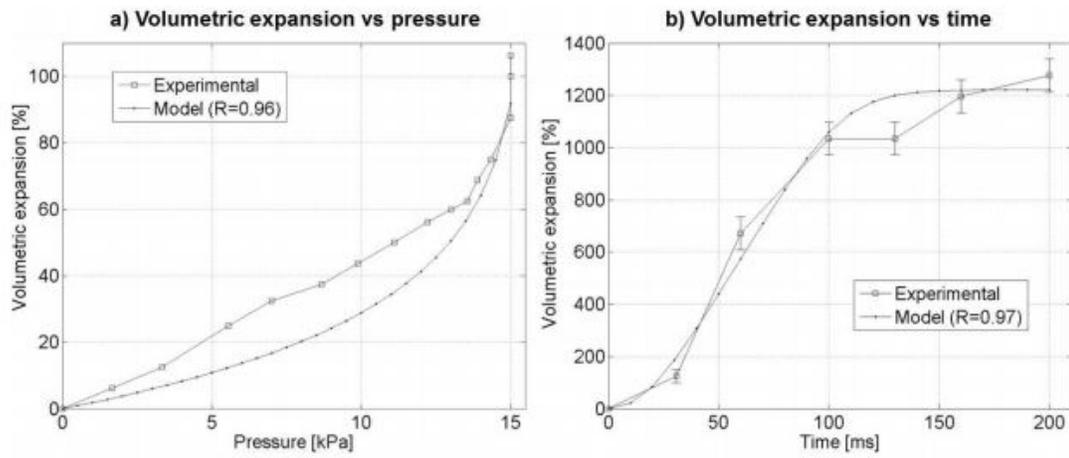


Figura 2.6: Respuesta volumétrica de los Robots blandos a) Expansión volumétrica vs presión. b) Respuesta volumétrica instantánea producto de una presión de 138kPa

Capítulo 3

Validación de herramientas

Debido a que es necesario el uso de software para la simulación de estructuras y sus respuestas frente perturbaciones, es que primero se realizará un proceso de validación que respalde el manejo del usuario en uno de estos programas. El programa seleccionado para utilizar en este trabajo de título, es el programa Abaqus, el cual utiliza elementos finitos para sus simulaciones estructurales. Para la validación se replicó una de las simulaciones realizadas en el artículo de Shan S. et al. [6], en específico, se replicó la compresión del material con porosidad circular, utilizando las especificaciones entregadas en el mismo documento. Para el contraste se tuvieron en cuenta 2 factores importantes: la deformación de la estructura (de forma cualitativa) y el esfuerzo de compresión. Los resultados obtenidos se presentarán a continuación:

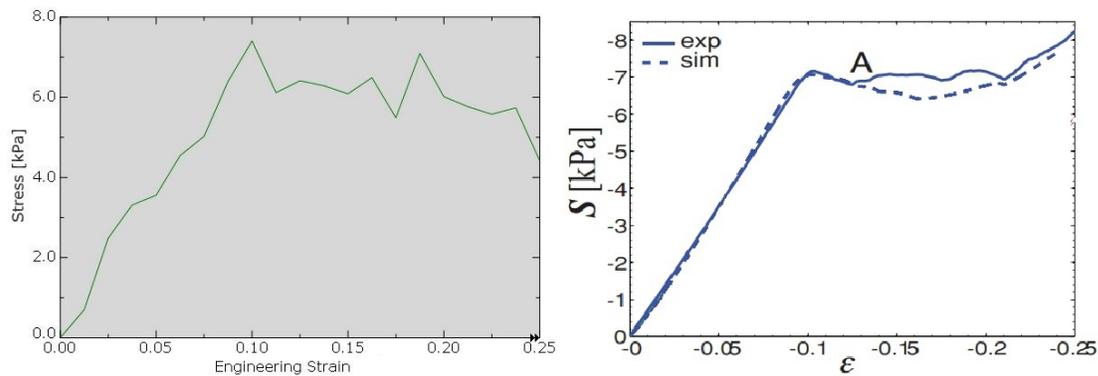


Figura 3.1: Comparación resultados obtenidos en la simulación. Izquierda: Esfuerzos recreados. Derecha: Esfuerzos esperados

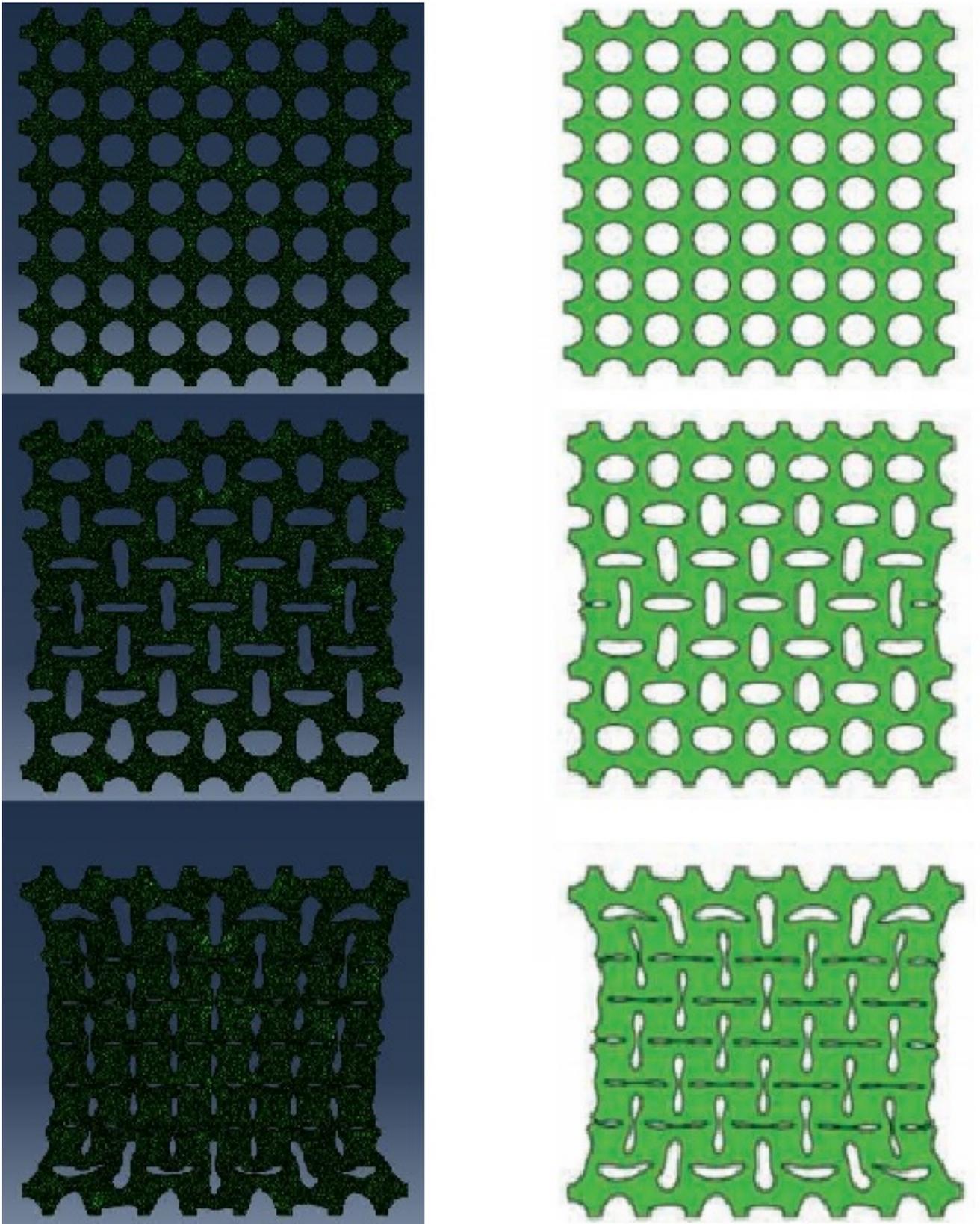


Figura 3.2: Comparación resultados obtenidos en la simulación. Izquierda: Deformación de la simulación recreada. Derecha: Deformaciones esperadas según la publicación

Como podemos apreciar en las figuras 3.1 y 3.2, los resultados obtenidos son satisfactoriamente similares a los esperados. Pese a que existen algunas diferencias, estas se pueden asociar errores en la aproximación de algunos datos que no se encuentran explícitos en la publicación y debieron ser aproximados para la simulación. En la figura 3.1 vemos por ejemplo que el máximo de esfuerzo es alcanzado a un mismo porcentaje de deformación y que este tiene un valor máximo similar, además de que la tendencia posterior a esta se mantiene. A la vez, en la figura 3.2 notamos que el proceso de deformación es exactamente el mismo para ambas simulaciones, con esto nos referimos a que los agujeros semejantes colapsan de la misma manera en ambos casos.

En base a los resultados obtenidos, y la similitud de estos con los resultados originales de la publicación, podemos concluir satisfactoriamente que queda demostrado el manejo del programa Abaqus en lo que a simulaciones de deformaciones respecta.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Diseño: Estructura

Para comenzar es necesario seleccionar el diseño de porosidad óptimo para el metamaterial, durante las semanas finales del semestre otoño 2019 se estuvo en contacto con los estudiantes de intercambio Blumine Robert y Jules Gautier, quienes se encontraban trabajando en su propio proyecto sobre metamateriales [5], en conversaciones con ellos se repasaron diversos diseños de metamateriales auxeticos, en especial 2 de los diseños en los que ellos se encontraban trabajando.

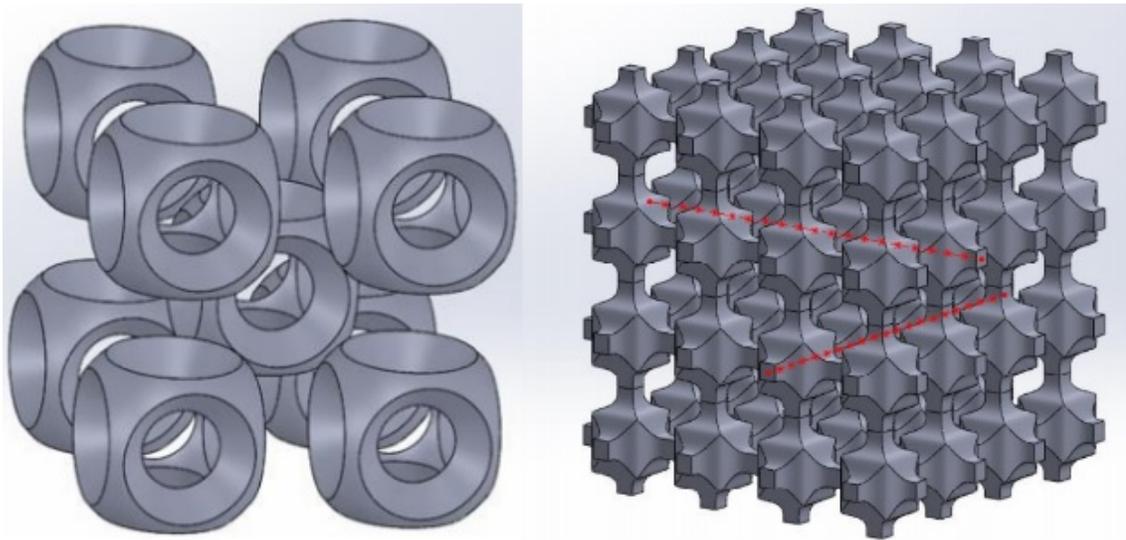


Figura 4.1: Metamateriales blandos auxeticos analizados a fondo. Izquierda: BCC Buckliball. Derecha: 3D Cross shape

De las 2 estructura presentadas en la figura 4.1, se selecciono la geometría de la 3D cross shape (derecha), esto debido a que sus modos de deformación eran menos complejos que los del BCC buckliball y su estructura mas gruesa permite una intervención mas sencilla.

En las simulaciones realizadas para la estructura 3D Cross shape, se nota que existe una diferencia entre los resultados de la simulación explicita/dinámica y de la simulación explicita/estática, en los cuales si bien la segunda de estas entrega un comportamiento auxetico

de la estructura, la simulación explícita/dinámica de la estructura produce una deformación con un coeficiente de poisson positivo y nada parecido a los resultados explícita/estática. Teniendo en cuenta esto, se procede a realizar una simulación propia de la estructura del metamaterial, usando algunos de los datos entregados en la publicación original [5] y algunos obtenidos de ensayos vistos en otras bibliografías.

Tabla 4.1: Datos usados en la simulación

Input simulación explícita	
Densidad	0.00125 kg/cm ³
Modelo	Hiperleastico - Ogden
mu2	22.25
alpha2	0.663
mu3	3.574
alpha3	4.225
D1	0.00293
Tipo de Malla	C3D10M

Usando estos datos para la configuración de la simulación, se procedió a ejecutar el programa de elementos finitos, el cual debido a la complejidad y a la cantidad de elementos de la estructura, demoro alrededor de 3 semanas en realizar el análisis explícito completo.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se procede a continuar con la construcción física del modelo y de los actuadores neumáticos de la estructura, para ello, se comenzó por definir la configuración mas óptima para integrar los actuadores blandos a la estructura. Siguiendo las recomendaciones del profesor guía, se decide no integrar los directamente en la estructura sino que, luego de que esta este construida agregar actuadores estratégicamente para que estrangulen/obstruyan puntos de inflexión críticos, los cuales, en base a los datos de la simulación explícita, serian los conjuntos indicados en la figura 4.2, afectando cualquiera de estos debería bastar para afectar el modo de deformación de la estructura.

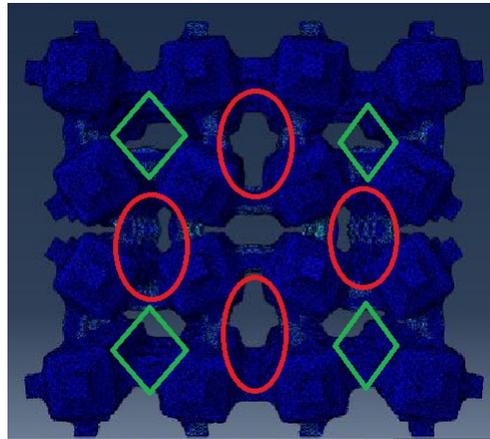


Figura 4.2: Posibles posiciones para los actuadores neumáticos, estas pueden ser los óvalos rojos o los rombos verdes

4.2. Fabricación: Estructura

Definida la manera de integrar los actuadores en el metamaterial, se continuo con la construcción de este. Debido a la complejidad de la estructura del metamaterial, el uso de un método tradicional para la construcción de las piezas de silicona quedo descartado, por lo cual se barajaron dos métodos para su fabricación ambos de impresión 3D. Impresión FDM (deposición de material fundido) e impresión SLA (estereolitografía), haciendo un contraste entre ambos métodos, se termino por seleccionar el método de impresión FDM por sobre el de SLA, principalmente, debido a que existe una mayor disponibilidad de estas maquinas en el FabLab y a sus menores costos del material, si bien, se sacrifica la calidad del nivel de detalle de impresión al seleccionar FDM sobre SLA. Para asegurar la calidad y la funcionalidad de los moldes construidos, previo a la producción final se construyo un molde de prueba para asegurar que usando una óptima configuración de impresión, se logra un molde apto para la fabricación de las piezas.

Para la construcción final de la pieza se decidió seguir 2 diseños de ensamble distintos, los cuales se desarrollaron en paralelo. El primer ensamble (de ahora en adelante denominado “Estructura 1”), cuenta con 4 piezas distintas para conformar un cubo de lado 3 (27 piezas en total): 1 centro, 8 esquinas, 12 aristas y 6 caras, este ensamble y sus piezas están explicado en la figuras 4.3 y 4.4.

El segundo tipo de ensamble consiste en un cubo de lado 4 construido con un único tipo de pieza (molde 0 pieza central del primer set, 64 piezas en total), según como se unen estas piezas se lograron dos estructuras distintas: la primera (desde ahora denominado “Estructura 2”), se logra mediante la unión de las piezas en un cubo de lado 3 y cortando las restantes a la mitad para formar la capa exterior. La segunda estructura (desde ahora “Estructura 3”), es formada al unir directamente las piezas en un cubo de lado 4, si bien, en este caso la estructura lograda dista bastante de la simulada, pero presenta una oportunidad extra de estudio de las piezas y como se alcanzan las propiedades auxéticas.

En resumen, para la construcción de estas 3 estructuras se imprimieron 6 moldes en total, siendo 3 de estos moldes 0 (debido a la alta demanda de esta pieza, se necesitaron 129 de estas piezas en total), y uno de cada uno de los moldes 1, 2 y 3. La configurando de la impresión usada en los moldes fue la siguiente: un infill de 5% con patrón rectilíneo, sin soportes y una altura de capa de 0.1mm, para así dar la mejor definición posible a cada molde, producto de esto cada impresión demoro alrededor de 4 horas por molde con un promedio de 30 gramos cada molde.

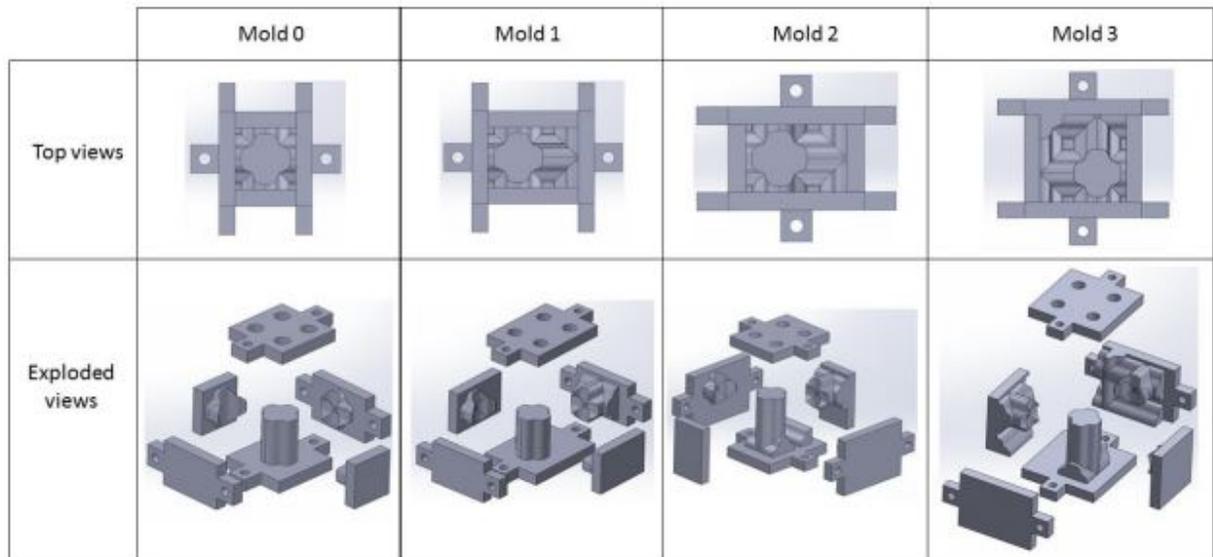


Figura 4.3: Moldes de cada pieza del ensamble

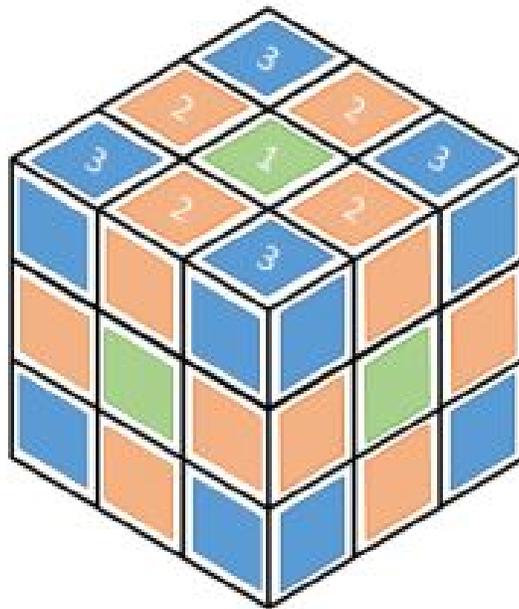


Figura 4.4: Configuración de las 4 piezas del ensamble 1

Obtenidos los moldes, se procedió a ensamblarlos y asegurarlos por medio de pernos y tuercas para evitar así la mayor cantidad de filtraciones de silicona y burbujas de aire. La silicona seleccionada para la construcción fue la Ecoflex 00-50, la cual proporciona una alta flexibilidad y un relativamente rápido tiempo de curado (alrededor de 1 hora para las piezas), para la preparación de la silicona se mezclan las partes A y B en una proporción 50:50, y una vez mezclada bien, se hace uso de una jeringa para inyectar la silicona en los moldes y se deja reposar a temperatura ambiente por 70 minutos procurando que no llegue el sol. Una vez pasado el tiempo de curado, se desensambla el molde y se extrae con cuidado la pieza, cabe

destacar que existe mucho material sobrante, por lo cual es necesario eliminar los excesos cuidadosamente con un hoja fina, para esta labor, la herramienta seleccionada fue un bisturí quirúrgico, debido a su precisión y filo.

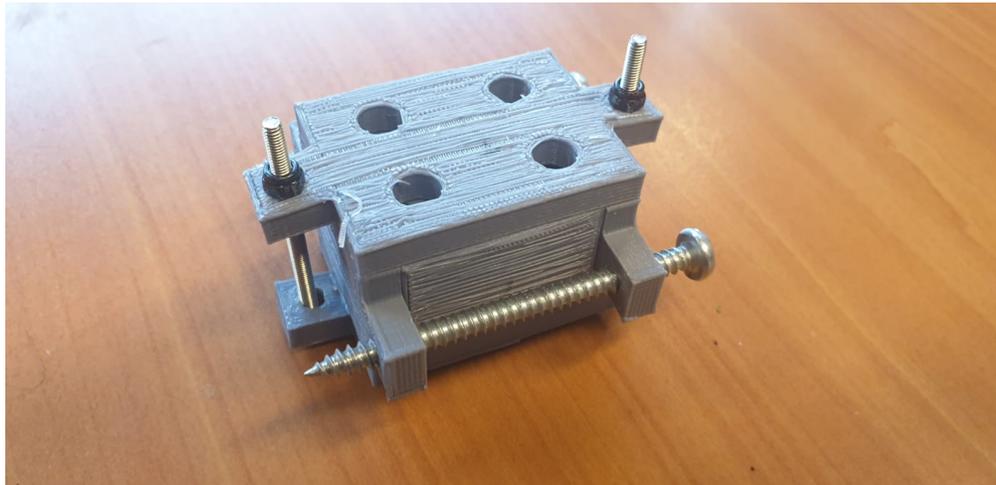


Figura 4.5: Molde de la pieza 1 armado

Una vez fabricada la mitad de las piezas del primer ensamblaje (estructura 1), se procedió con el proceso de pegado, esto con el fin de optimizar tiempos y aprovechar la silicona restante de los moldes. El proceso de unión de las piezas es relativamente sencillo, se comenzó ordenando las piezas del tercio inferior del cubo y luego se pegaron de 1 en 1 (para pegarlos se aplica una delgada capa de mezcla de silicona y se unen las partes, retirando excesos), además, mientras se pegaban las piezas se procuró conservar el orden del ensamblaje para evitar que una vez unidas 2 o más piezas pegadas no encajen. Completado el tercio inferior del cubo, se ensambló el siguiente tercio directamente encima del anterior, pegando además las piezas entre ellas y con el tercio ya construido. Este mismo proceso se realizó con el tercio final del cubo para completarlo, una vez unidas todas las piezas, se revisaron las uniones con el fin de llenar vacíos y verificar la correcta unión del ensamblaje.

Para la estructura 3 se procedió de forma idéntica que la estructura 1, armando y pegando el primer cuarto de la estructura y luego continuando con los siguientes directamente encima del primero, nuevamente al finalizar la estructura, esta se revisó con el fin de evitar piezas mal pegadas o excesos de material usado para pegar.

El caso de la estructura 2 es algo distinto, debido a que para armar la parte exterior de este fue necesario cortar algunas de las piezas, para su construcción se comenzó armando un cubo de lado 3 (de igual forma a como se construyeron las otras 2 estructuras), luego para las partes cortadas, se armaron tiras de 3 piezas de largo que una vez pegadas fueron cortadas a la mitad y pegadas en una de las caras del cubo, una cara a la vez hasta completar la estructura. En este caso además de verificar la calidad del pegado de las piezas, se revisó que las piezas sobresalientes (figura 4.6) no fueran demasiado asimétricas, compensando con más silicona en los casos que fueran necesarios.



Figura 4.6: Ejemplo de un borde sobresaliente en la estructura 2

4.3. Diseño: Actuadores

Una vez construidas las 3 estructuras, se procedió al diseño y fabricación de los actuadores neumáticos. Basándose en los resultados obtenidos de la simulaciones, en las estructuras construidas y procurando mantener el actuador lo mas simple posible, se opto por el diseño de una pieza totalmente externa a las estructuras y que al estar inflada obstruyera los puntos de mayor deformación durante la compresión (ya identificados en la figura 4.2) y que, además, estando en estado de relajación interactuara lo menos posible con la estructura. Teniendo estos puntos en cuenta se llego al diseño ilustrado en la figura 4.7, este es básicamente un cilindro elíptico con un grosor de muralla de 1mm y una boquilla en una de sus caras.

Este diseño de actuador fue ideado con el fin de ubicarse en los espacios internos de la estructura, específicamente ubicándolos en los vacíos semi-elípticos de las estructuras, orientándolos con el fin de que al inflarse obstruyan las vigas colapsantes de cada vacío. Para la fabricación de actuadores se decidió nuevamente hacer uso de impresión 3D FDM, debido a la buena experiencia previa con el método y los satisfactorios resultados ya obtenidos. Para su construcción, como es virtualmente imposible la manufactura de los actuadores en una sola pieza, estos fueron separados en 2 partes: la pared con la boquilla y el cilindro elíptico con una de las tapas. Para la boquilla, se imprimió un solo molde que junto con un tornillo, permiten la construcción de la pieza en su totalidad. Por otro lado, para el cilindro elíptico se imprimieron 3 piezas, 2 de ellas para dar forma al cuerpo del cilindro y la tercera como alma para generar el espacio vacío de la pieza.



Figura 4.7: Diseño tridimensional del actuador neumático

4.4. Fabricación: Actuadores

El proceso de fabricación de los actuadores no dista mucho del de las piezas de los ensamblajes, para la pieza de la tapa simplemente se inyecta la silicona al molde con el tornillo ya puesto. En el caso del cuerpo del cilindro elíptico, el proceso difiere del resto, ya que primero se inyecta la silicona (en las piezas que forman el cuerpo) hasta llenar un cuarto del recipiente y luego se inserta el alma hasta el fondo. Luego, para unir ambas piezas del actuador, se aplica silicona en los bordes de la pieza con la boquilla y luego esta se introduce en el cuerpo cilíndrico, una vez ubicado correctamente, se vierte mas silicona sobre la pared que contiene la boquilla, hasta formar una capa de 1 milímetro.

Completada la fase de fabricaciones, se procede a armar el sistema neumático del los actuadores, para ello se hizo uso de los siguientes elementos: 1 metro de tubo de polietileno 5mm de diámetro, 2 uniones Y de polipropileno, 3 uniones T polipropileno, 1 manómetro y 2 jeringas de 30 ml. Usando estos elementos, se armo sistema ilustrado en la figura 4.8, el cual es capaz de alcanzar una presión mínima de 0 mbar y una presión máxima de 300 mbar.

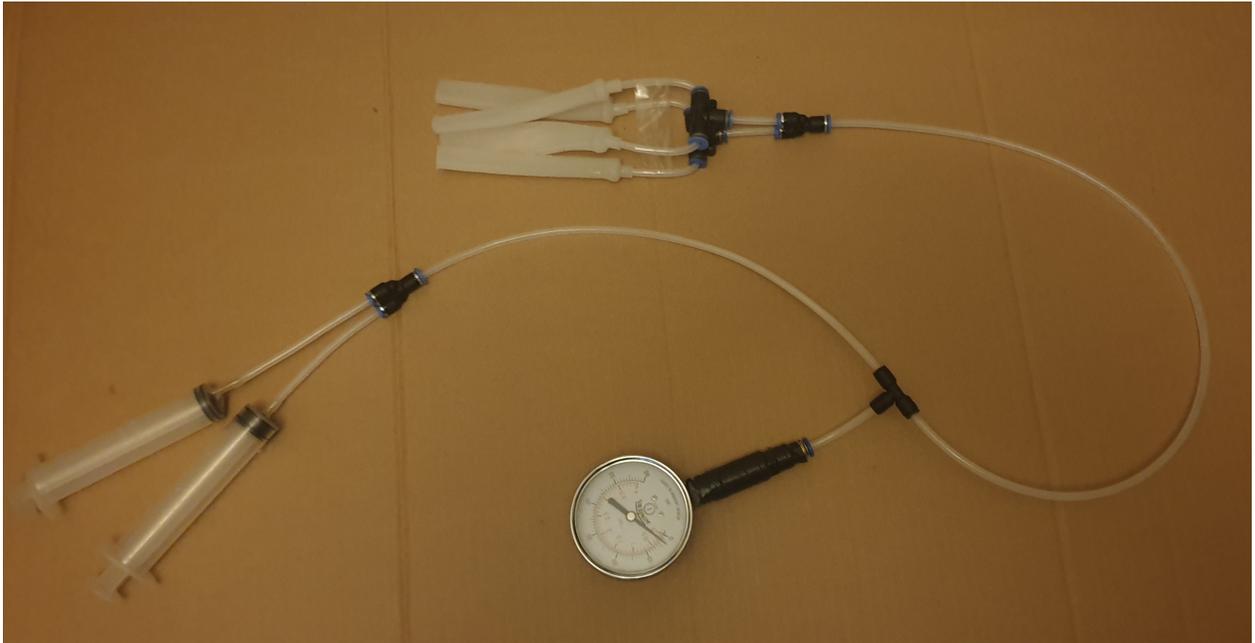


Figura 4.8: Montaje del sistema neumático de los actuadores

4.5. Ensayo

Con el fin de analizar y corroborar el comportamiento de las estructuras ante compresión, se comenzó realizando mediciones de control sobre las tres estructuras fabricadas. Para la totalidad de los ensayos realizados se hizo uso de una impresora 3D, la cual por medio de la adición de una celda de carga con sus respectivos arduinos, fue adaptada para poder realizar los ensayos de esfuerzo/deformación.

Para la toma de datos, se realizaron tres tipos mediciones distintas: Una medición de control, la cual tuvo como objetivo documentar el comportamiento de las estructuras sin la presencia de los actuadores neumáticos, esto tanto para evaluar las capacidades auxéticas como para contrastar el efecto de los actuadores una vez instalados en las estructuras. La segunda medición corresponde a una medición con los actuadores sin aire, es decir una presión aproximada de 0 mbar, principalmente para corroborar que la presencia de los actuadores “apagados” en la estructura no intervenga significativamente en el comportamiento de esta. Finalmente, la última medición corresponde al ensayo con actuadores a presión, para ello se presionan ambos emboles de la jeringas alcanzando una presión de 300 mbar. Todas las mediciones se hicieron comprimiendo la estructura desde un 0% a un 30% nominal

Con el fin de evitar problemas con los datos obtenidos, por cada tipo de medición realizada (control, actuador sin presión y actuador con presión), se llevaron a cabo cinco ensayos de compresión, y en el caso donde existieran datos muy disímiles, se realizaron más mediciones hasta generar una clara tendencia y descartar así los datos que estuvieran muy fuera de la norma.

Las mediciones se realizaron en el orden en el que fueron descritas anteriormente, comenzando por la de control, siguiendo con la medición con actuadores apagados y terminando con la medición de actuadores inflados. Si bien para la primera medición se analizaron las tres estructuras, esto no se repitió en las siguientes dos, esto debido a que los resultados obtenidos en la prueba de control, generó evidencia suficiente para descartar el uso de la estructura 1 para futuras mediciones.

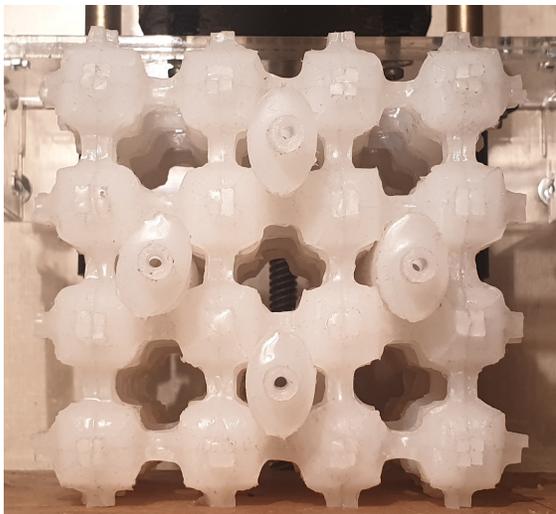


Figura 4.9: Montaje de los actuadores neumáticos en la estructura 2

Para la segunda ronda de mediciones fue necesario montar los actuadores en las estructuras 2 y 3, para el caso de la estructura 2 gracias a los análisis computacionales (figura 4.2) ya se tenía una idea de donde ubicarlos, decidiendo finalmente por los puntos destacados por medio de óvalos rojos, quedando como indican la figura 4.9. Por otra parte, en el caso de la estructura 3, en ausencia de simulaciones computacionales, fue necesario tomar la decisión en base a los resultados obtenidos en la medición de control, de igual manera se realizaron ensayos con distintas configuraciones con el asegurar una hacer un pequeño contraste entre ellos y determinar la configuración de actuadores más óptima.

Similar a lo sucedido durante la primera medición, los datos recopilados y observados demostraron que la estructura 3 no sería útil para los fines de este trabajo de memoria, por lo cual fue descartada para la medición final y esta fue solo realizada con la estructura número 2, para la cual se realizaron las mediciones según fue descrito anteriormente sin

ningún impedimento.



Figura 4.10: Montaje de los actuadores neumáticos en la estructura 3

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1. Análisis Computacional

La simulación explícita/dinámica realizada en Abaqus, entrego los siguientes resultados:

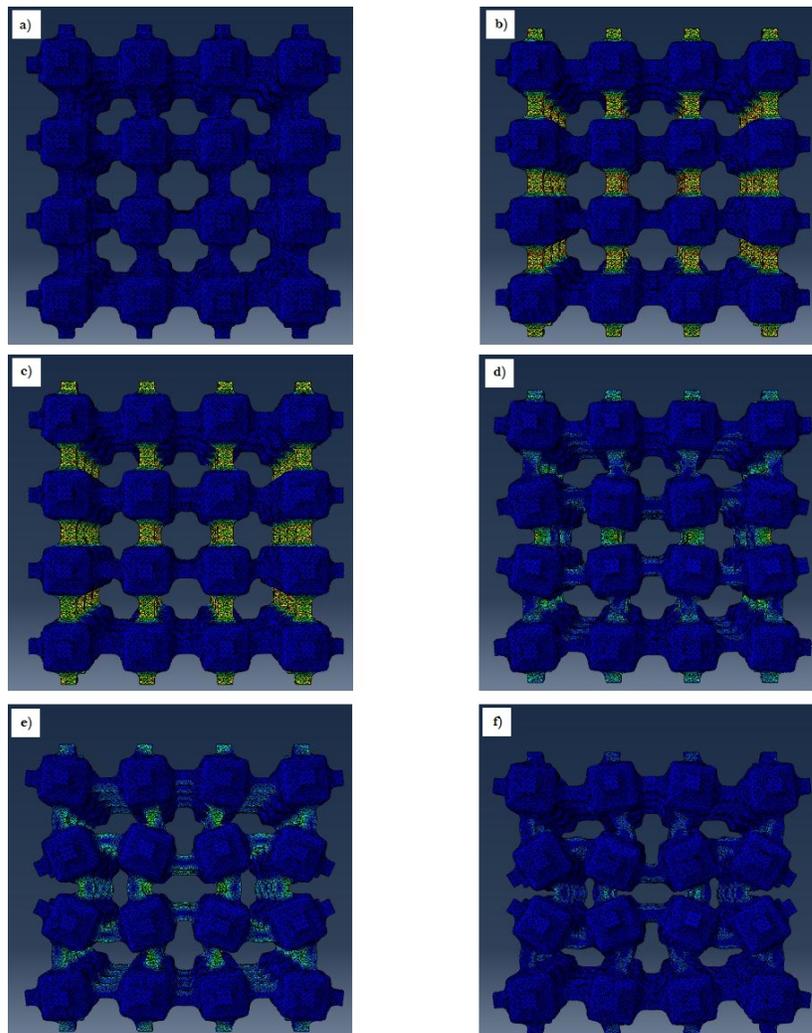


Figura 5.1: Resultados obtenidos en la simulación explícita para una deformación de: a) 0 %, b) 4 %, c) 8 %, d) 12 %, e) 16 %, f) 20 %

Como podemos ver en la figura 5.1, los resultados entregados por el programa Abaqus indican una clara deformación de tipo auxetica en la estructura, contrastando estas con los datos de las simulaciones realizadas por Blumine Robert y Jules Gautier en [5], podemos notar que las deformaciones obtenidas corresponden con aquellas identificadas por ellos como el primer y segundo modo de deformación de la estructura para el modelo elástico y como el segundo para el hiper-elástico (ilustrado en la figura 5.2). Esto respalda los resultados obtenidos y de paso genera la incógnita del “¿porque?” de la falla de su propia simulación explícita/dinámica.

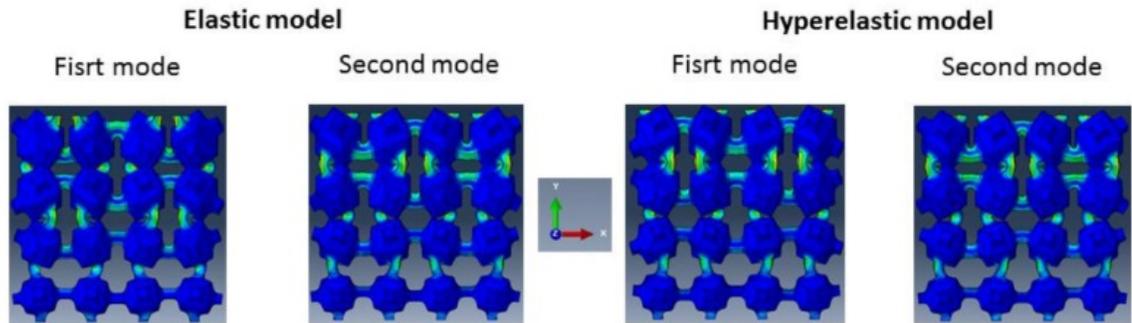


Figura 5.2: Simulación explícita/estática de los primeros 2 modos de deformación para los modelos elástico e hiper-elástico, generados por Blumine Robert y Jules Gautier [5]

5.2. Diseño y Fabricación

Siguiendo los modelos de moldes sugeridos en [5], se obtuvo las piezas de los moldes 0, 1, 2 y 3 construidos mediante impresión FDM:

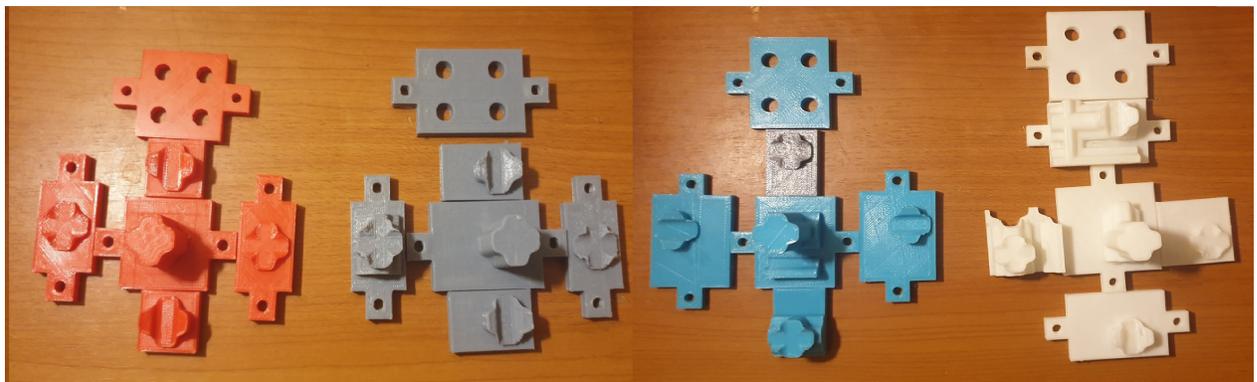


Figura 5.3: Impresión 3D de los moldes para la construcción de la estructura, de izquierda a derecha: piezas molde 0, 1, 2 y 3

Un ejemplo de las piezas de silicona fabricadas a partir de los moldes, están ilustradas en las figuras 5.4 y 5.5



Figura 5.4: Pieza molde 1 sin eliminar los excesos de material

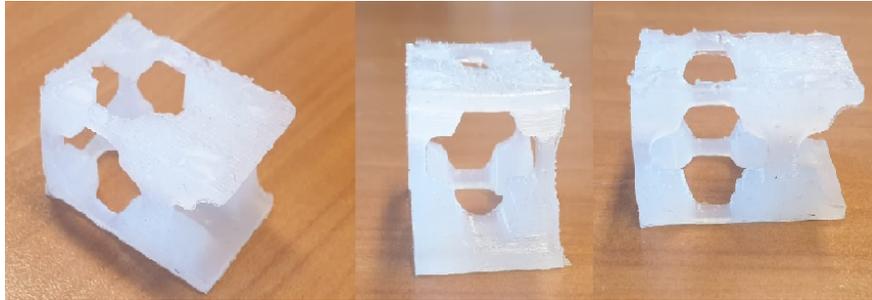


Figura 5.5: Pieza molde 1 al eliminar los excesos de material

Una vez completada la fabricación y el ensamble de las piezas de cada molde, se obtuvieron las estructuras ilustradas en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8

- Ensamble completo estructura 1

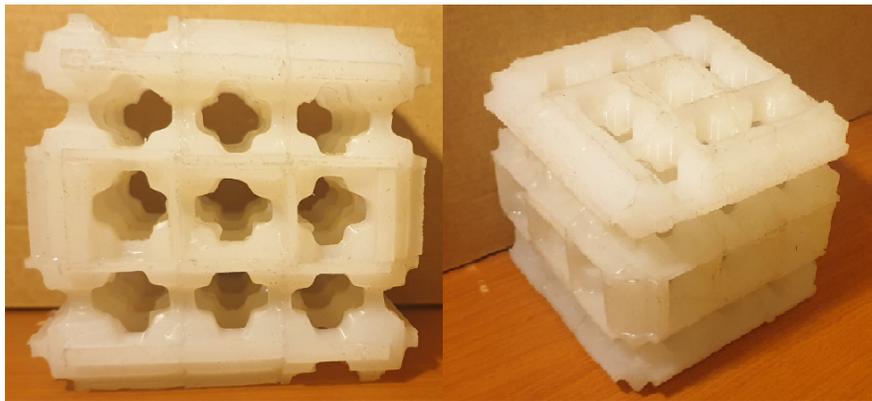


Figura 5.6: Vista lateral e isometrica de la estructura 1

De un primer análisis visual, notamos que es estructura dista bastante de la estructura modelada en el análisis computacional a la cual debería emular. Esto es provocado por que las piezas utilizadas para este ensamble, poseen algunos excesos de material no contemplados, esto se puede apreciar en la figura 5.5, 26 de las 27 piezas de este ensamble tienen este problema, lo cual en etapas tempranas (durante la fabricación de estas), llevo a la necesidad de diseñar las estructuras 2 y 3. Además, podemos intuir que esta estructura no presentara un comportamiento auxetico, o no al menos, como

el expuesto en las simulaciones, esto debido a que la disposición de las concavidades de sus caras, no parecen las deformaciones necesarias para deformar la estructura de forma auxética (carecen de una concavidad en la zona media).

- Ensamble completo estructura 2

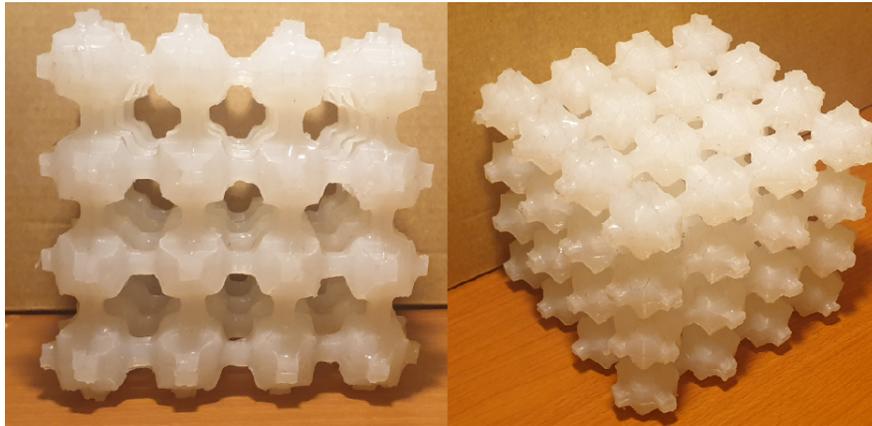


Figura 5.7: Vista lateral e isométrica de la estructura 2

Es fácil notar que a diferencia de la estructura 1, esta estructura si logra el objetivo y se corresponde con la modelada durante el análisis computacional, siendo a simple vista idéntica a esta en la mayoría de los aspectos, si bien existen ciertos detalles en los cuales la pieza se diferencia de la modelada, estos son propios del método de manufactura de la pieza y para los efectos de esta memoria son irrelevantes.

- Ensamble completo estructura 3

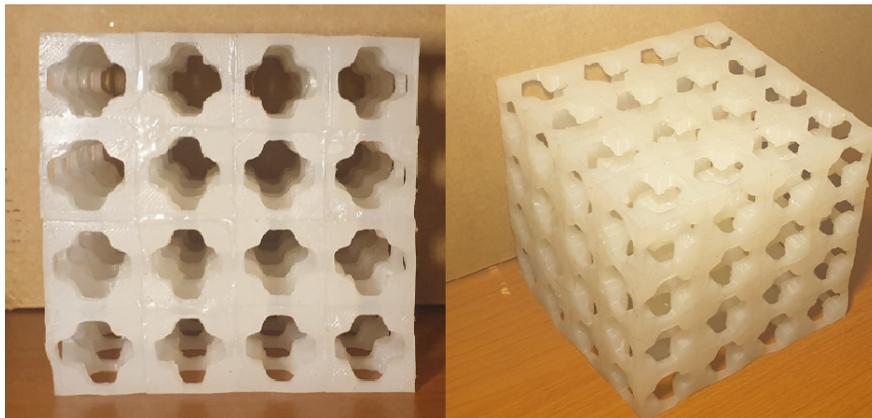


Figura 5.8: Vista lateral e isométrica de la estructura 3

A priori, no es posible deducir o pronosticar con certeza la deformación que presentara la estructura, debido principalmente a que su geometría difiere enormemente con la de las estructuras simuladas, y que, a diferencia de las otras 2 estructuras, esta presenta una cantidad impar de cavidades, lo cual hace suponer que la deformación presentada no sera simétrica.

Piezas del molde correspondiente al actuador neumático:

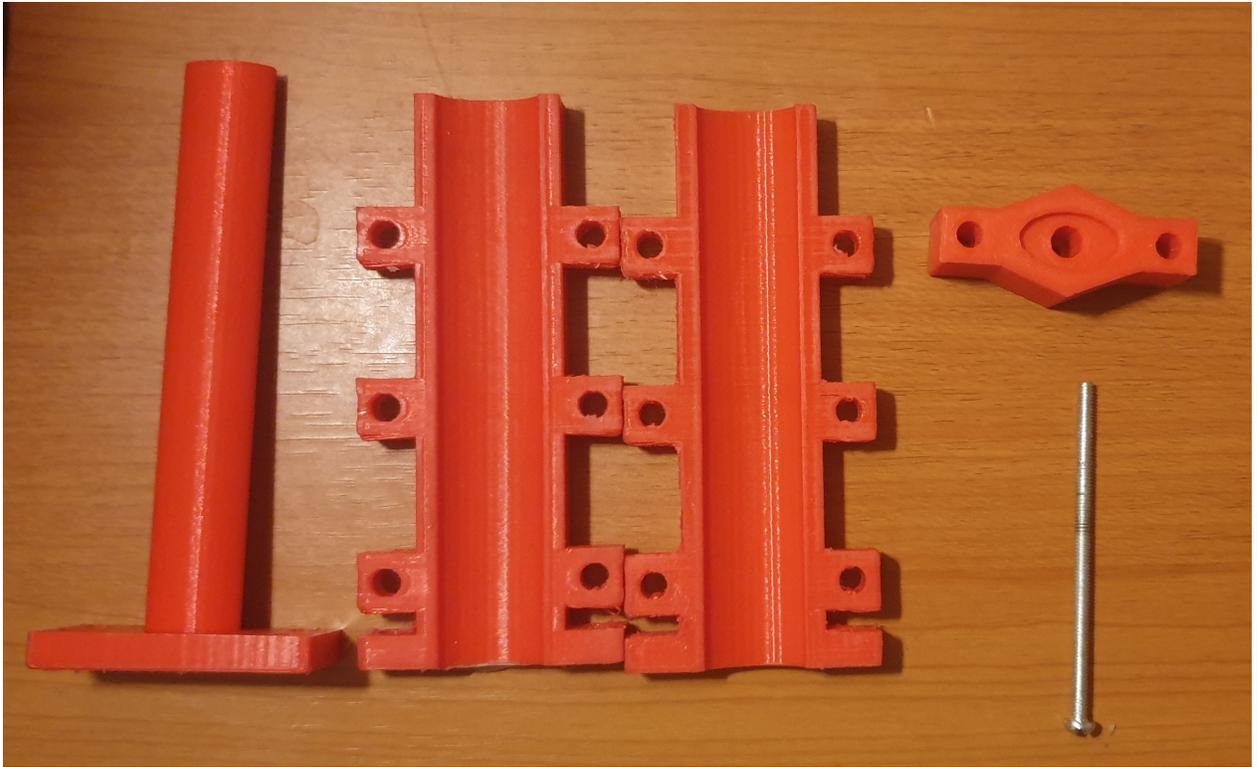


Figura 5.9: Moldes para la construcción de un actuador neumático, de izquierda a derecha: Alma, 2 mitades del cuerpo del cilindro elíptico y el molde de la boquilla junto con el tornillo usado para su ensamble

Piezas del actuador neumático y su ensamble:



Figura 5.10: De izquierda a derecha: Cilindro elíptico, pared con boquilla y actuador neumático ensamblado

5.3. Ensayo de Compresión

- Medición 1: Control
 - Estructura 1

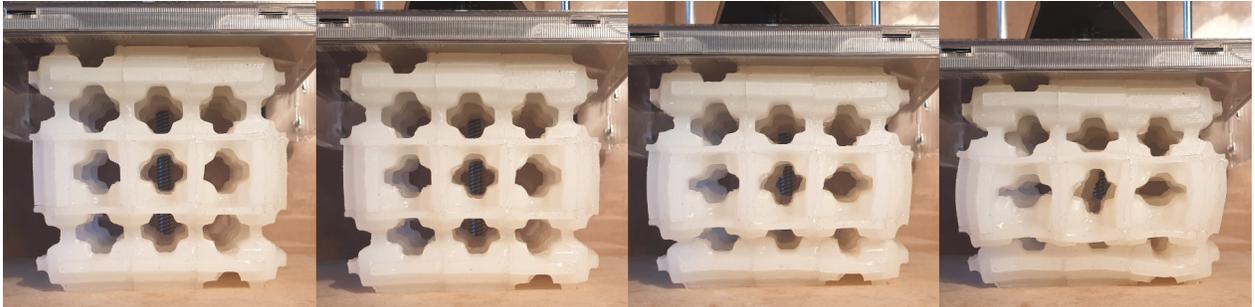


Figura 5.11: Deformación de la Estructura 1: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

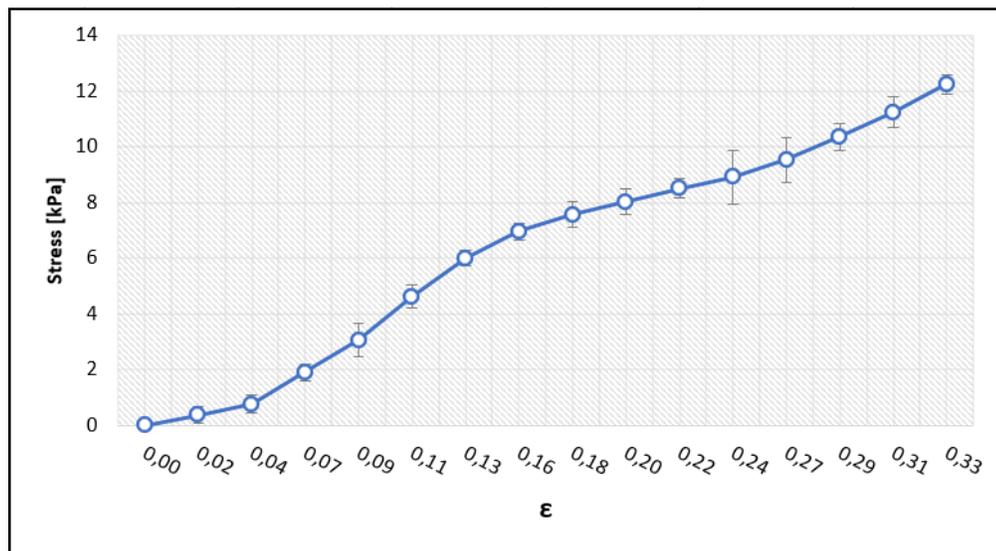


Figura 5.12: Gráfico de esfuerzo vs. deformación nominal estructura 1

Como se puede apreciar en las figuras 5.11 y 5.12, tanto las deformaciones como la curva de esfuerzo/deformación, nos indican que esta estructura carece de un comportamiento auxético, corroborando así, las primeras impresiones generadas respecto a la estructura. Por medio de un análisis visual de la deformación de la estructura, podemos corroborar la hipótesis de que esto es producto de falta de concavidades a lo largo del tercio central del cubo. Esta ausencia, mas las concavidades presentes en los tercios superiores e inferiores, fomentan que la estructura colapse hacia afuera. Debido al claro comportamiento no auxético de esta estructura, es que fue descartado su análisis para las siguientes mediciones.

- Estructura 2

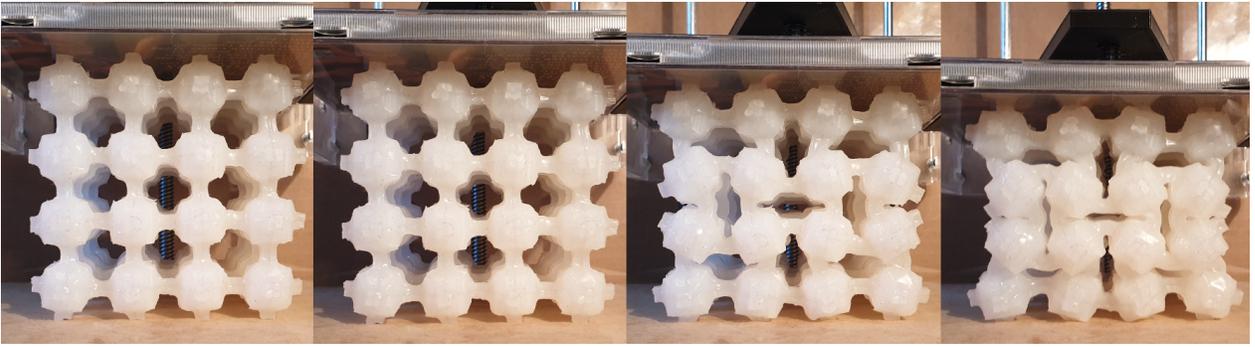


Figura 5.13: Deformación de la estructura 2: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

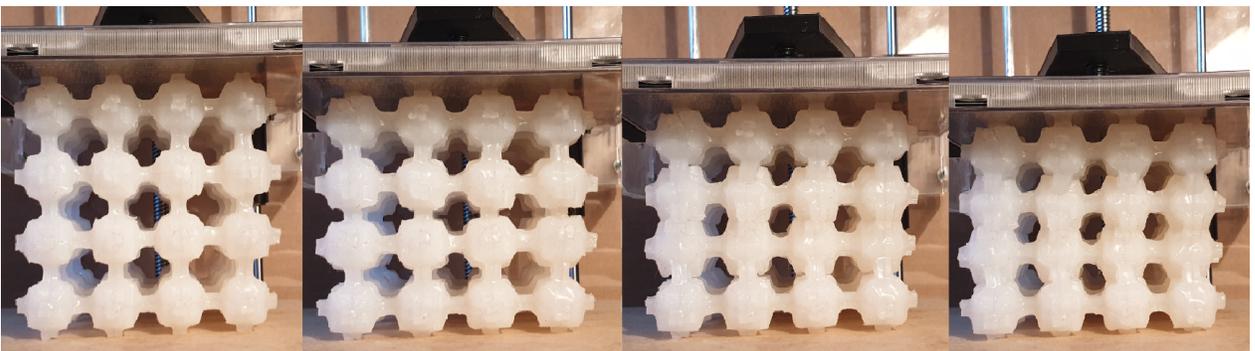


Figura 5.14: Deformación lateral de la estructura 2: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

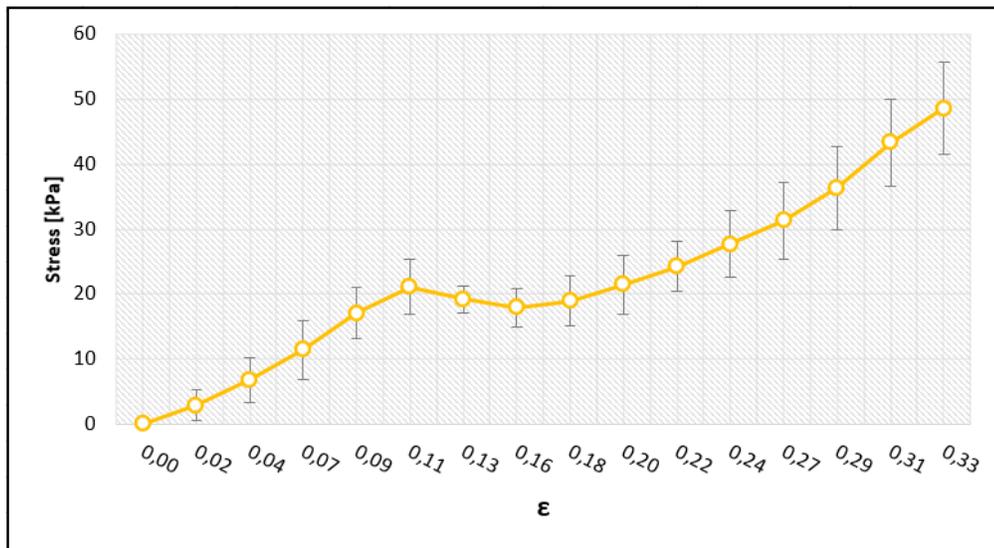


Figura 5.15: Gráfico de esfuerzo vs. deformación nominal estructura 2

Observando la figura 5.13, podemos notar que las deformaciones obtenidas son consistentes con las entregadas por el análisis computacional en la figura 5.1, to-

mando siempre en cuenta la diferencia en el rango de deformación de cada imagen. Por otro lado, la curva de esfuerzos obtenida en el ensayo (figura 5.15), muestra la forma característica de una estructura auxética, denotado por la reducción eventual del esfuerzo en determinada deformación, en este caso, alrededor de una deformación del 10-15 %.

- Estructura 3

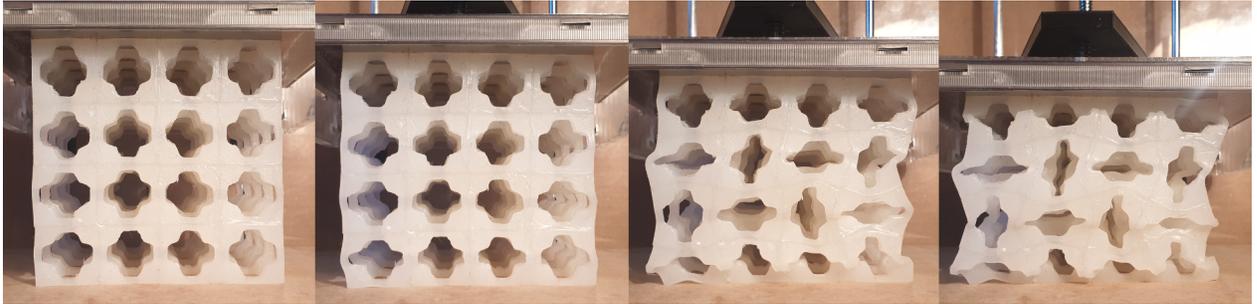


Figura 5.16: Deformación de la estructura 3: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

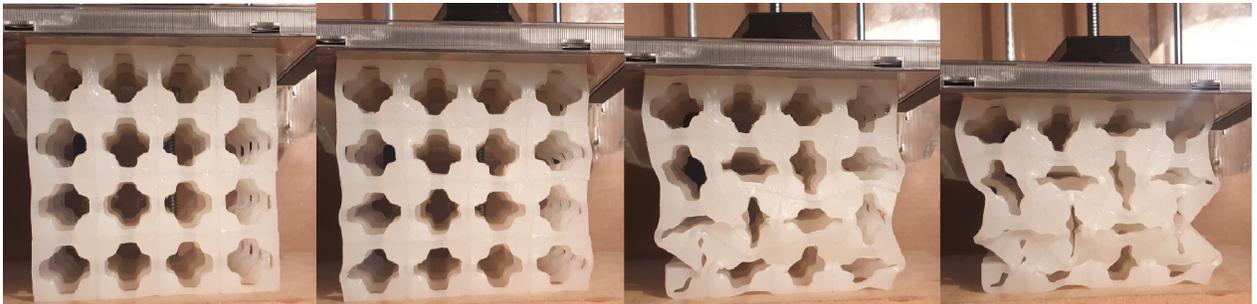


Figura 5.17: Deformación lateral de la estructura 3: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

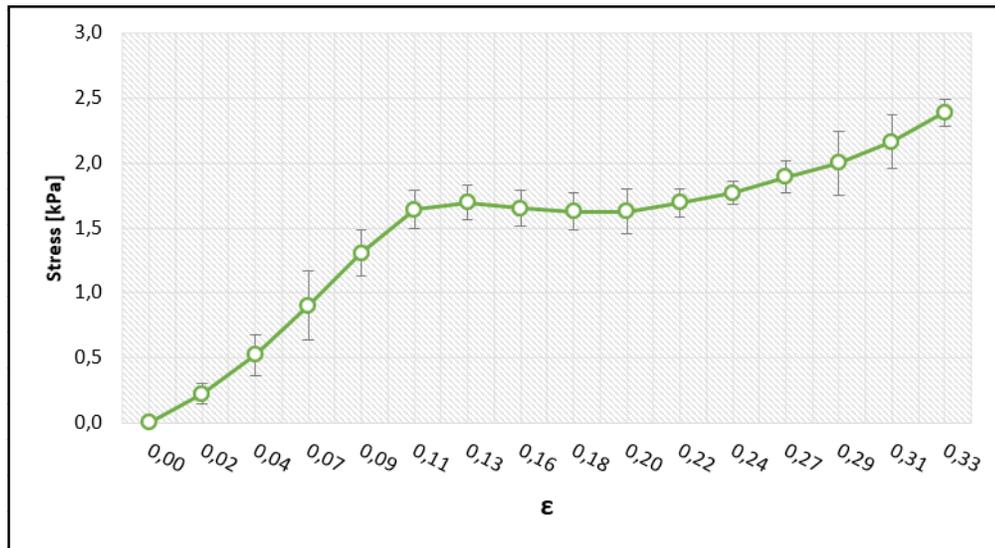


Figura 5.18: Gráfico de esfuerzo vs. deformación nominal estructura 3

En el caso de esta estructura, a diferencia de las 2 anteriores, la deformaciones ilustradas en las figuras 5.16 y 5.17, no nos entregan gran cantidad de información respecto al comportamiento de la estructura, esto debido al carácter asimétrico de las deformaciones. Por otro lado, observando la curva esfuerzo/deformación, notamos que esta presenta la forma característica de una estructura auxética, teniendo la disminución de esfuerzos en una deformación del 15-20 %.

■ Medición 2: Actuadores 0 bar

• Estructura 2

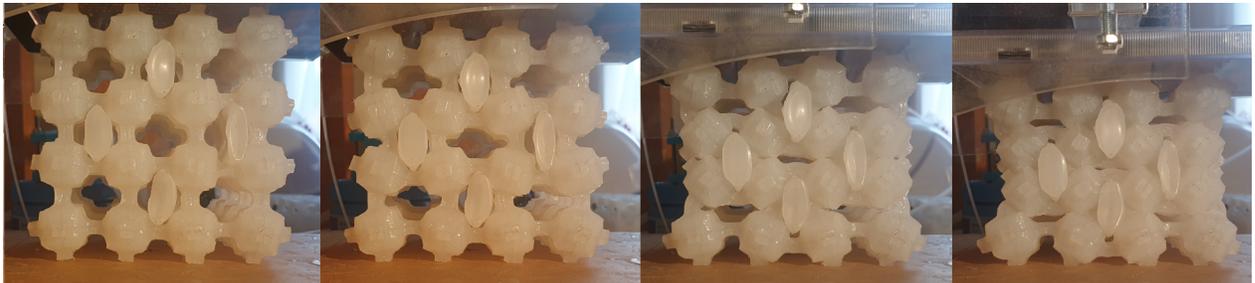


Figura 5.19: Deformación de la estructura 2 a 0 bar: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

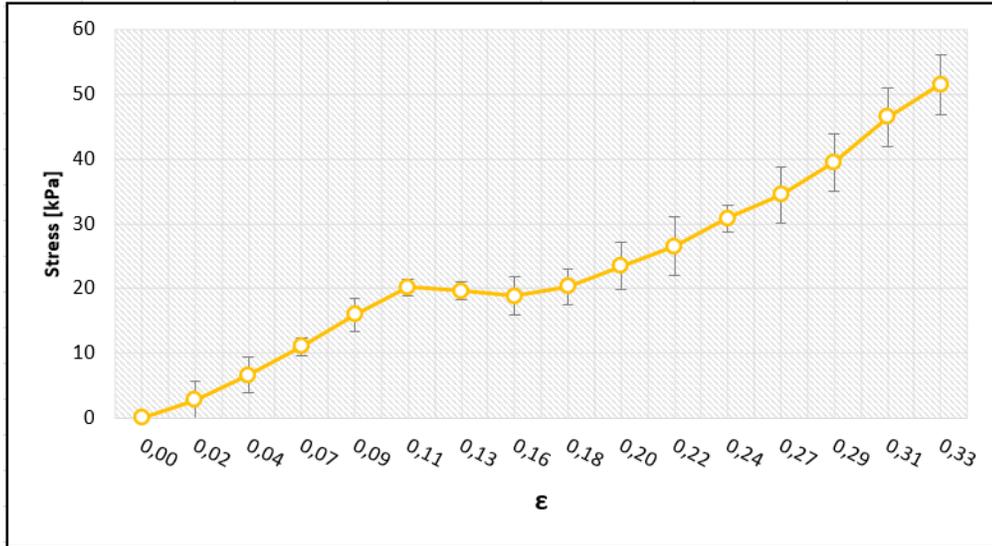


Figura 5.20: Gráfico de esfuerzo vs. deformación nominal estructura 2 a 0 bar

Si comparamos los resultados de las figuras 5.19 y 5.20 con los obtenidos en el ensayo de control (figuras 5.13 y 5.15), se puede notar que no existen diferencias considerables entre ambas mediciones, por lo cual, podemos decir que a pesar de la presencia de los actuadores, las cualidades de la estructura no se ven significativamente afectadas. Por otro lado, si se pone atención en las curvas de esfuerzo deformación, resaltan 2 temas de importantes de destacar: Primero, producto de la presencia de los actuadores, observamos una ligera disminución en el tramo de deformación en el cual se reduce intensidad del esfuerzo, esta disminución es menor que en el ensayo de control. Segundo, una vez superado un 20 % de deformación, existe una resistencia a la compresión considerablemente mayor en el caso con actuadores.

- Estructura 3

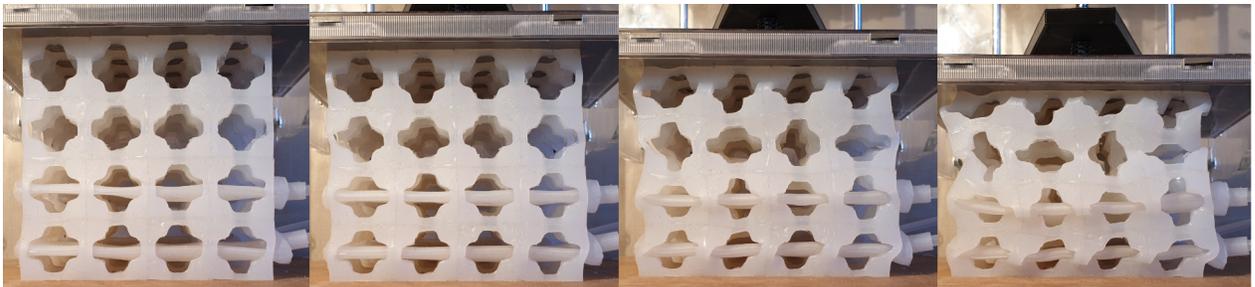


Figura 5.21: Deformación de la estructura 3 a 0 bar: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

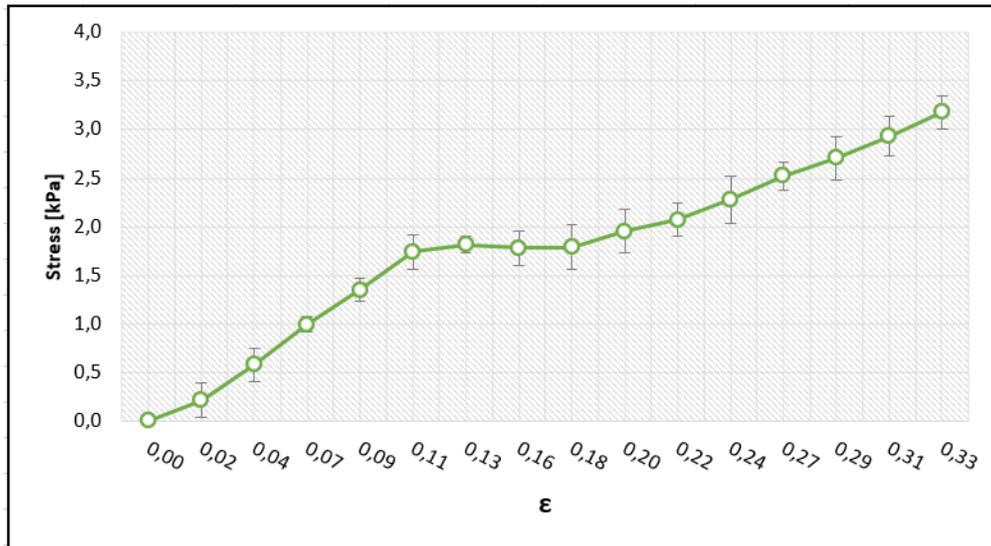


Figura 5.22: Gráfico de esfuerzo vs. deformación nominal estructura 3 a 0 bar

Debido a la deformación poco convencional de esta estructura, se realizaron distintas ensayos con el fin de evaluar la mejor ubicación para los actuadores neumáticos, llegando con todos ellos a los mismos resultados, por lo tanto, se selecciono la configuración que mejor permitiera ilustrar las características de esta estructura.

A pesar de que a simple vista no existe mayor diferencia entre las deformaciones de la figura 5.21 y 5.16, al observar los gráficos de esfuerzo/deformación se puede notar que para la estructura con los actuadores instalados, la curva presenta un crecimiento constante con unas muy leves variaciones, a diferencia de la variación presente en la curva de control, rasgo característico de un material auxético. Es relevante denotar que este comportamiento o forma de la curva, se mantuvo constante sin importa la posición en la cual se ubicaron los actuadores durante las mediciones. Sumado a esto, se evidencio que los puntos de inflexión de la estructura varían según donde se ubicaran los actuadores, haciendo que en la practica, no fuera posible ubicarlos los actuadores en los puntos de inflexión, haciendo la presencia de estos irrelevante. La incapacidad de manipular los modos de deformación de la estructura, mas el aplanamiento de la curva compresión/deformación, llevaron a descartar esta estructura para la investigación y por lo tanto siguientes mediciones.

■ Medición 3: Actuadores a 300 mbar

• Estructura 2

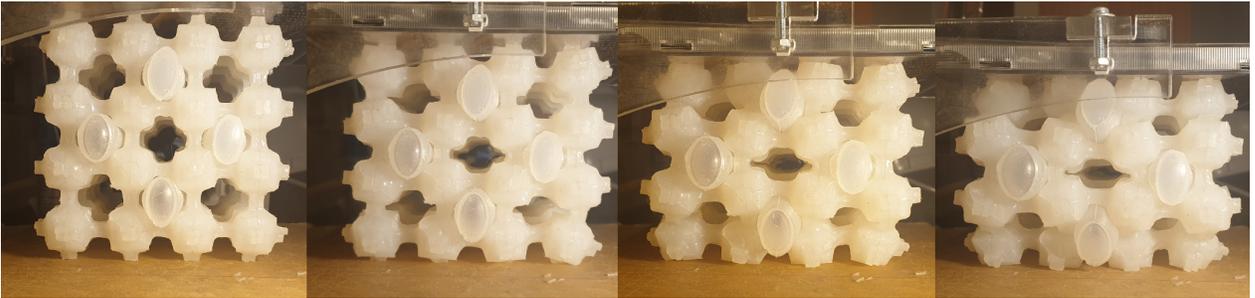


Figura 5.23: Deformación de la estructura 2 con actuadores a 300 mbar: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

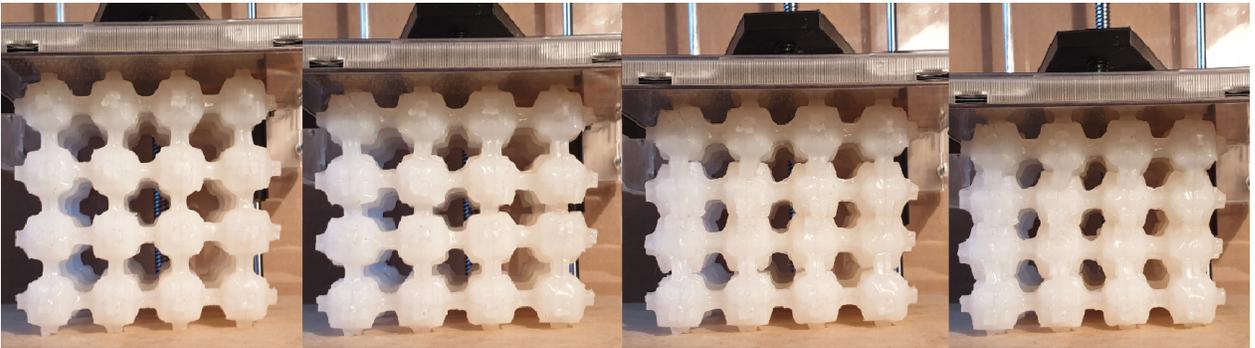


Figura 5.24: Deformación lateral de la estructura 2 con actuadores a 300 mbar: 0 %, 10 %, 20 % y 30 %

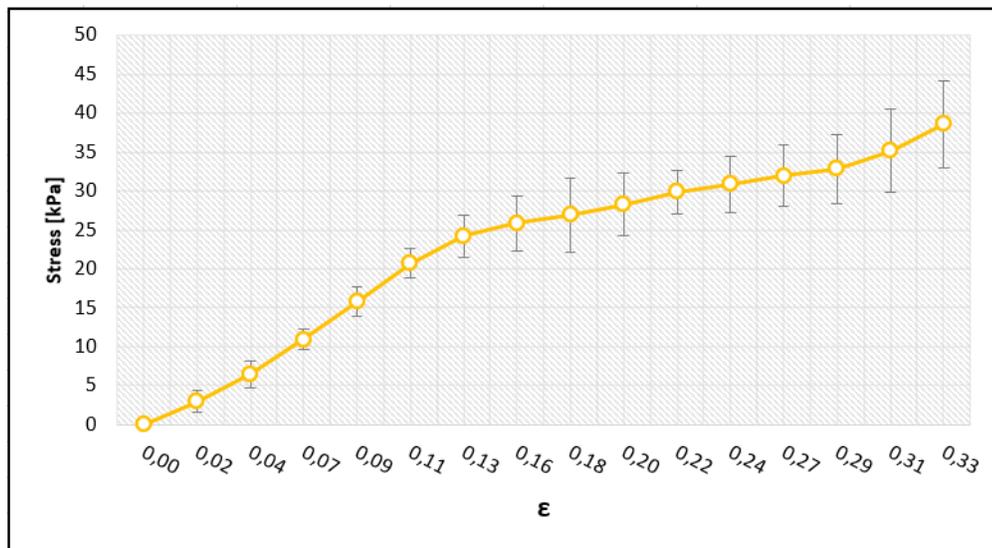


Figura 5.25: Gráfico de esfuerzo vs. deformación nominal estructura 2 con actuadores a 300 mbar

En las figuras 5.23, 5.24, 5.25 tenemos los resultados obtenidos de este ultimo ensayo de compresión, en primera instancia, hay que destacar que la presencia de los actuadores inflados logra el objetivo principal de la ensamble, generando que la estructura cambie su comportamiento de auxetico a no-auxetico, esto se puede apreciar a simple vista gracias a la manera en la cual se deforma la estructura.

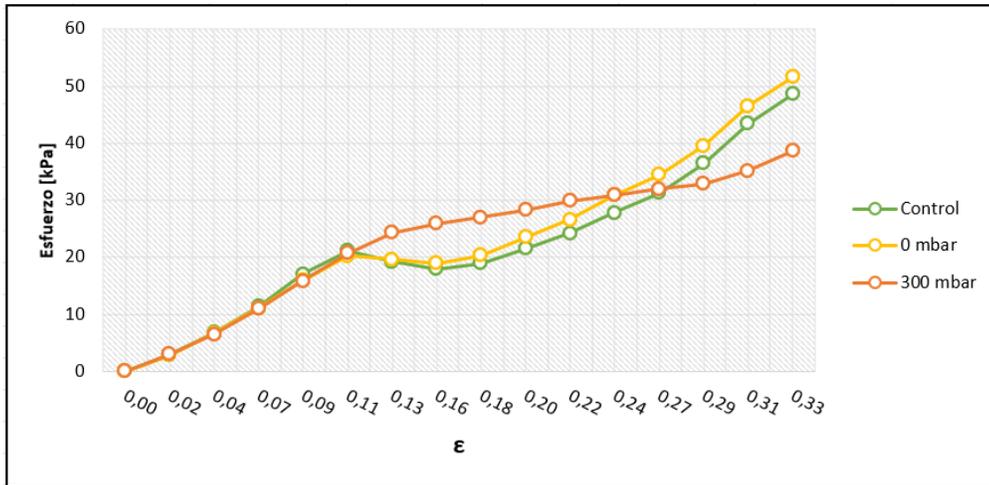


Figura 5.26: Gráfico de esfuerzo vs. deformación nominal para la estructura 2: Sin actuadores (verde), actuadores a 0 bar (amarillo) y actuadores a 300 mbar (rojo)

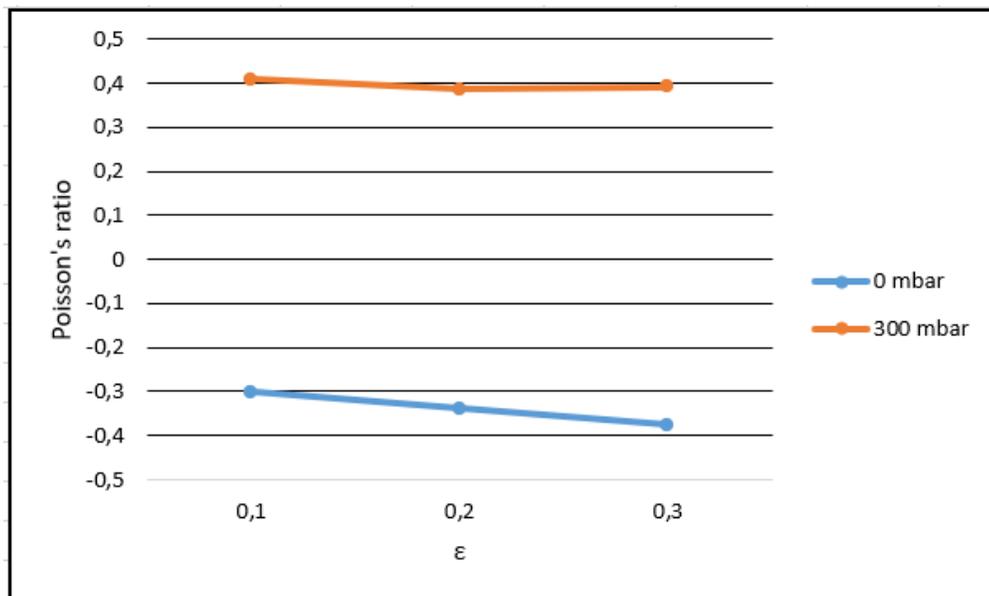


Figura 5.27: Gráfico del coeficiente de poisson para la estructura 2 con los actuadores a 0 y 300 bar

Por otro lado, para analizar el cambio cuantitativo del comportamiento de la estructura, debemos poner atención en el gráfico de las figuras 5.25 y 5.26, de los cual podemos destacar 2 aspectos importantes: La ausencia de la curva característica

de una estructura auxetica, teniendo en este caso un aumento constante del esfuerzo al aumentar la deformación, y por otro lado, un esfuerzo considerablemente menor para los niveles altos de deformación, en contraste con los esfuerzos registrados en los otros ensayos para esos mismos niveles, a pesar de tener activamente un piezo generador de resistencia a la compresión. Esto último se explica en base a la publicación de Chen Y. et al. [1], en esta se indica que las estructuras auxeticas tienen propiedades mecánicas superiores comparadas a otras estructuras construidas de forma parecida (pero que carecen de un comportamiento auxético), por lo cual como se ha evitado el comportamiento auxético de la estructura 2, es lógico pensar que sus otras propiedades mecánicas también se hayan visto afectadas.

Capítulo 6

Conclusiones

En base a los resultados obtenidos y recopilados a lo largo de este trabajo investigación, es posible ahora, con absoluta certeza, abordar, analizar y responder, los objetivos que un comienzo de este trabajo fueron propuestos. El objetivo principal de este trabajo de título corresponde al desarrollo de una celda unitaria capaz de experimentar cambios en su comportamiento por medio de un actuador neumático, luego de los resultados obtenidos por la estructura 2 e los ensayos de compresión, se puede concluir que este objetivo fue logrado con éxito y completado a cava liad, obteniendo resultados que no solo lograron el objetivo buscado, si no que también, coherentes con la bibliografía involucrada.

Para llevar a cabo esta investigación, se siguió una linea de trabajo muy parecida a la planteada por los objetivos específicos propuestos para la investigación, pasando y verificando cada uno de ellos de manera indirecta. En un comienzo, se demostró de manera analítica el comportamiento auxetico de la estructura, previo a cualquier tipo de construcción o ensayo físico con esta, a su vez, en base a estos datos fue posible diseñar los actuadores neumáticos y además, definir los puntos óptimos para integrar estos en la estructura del metamaterial. Construido el metamaterial y los actuadores neumáticos, se realizaron diversos análisis que permitieron caracterizar el comportamiento de la estructura sola, y de esta con los actuadores en estado de relajación y operativos, permitiendo conocer a fondo el comportamiento del ensamble.

Finalmente, podemos concluir que si bien, es posible la construcción de un material capaz de variar su estructura en base a un sistema neumático estos cambios van mas allá de tan solo los modos de deformación de la estructura, estos cambios afectan las propiedades mecánicas del material completo, permitiendo cambiar aspectos como la resistencia al impacto o la misma resistencia a la compresión.

Bibliografía

- [1] Chen Y. Hu X. Li Y. Wang L. & Li, T. Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. *Materials & Design*. pages 142, 247–258, 2018.
- [2] Rus D. & Onal, C. D. A modular approach to soft robots. In 2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). pages 1038–1045, 2012.
- [3] Li S. & Sengupta, S. Harnessing the anisotropic multistability of stacked-origami mechanical metamaterials for effective modulus programming. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(14). pages 2933–2945, 2018.
- [4] Jianhu Shen Shiwei Zhou Xiaodong Huang Yi Min Xie. Simple cubic three-dimensional auxetic metamaterials. *Physica status solidi (b)*, 2014.
- [5] Robert Blumine; Gautier Jules. *3D Soft Metamaterial With Auxetic Behaviour*. PhD thesis, Departamento Ingenieria Civil Mecanica, Universidad de Chile, Chile; Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, Francia, 2019.
- [6] Shan S. & Bertoldi K. Overvelde, J. T. Compaction through buckling in 2D periodic, soft and porous structures: effect of pore shape. *Advanced Materials*, 24(17). pages 2337–2342, 2012.
- [7] Sahab Babae et al. 3D Soft Metamaterials with Negative Poisson's Ratio . *Advanced Materials*, 2013.
- [8] Lau Y. S. Mendoza-Garcia R. F. & Zagal J. C. Vergara, A. Soft modular robotic cubes: toward replicating morphogenetic movements of the embryo. *PloS one*, 12(1). 2017.