

PROYECTO DE TITULO

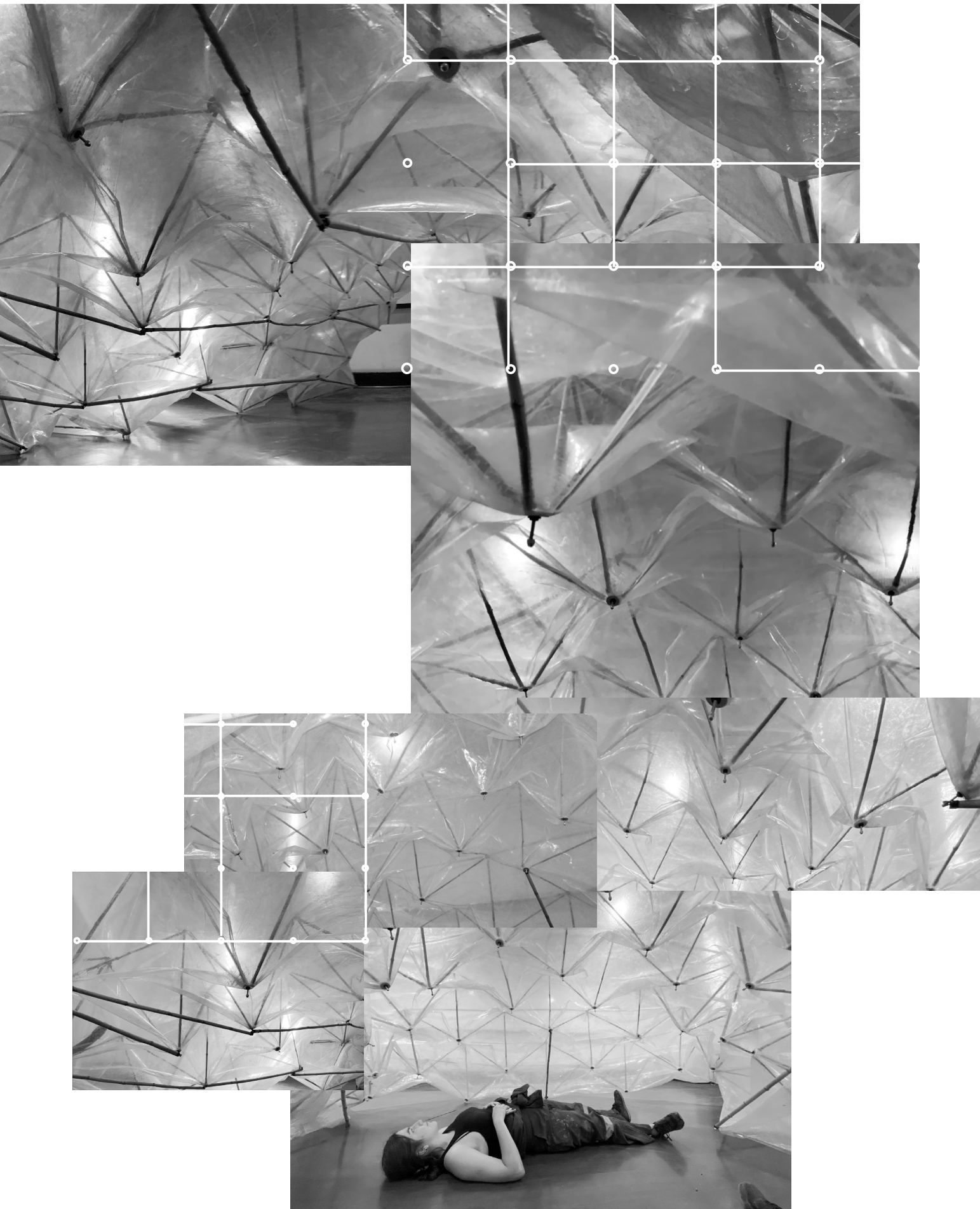
# ESTRUCTURAS PROGRAMMABLES

ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS AUXÉTICAS NEUMÁTICAS A GRAN ESCALA  
CONT.

ALUMNO: GONZALO SEPULVEDA P D A  
PROFESOR GUÍA: MIGUEL CASASSUS R  
PROFESOR GUÍA: JEAN ARAYA G

# INDICE

<b>0. INTRODUCCIÓN</b>	5
<b>1. DISEÑO Y ESTUDIO DE LAS PARTES DEL MODELO</b>	6
<b>1.1</b> Calculo de estructura	8
<b>1.2</b> Diseño de nodos	10
1.2.1 Detalles, peso, y costo	10
1.2.2 Pruebas de hermeticidad	12
1.2.3 Prueba de modulo	13
1.2.4 Golilla de disipación de fuerza	14
1.2.5 Clips para rigidizar	16
<b>1.3</b> Modelo A	18
1.3.1 Planos	19
1.3.2 Variaciones geométricas	20
1.3.3 Proceso de construcción	22
1.3.4 Comparación distintas escalas	24
<b>2. DISEÑO DE PROTOTIPO FINAL</b>	26
2.1 Maqueta a escala y	28
2.2 Planos	30
2.3 Materiales de construcción	32
2.4 Simulación	34
2.5 Proceso de construcción	37
2.5.1 Bambú	37
2.5.2 Cosecha de bambú	38
2.5.3 Unión de barras	39
2.5.4 Parches plásticos	40
2.5.5 Unión de malla	41
2.5.6 Unión membrana y bambú	42
2.5.7 Sellado	44
2.5.8 Barras exteriores	45
2.5.9 Mantencion y reparación	46
<b>3. DISEÑO</b>	48
<b>Accionamiento</b>	50
Prueba 1 accionamiento lineal	50
Prueba 2 arco	52
Prueba 3 doble curvatura	54
Prueba 4 bóveda	56
Prueba 5	58
Prueba 6	58
Prueba 7	59
<b>4. CONCLUSIONES</b>	60

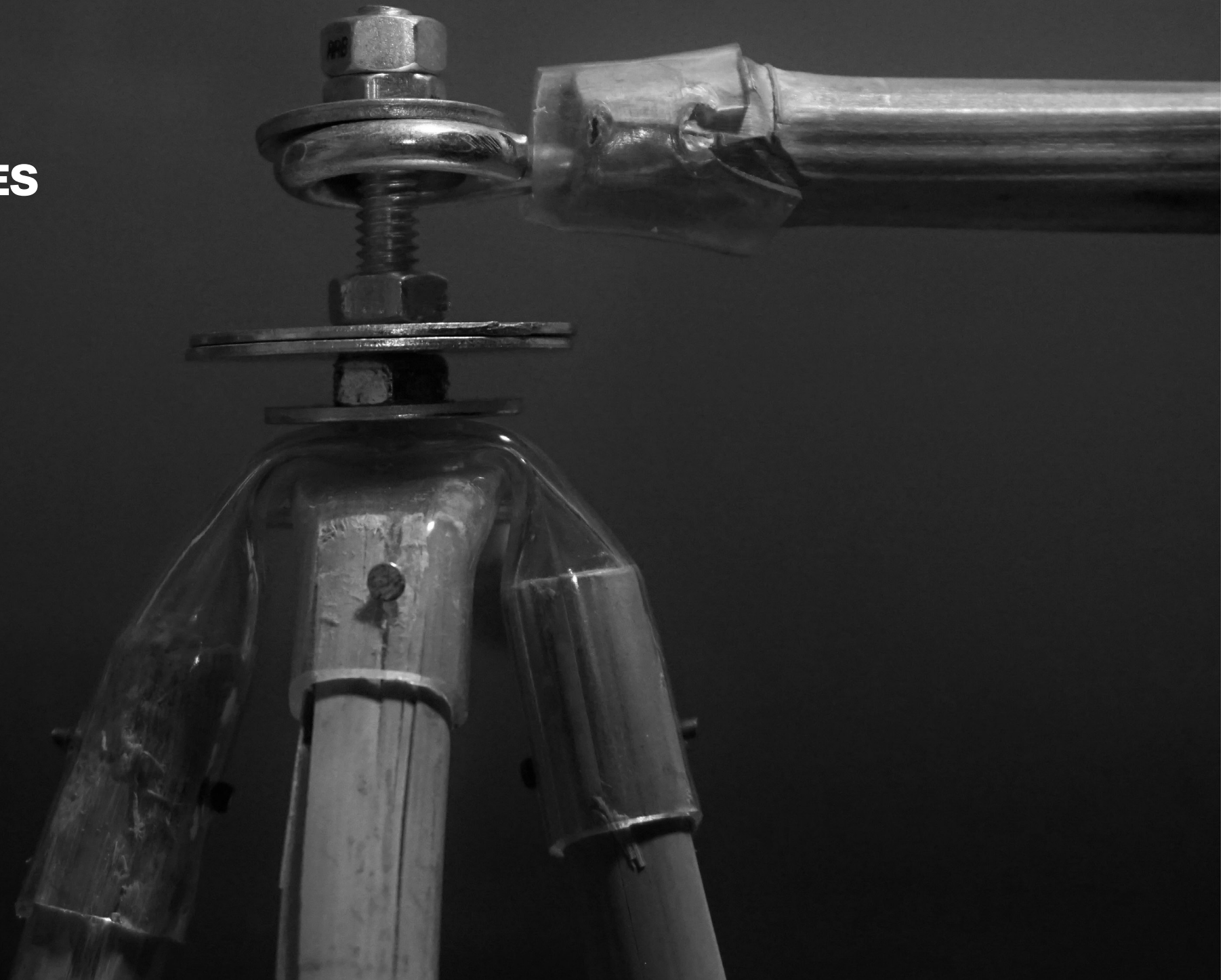


## INTRODUCCIÓN

Este documento es la continuación de "Estructuras programables", donde se analizaron los materiales auxéticos neumáticos, y se realizó una serie experimental de distintos modelos que puedan ser escalados para un uso arquitectónico.

Se tomarán los conceptos previamente vistos para construir, crear planos, detalles, y experimentos que lleven a su final construcción de un prototipo a escala habitable.

**DISEÑO Y ESTUDIO DE LAS PARTES  
DEL MODELO**





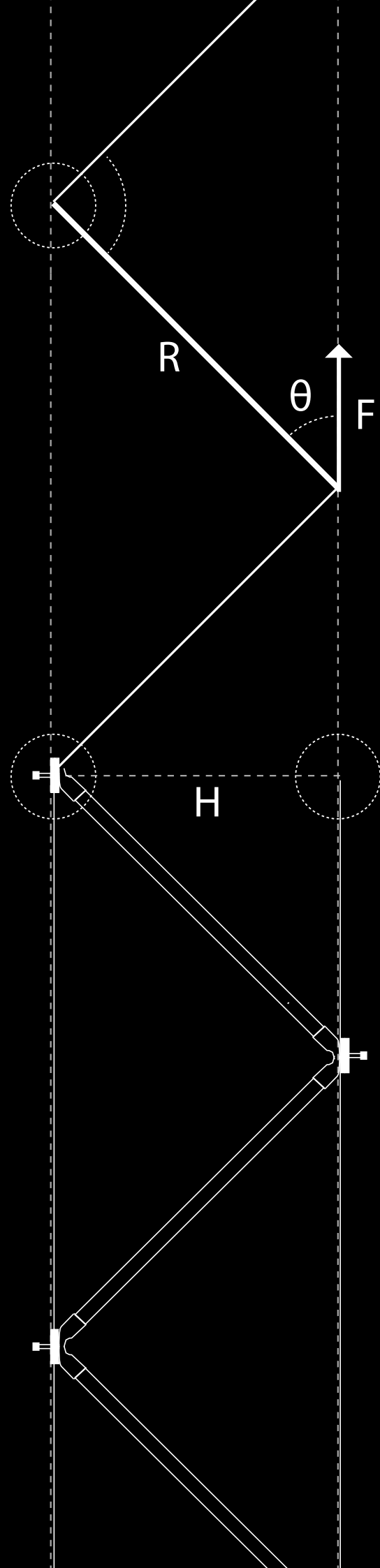
# CALCULO DE TORQUE Y SUCCIÓN

**TORQUE = R \* F \* SIN θ**

Esta formula permite determinar la fuerza que tendrá la estructura al momento de ser accionada. Por ejemplo, para aumentar la fuerza de torque, se podría aumentar el largo de las barras, disminuir la distancia entre ellas, o aumentar la fuerza de succión.

**TIEMPO DE SUCCION=H\*A\*L/SUC**

La formula determina que cuando aumenta el volument de la estructura, va a aumentar el tiempo de succion. de esta misma forma, por tener una mayor area va a necesitar mas velocidad de succión



- Angulo: 90
- Fuerza de accionamiento: 70%

- Angulo: 100
- Fuerza de accionamiento: 70.1%

- Angulo: 110
- Fuerza de accionamiento: 69.4%

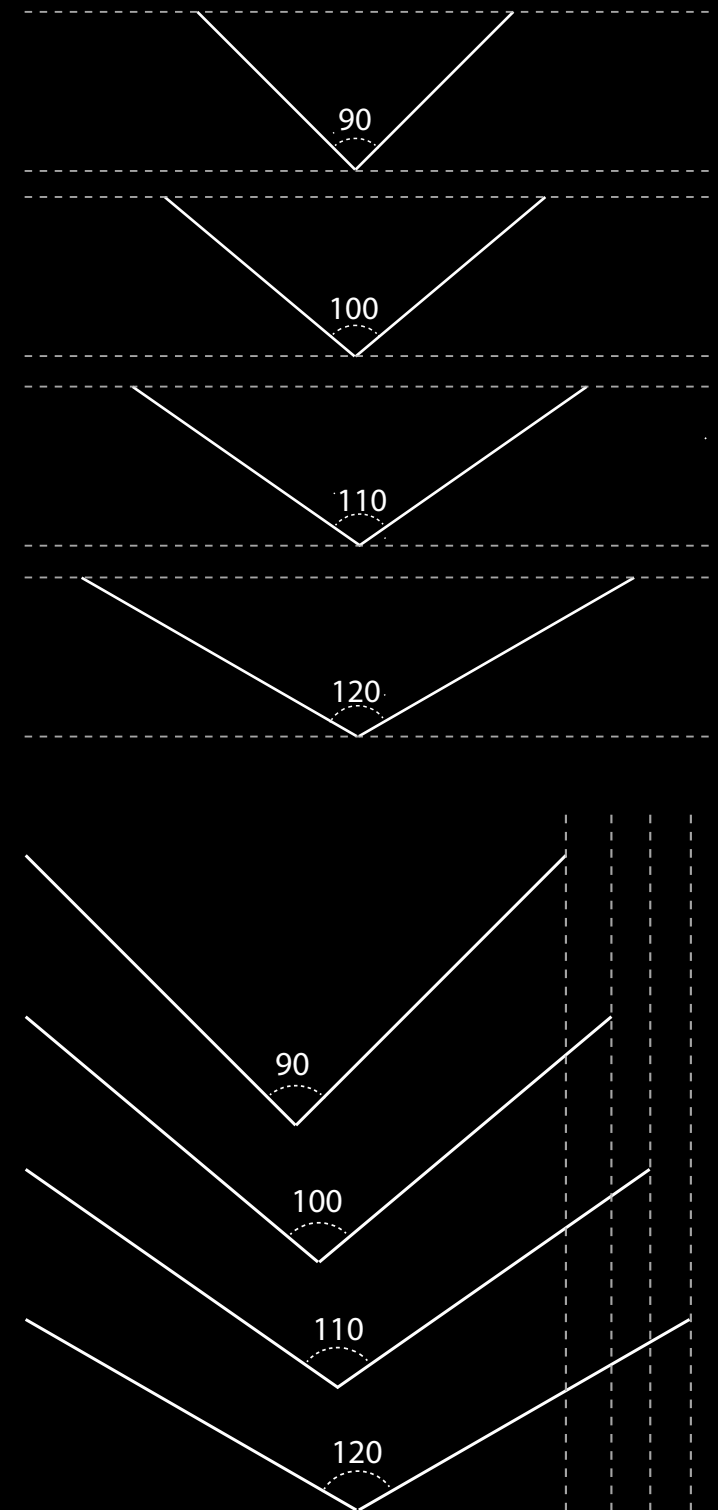
- Angulo: 120
- Fuerza de accionamiento: 70%

- Angulo: 90
- Fuerza de accionamiento: 70%

- Angulo: 100
- Fuerza de accionamiento: 64%

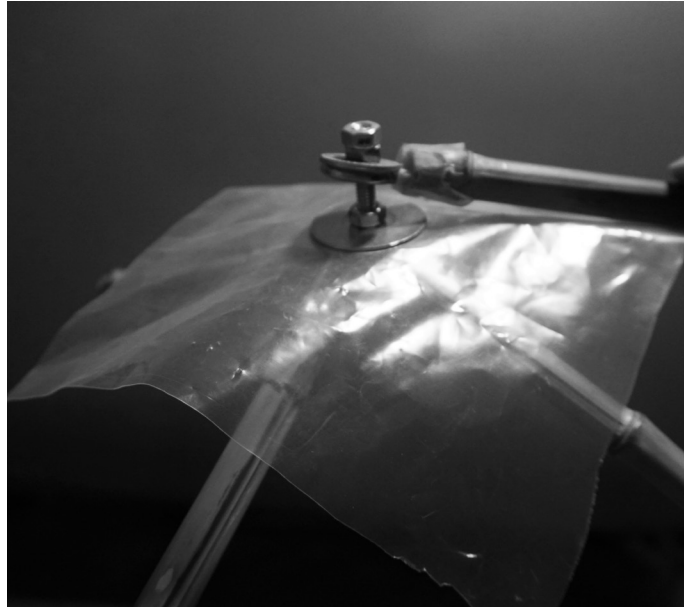
- Angulo: 110
- Fuerza de accionamiento: 57%

- Angulo: 120
- Fuerza de accionamiento: 50%

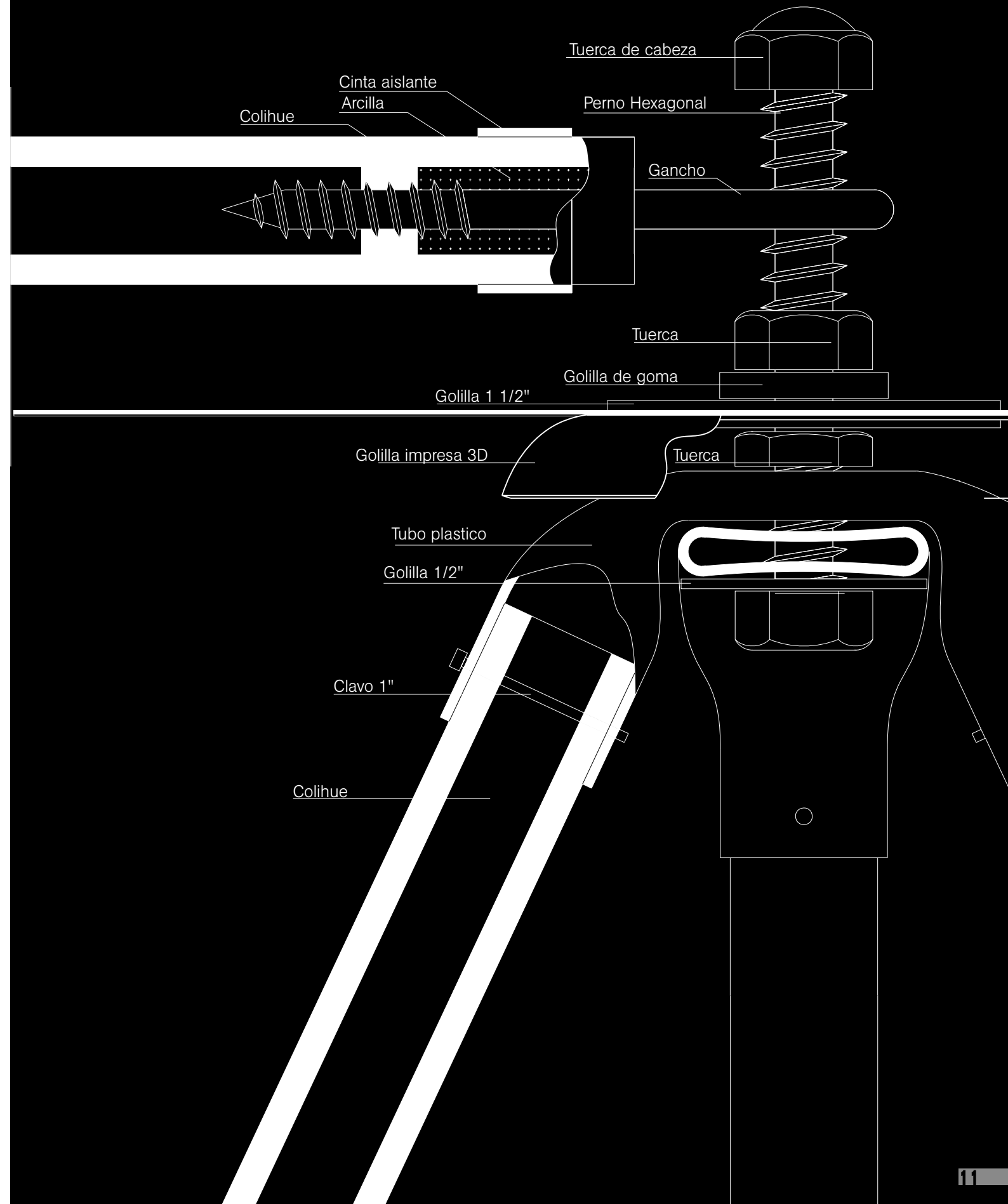


# DISEÑO DE NODOS

Los nodos de la estructura cumplen varias funciones estructurales importantes. Primero, requiere unir las barras interiores, generando una articulación entre ellas. Esto se une con las barras exteriores, perforando y al mismo tiempo sellando la membrana, evitando rupturas. Todo esto necesita ser liviano, fácil de armar, y bajo en costo, ya que la estructura final requiere cientos de nodos.



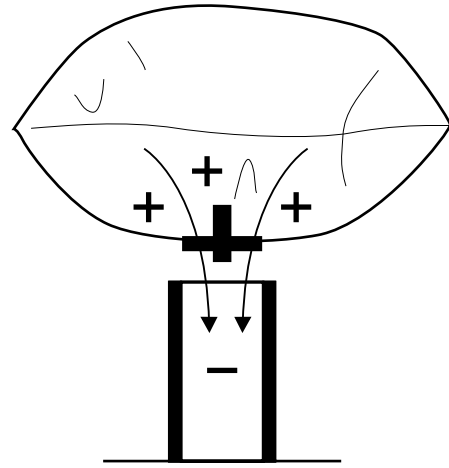
Nombre	Cantidad	Precio	Precio total	Peso	Peso total
Golilla de goma	1	\$80	\$80	0.07g	0.07g
Golilla 1 1/2"	2	\$120	\$240	0.99g	2g
Golilla 1/2"	1	\$45	\$45	0.08g	0.08g
Perno hexagonal	1	\$104	\$104	1.22g	1.22g
Tuerca	2	\$40	\$80	0.15g	0.3g
Tuerca de cabeza	1	\$120	\$120	0.57g	0.57g
Bambú	-	-	-	-	-
Clavo 1"	4	\$10	\$40	0.02g	0.08g
Tubo plástico	2	\$60	\$120	0.05g	0.1g
Cinta aislante	-	\$9	-	0.01g	-
Gancho	-	\$80	-	0.61g	-
Golilla 3D	1	\$36	\$36	0.05g	0.05g
			\$809		4.42g



## PRUEBA DE HERMETICIDAD

Esta serie de experimentos busca determinar la cantidad de material requerido para evitar el escape de aire al exterior. Estos se componen de una bolsa plástica con distintas combinaciones de pernos y golillas succionados en la unión. El nivel de desinflado determina la eficiencia de sellado.

El mayor factor de estos experimentos fue la golilla de goma, lo que demuestra ser una pieza esencial para un sellado perfecto. Distintas combinaciones de tuercas y golillas tienen resultados similares.



• Arriba: esquema explicativo del experimento. La bolsa superior es succionada para

### • Prueba 1

- X2 tuerca 1/4'
- X2 golillas 1'
- X2 golillas 1/2'
- 

• Resultado: desinflado en 20 seg

### • Prueba 2

- X2 tuerca 1/4'
- X2 golillas 1'
- X2 golillas 1/2'
- Goma 1/2'
- 

• Resultado: sin desinflar

### • Prueba 3

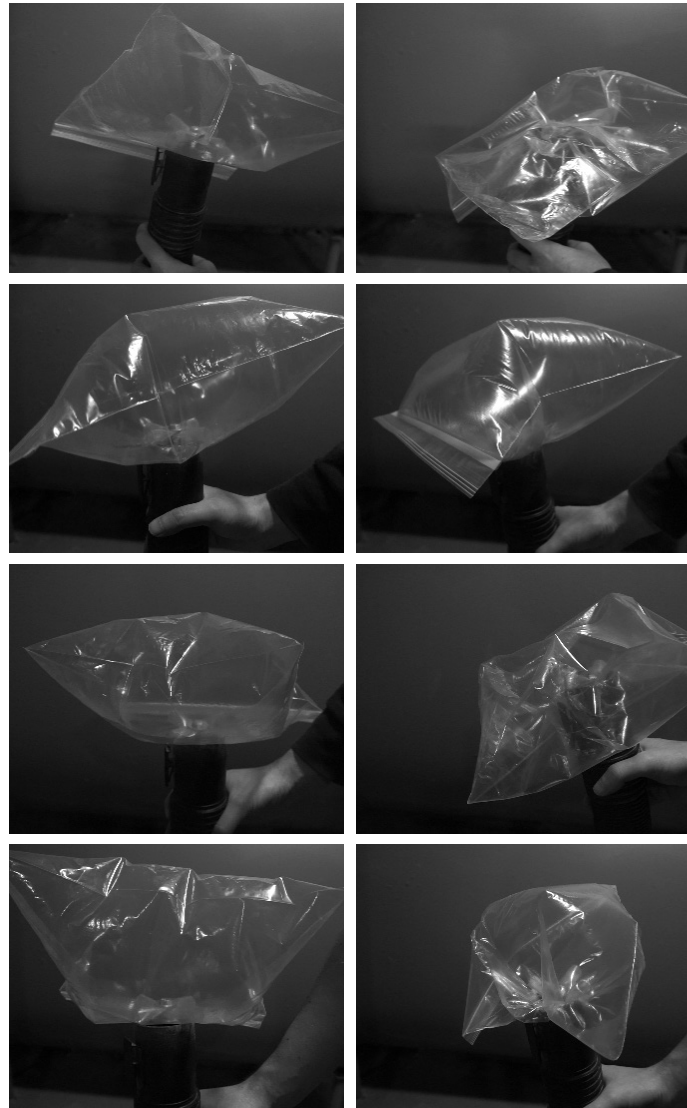
- Tuerca 1/4'
- X2 golillas 1'
- Goma 1/2'
- 

• Resultado: desinflado parcialmente en 60 seg

### • Prueba 4

- X2 tuerca 1/4'
- X2 golillas 1'
- X2 golillas 1/2'
- Goma 1/2'
- 

• Resultado: desinflado parcialmente en 60 seg



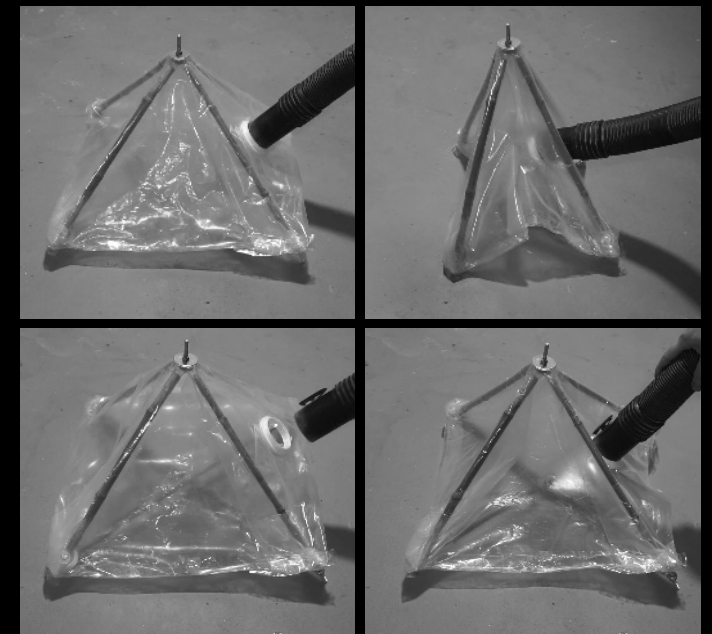
## PRUEBA DE MODULO

Antes de construir un prototipo completo, se armo un modulo para probar el encaje de las piezas, el movimiento, y la resistencia a la compresion.



- Modulo del prototipo A usado para analizar el comportamiento de los materiales
- 35x35x24cm
- Materiales: bambú, tubos plásticos, membrana plástica, y uniones de zinc

• Accionamiento sin restricciones

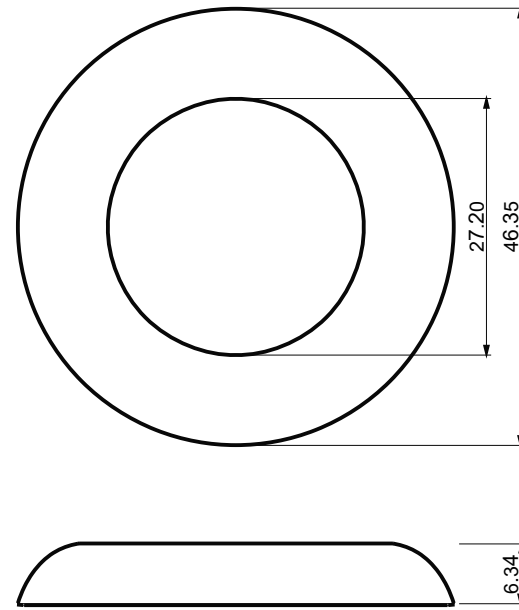


• Accionamiento con restricciones

## RESISTENCIA A LA PRESIÓN

La membrana plástica, al ser sometida a grandes presiones, se quiebra en el punto de mayor estrés, el cual sería la unión con la golilla de metal. Para arreglar esto, se diseñó una pieza que disipara la fuerza de presión a una área mas grande.

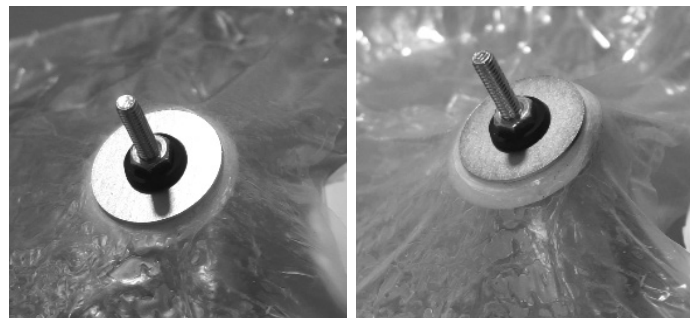
Esta pieza se compone de una golilla impresa en 3d con los bordes redondeados. Las pruebas confirman que esta pieza aumenta considerablemente la resistencia de la membrana, pero no evita que esta se estire, perdiendo su resistencia. Usando un parche plástico en el punto de mayor presión duplica su resistencia. Estos cambios serán necesario para soportar las grandes cargas del prototipo final.



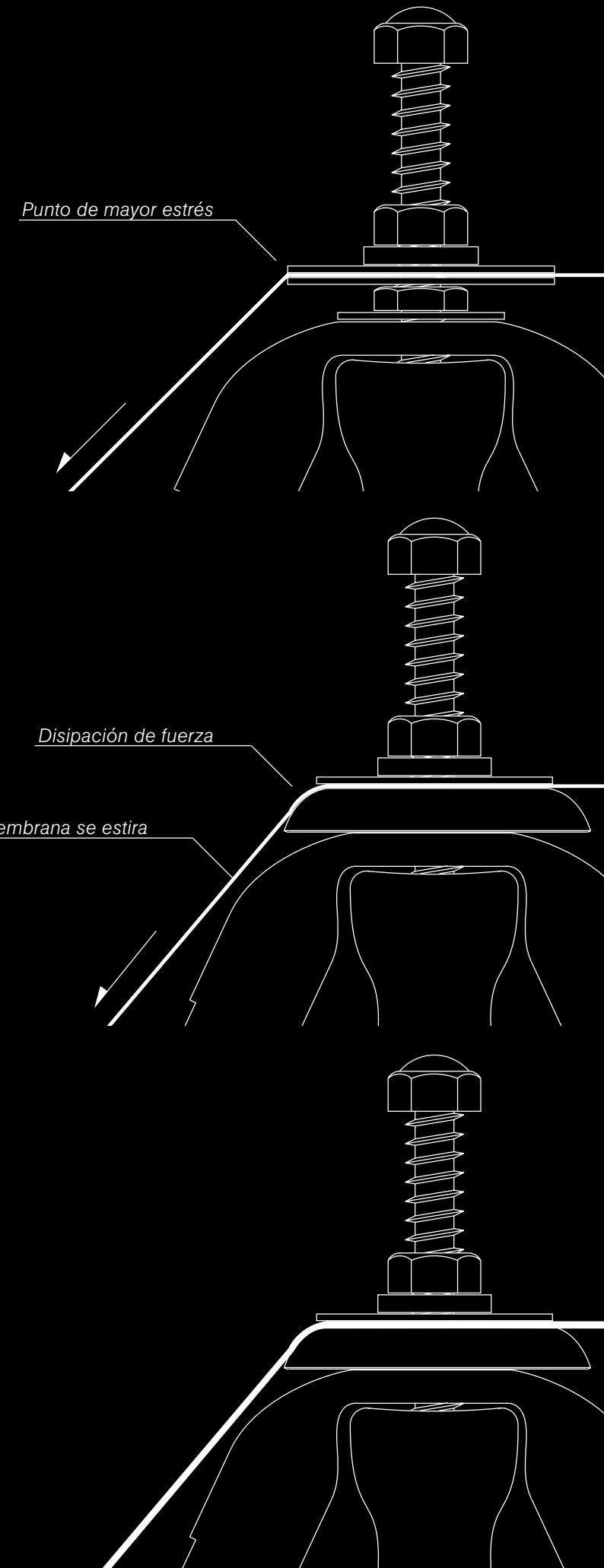
- *Nodo con contacto membrana y golilla de metal*
- *Resultado: la membrana se rompió de forma instantánea al momento de accionar*



- *Nodo con refuerzo plástico*
- *Resultado: la membrana se estiro de forma permanente, pero no sufrió rupturas.*



- *Nodo refuerzo plástico y membrana doble*
- *Resultado: la membrana no sufrió daños*

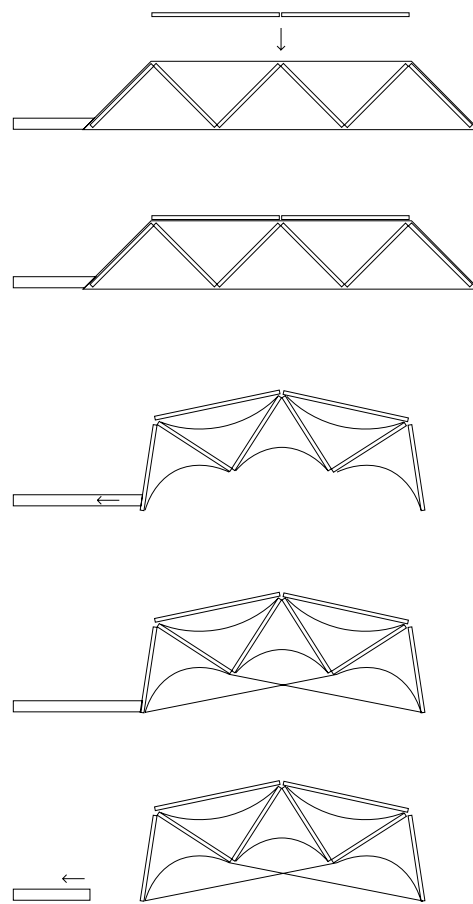


- *Esquemas a la derecha muestran el comportamiento de la membrana con y sin golilla impresa en 3D, y con membrana doble.*

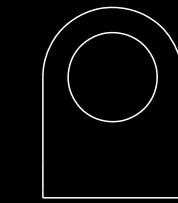
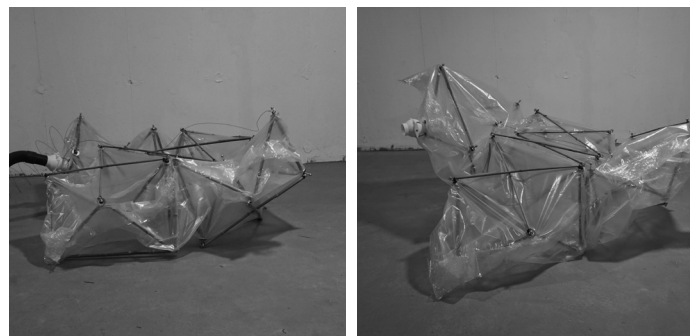
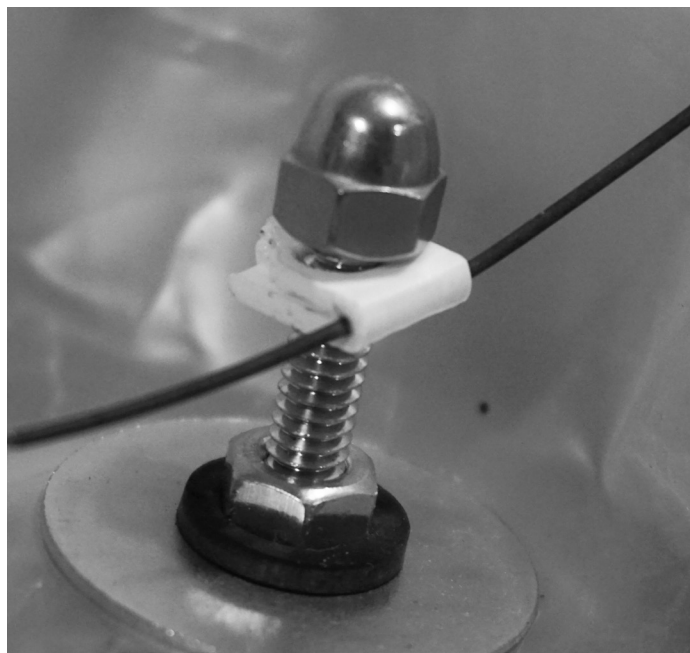


## CLIPS PARA RIGIDIZAR

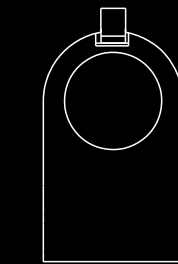
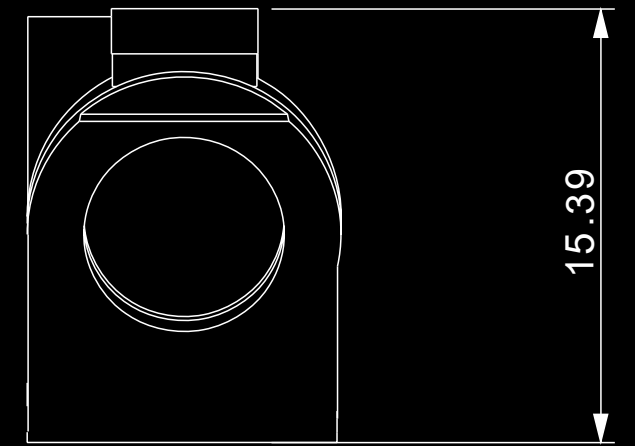
Esta estructura requiere un flujo constante de aire para mantenerse estable ya que necesita contrarrestar la presión perdida. Una forma para sobrepasar esto es creando una estructura externa que afirme los nodos una vez de que sean accionados neumáticamente. Para esto se diseñaron unos clips que unen unos tensores a los nodos de la estructura.



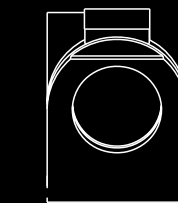
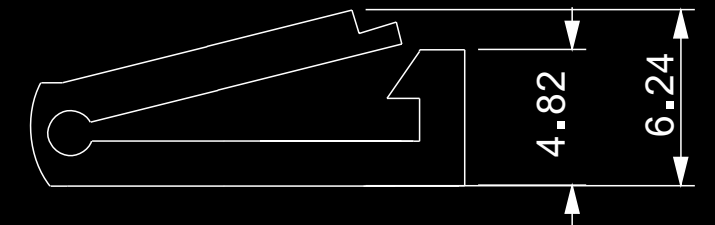
- Izquierda superior: detalle de unión entre clip y nodo.
- Izquierda inferior: diferencia entre un modelo sin y con clips respectivamente.
- Arriba: proceso de colocación de clips. Consisten en: armar la estructura, accionar, colocar clips, y remover la fuente de poder.



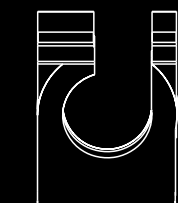
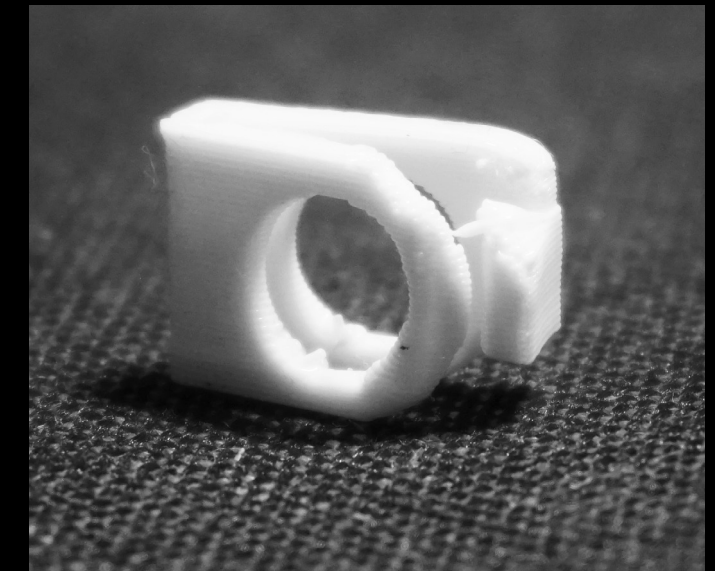
- Modelo 1: impreso plano. Requiere mas espacio para que quepa el alambre y se quiebra fácilmente.



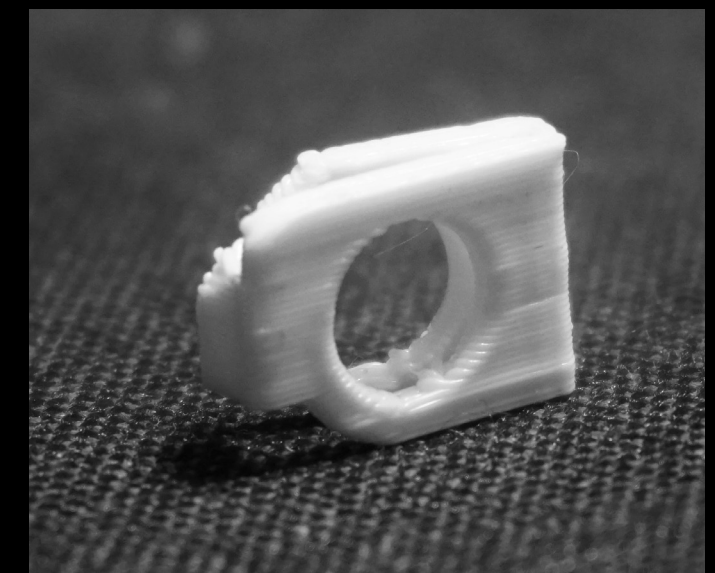
- Modelo 2: Impreso plano. Se quiebra fácilmente en el lado izquierdo al ejercer fuerza.



- Modelo 3: Impreso de lado. Resiste una mayor fuerza, y no se quiebra. El clip mantiene una gran presión.



- Modelo 4: Tiene un corte en la parte superior para que quepa la tuerca, lo que afecta la estructura del modelo.

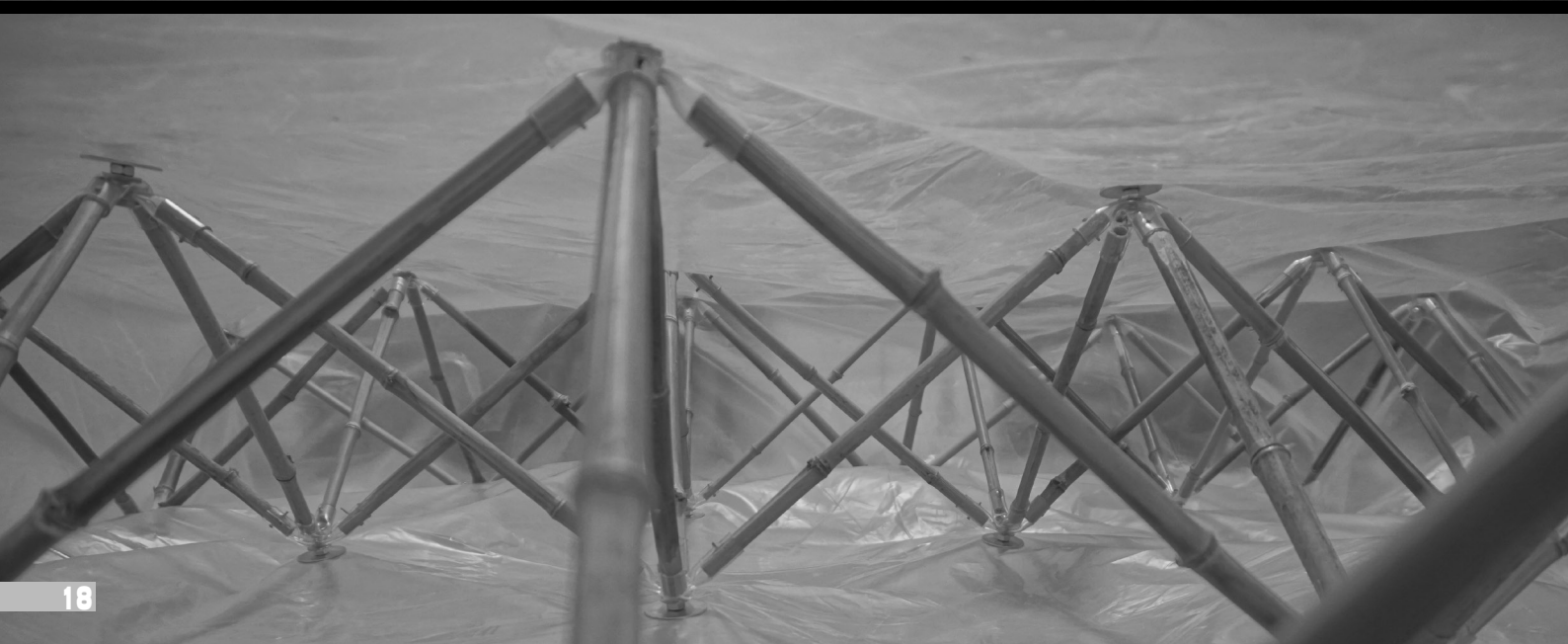
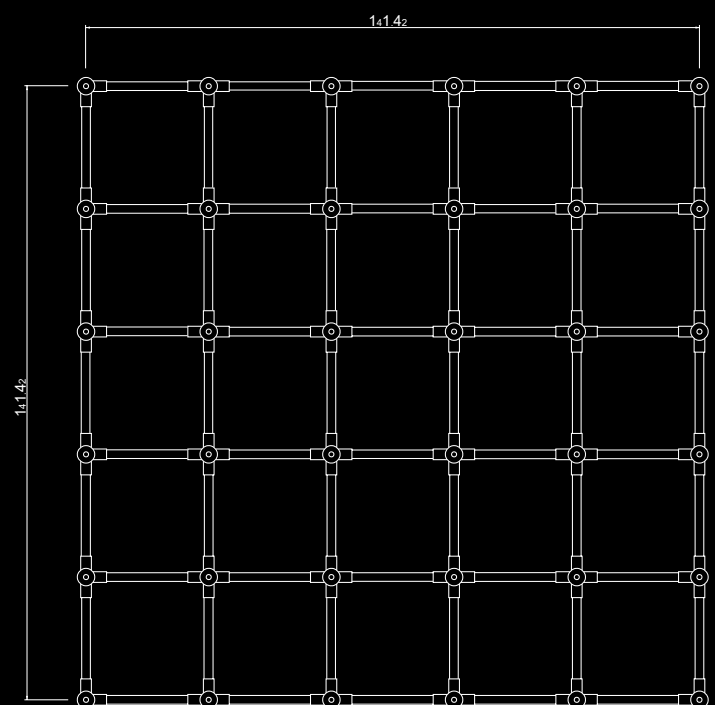
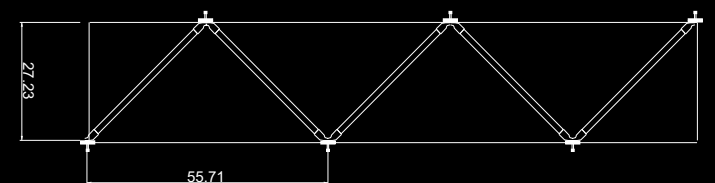




# SECCIÓN DE PROTOTIPO

El propósito de este modelo es crear una sección del prototipo (36 nodos en vez de 143) final, analizar las distintas partes, y ver que aspectos se mantienen o se mejoran para la etapa final.

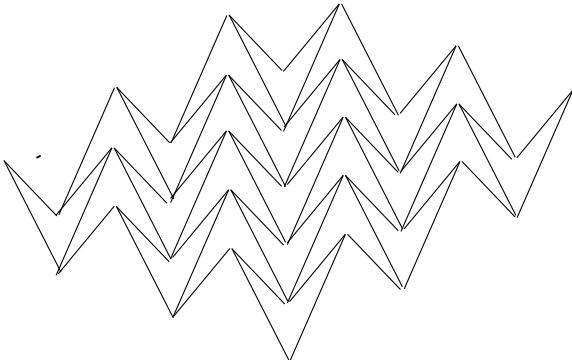
- Derecha: planta y elevación esc1:15
  - 141 x 141 cm
  - 36 uniones
  - 60 barras interiores
  - 15 barras exteriores



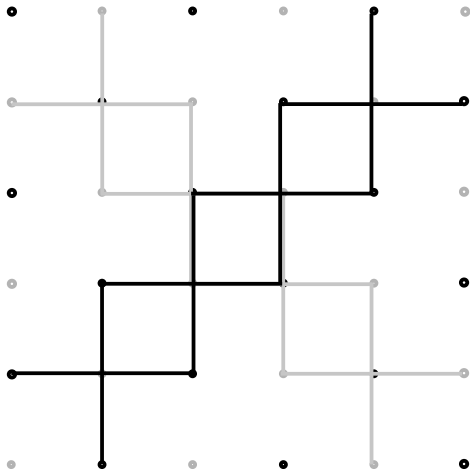
- Izquierda superior: espacio generado bajo el prototipo al momento de ser accionado.
- Izquierda inferior: estructura interior del prototipo

# VARIACIONES GEOMÉTRICAS

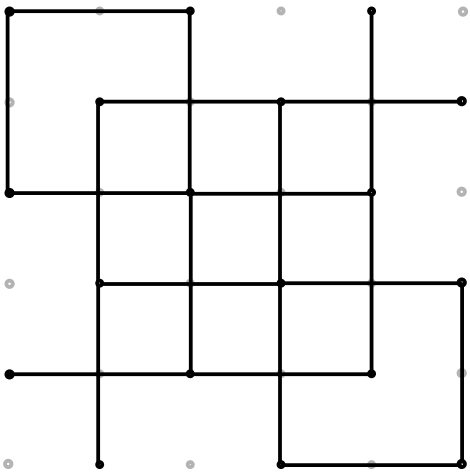
Compresión lineal



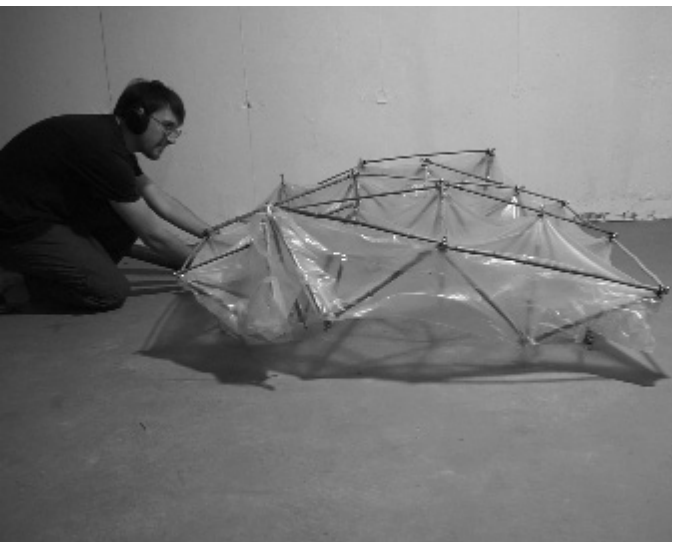
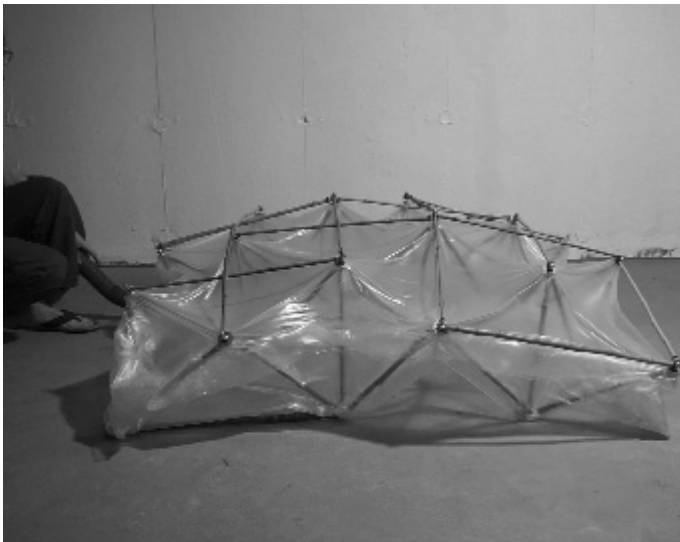
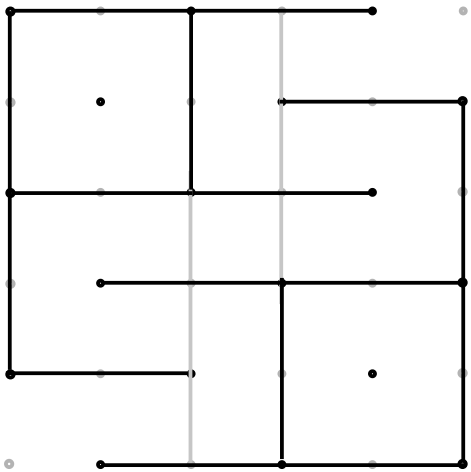
Configuración doble curvatura



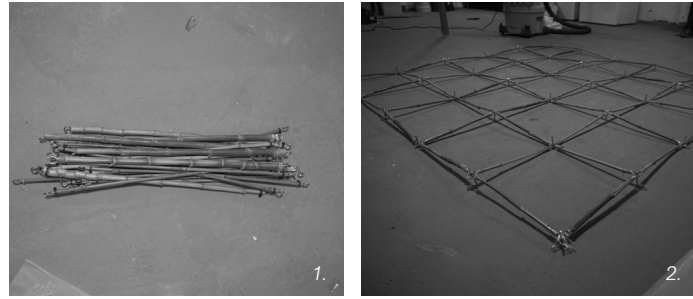
Configuración bóveda



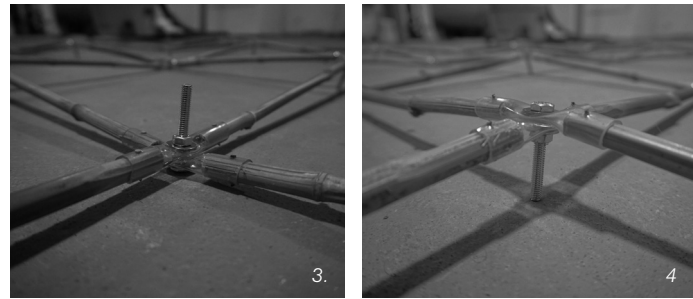
Configuración arco



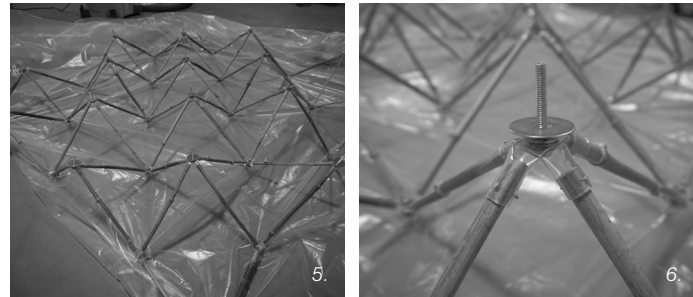
# PROCESO DE CONSTRUCCIÓN



- 1. Palos de bambú usados para la estructura externa
- 2. Palos de coligue usado para la estructura interna



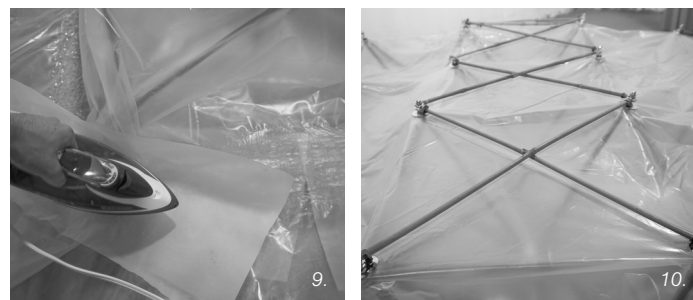
- 3-4. Uniones de plástico con pernos



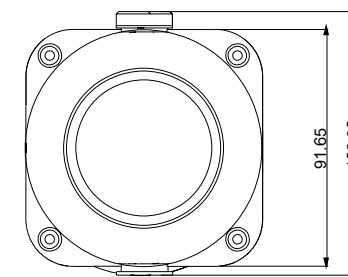
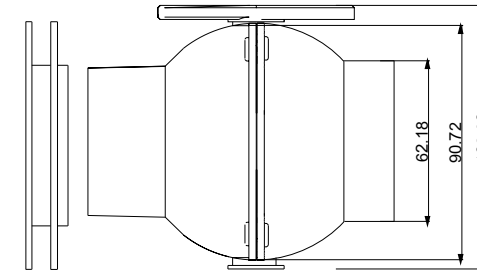
- 5-6. Uniones de plástico con pernos



- 7-8. Uniones de perforación con estructura externa



- 9. Sellado mediante calor usando plancha
- 10. Combinación de estructura externa para crear una nueva forma



- Válvula impresa en 3d junto con el conector de membrana..  
Modelo base sacado de [thingiverse.com/thing:4578649](https://www.thingiverse.com/thing/4578649)



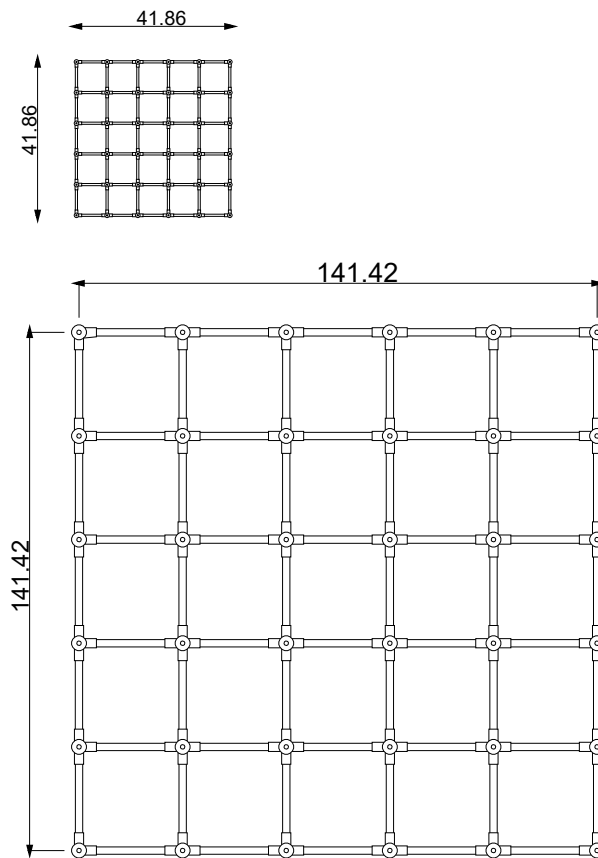
- La presión alta al interior de la estructura, junto con las golillas de los nodos causa rupturas en la membrana. Para evitar posibles rasgaduras se refuerza con una doble membrana





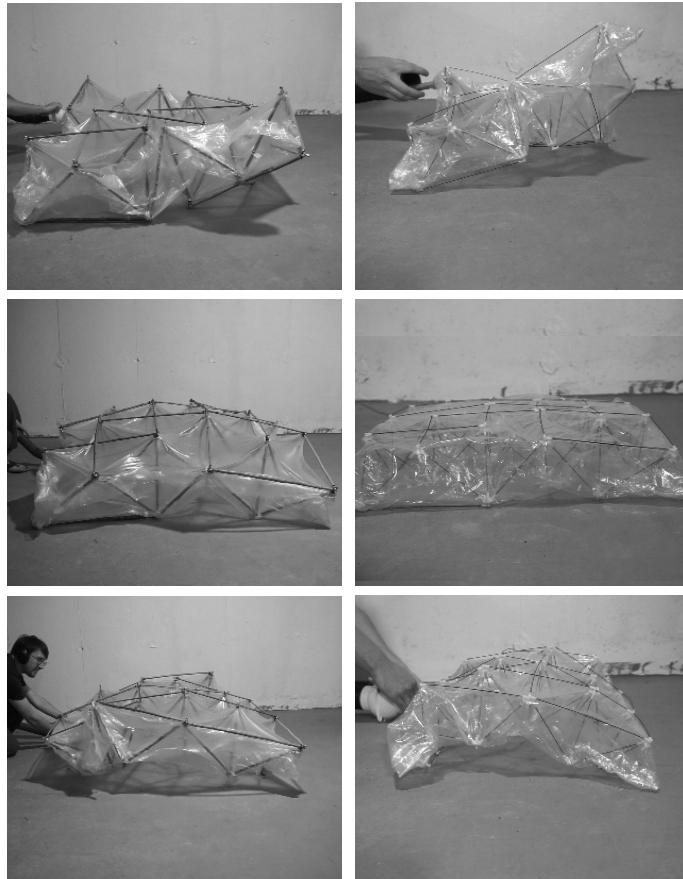
# COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DE GRAN Y PEQUEÑA ESCALA

Al escalar, la estructura cambia su comportamiento. Cosas como resistencia de los materiales, gravedad y fuerza de succión tienen mayor relevancia. Las imágenes de abajo muestran la diferencia entre un modelo de 140x140cm vs 41x41cm. Los dos se comportan de forma similar, pudiendo producir formas similares. El modelo de escala pequeña puede producir movimientos más pronunciados ya que la otra membrana no resiste grandes presiones internas (roturando antes de llegar al mayor punto de accionamiento), y además es más afectado por la fuerza de gravedad.



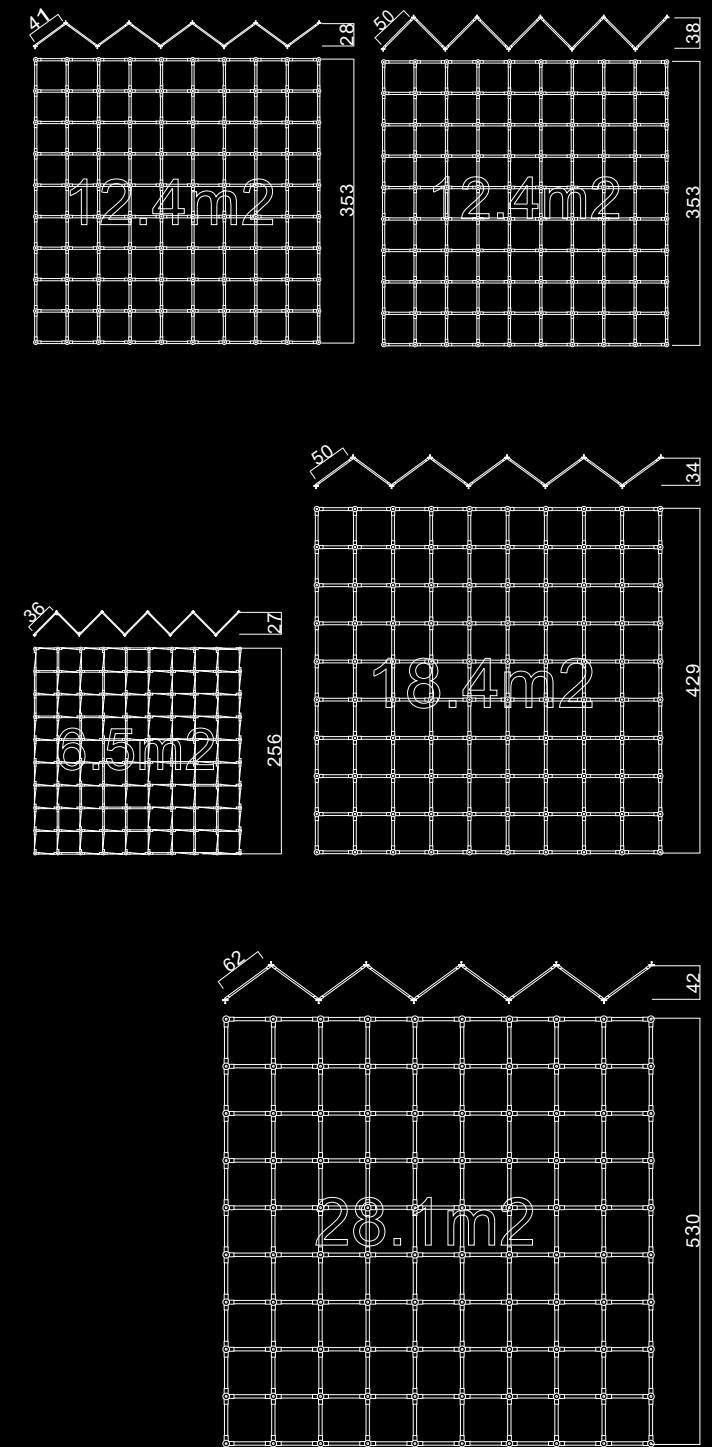
Maqueta de 141x141

Maqueta de 41x41



- Izquierda: comparación entre los modelos de 141x141cm y de 41x41cm usando distintas geometrías.
- Arriba planos de las maquetas, las proporciones son mantenidas

• Existen distintos parámetros al momento de escalar la estructura: el largo de las barras, la cantidad de nudos, y el espesor de la estructura. El largo de las barras determina el espacio entre los nudos

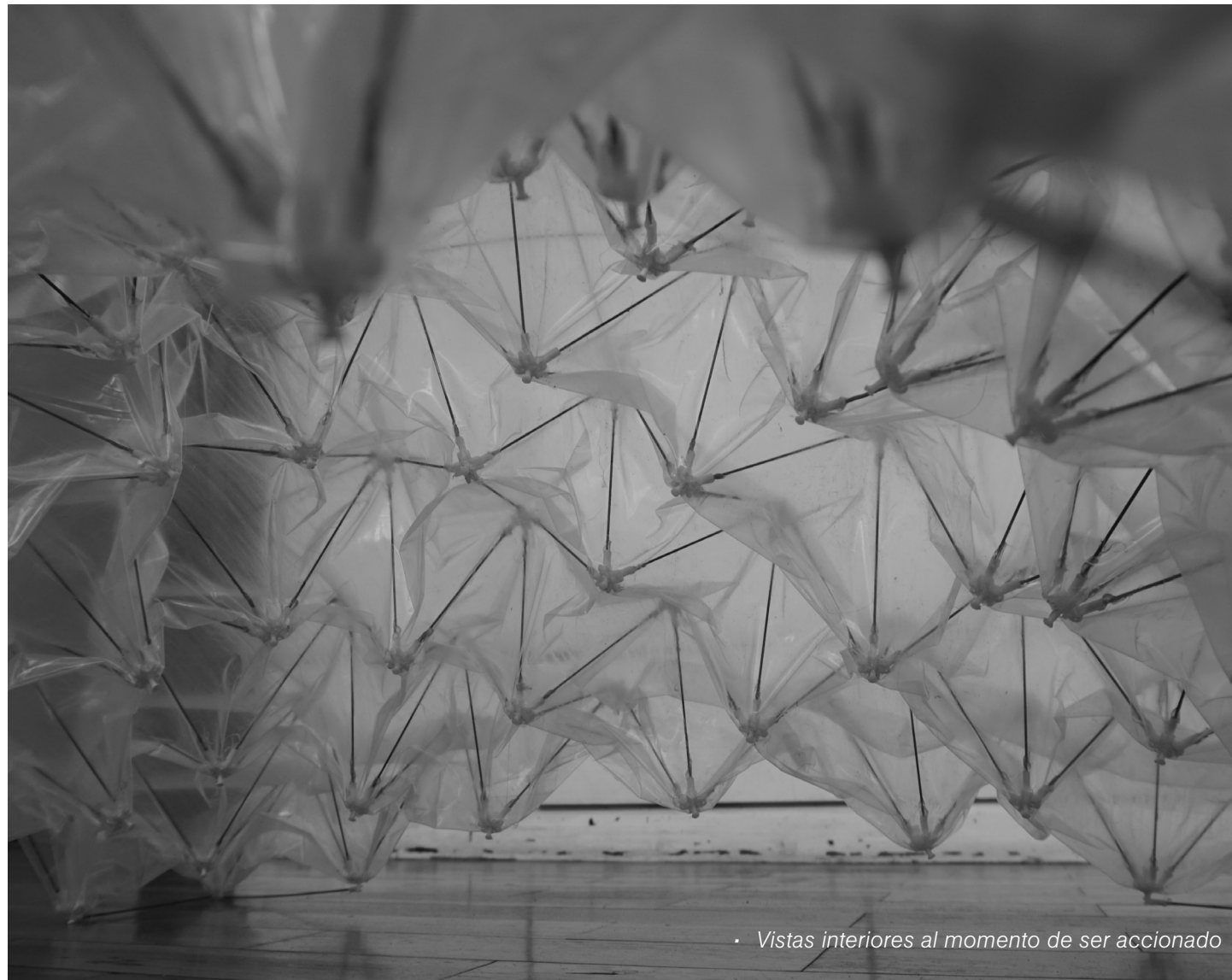


**DISEÑO DEL PROTOTIPO FINAL**



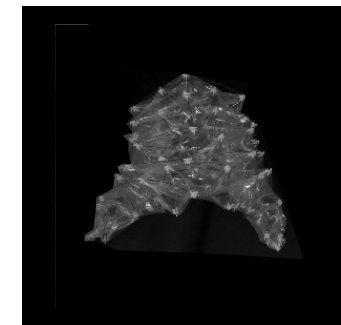
## MODELO FINAL A ESCALA

Antes de empezar a construir el modelo final, se creó una maqueta de escala 1:5 para analizar los movimientos, y ver las diferencias entre modelos de distintas cantidades de nodos. A diferencia de uno de los modelos anteriores de 99 nodos, este tiene 143. No se observaron cambios grandes entre estos dos modelos, ya que ambos pueden producir formas complejas sin problemas. Estos cambios pueden ser más notables con una mayor cantidad de nodos, pero se puede considerar como una diferencia estética.

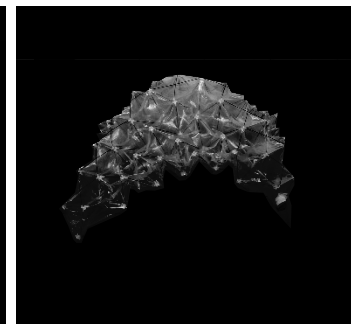
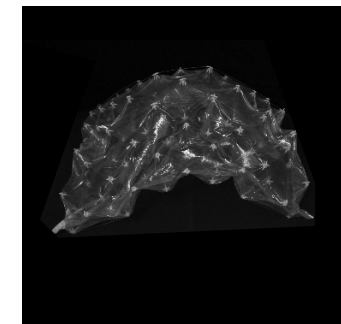
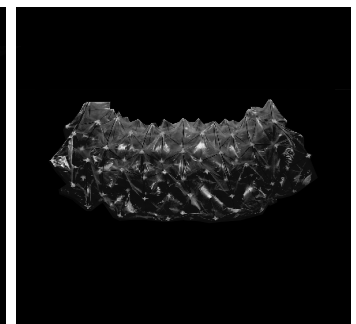
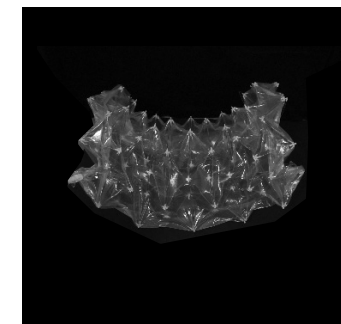
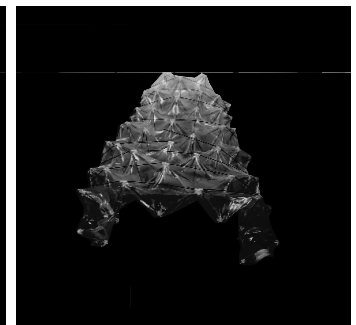


• Vistas interiores al momento de ser accionado

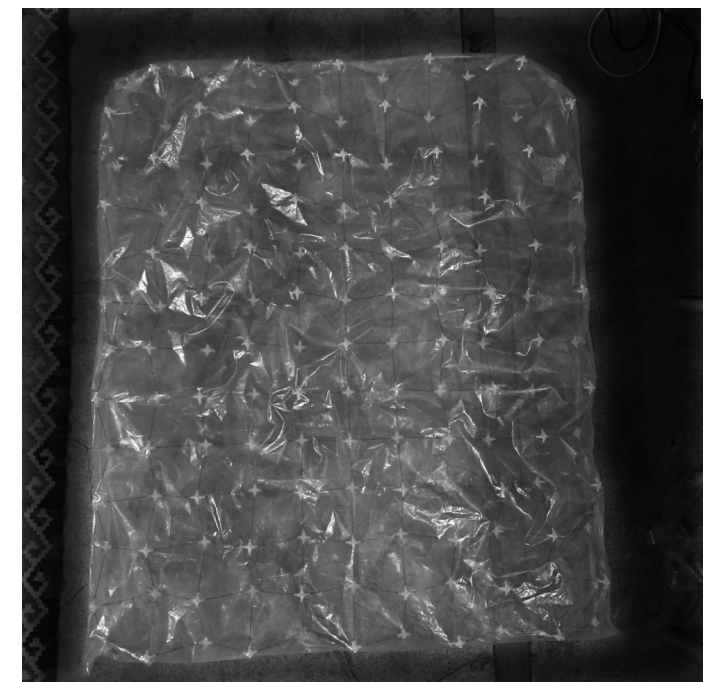
Maqueta de 9x11 nodos



Maqueta de 11x13 nodos



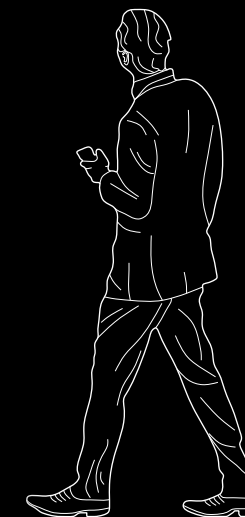
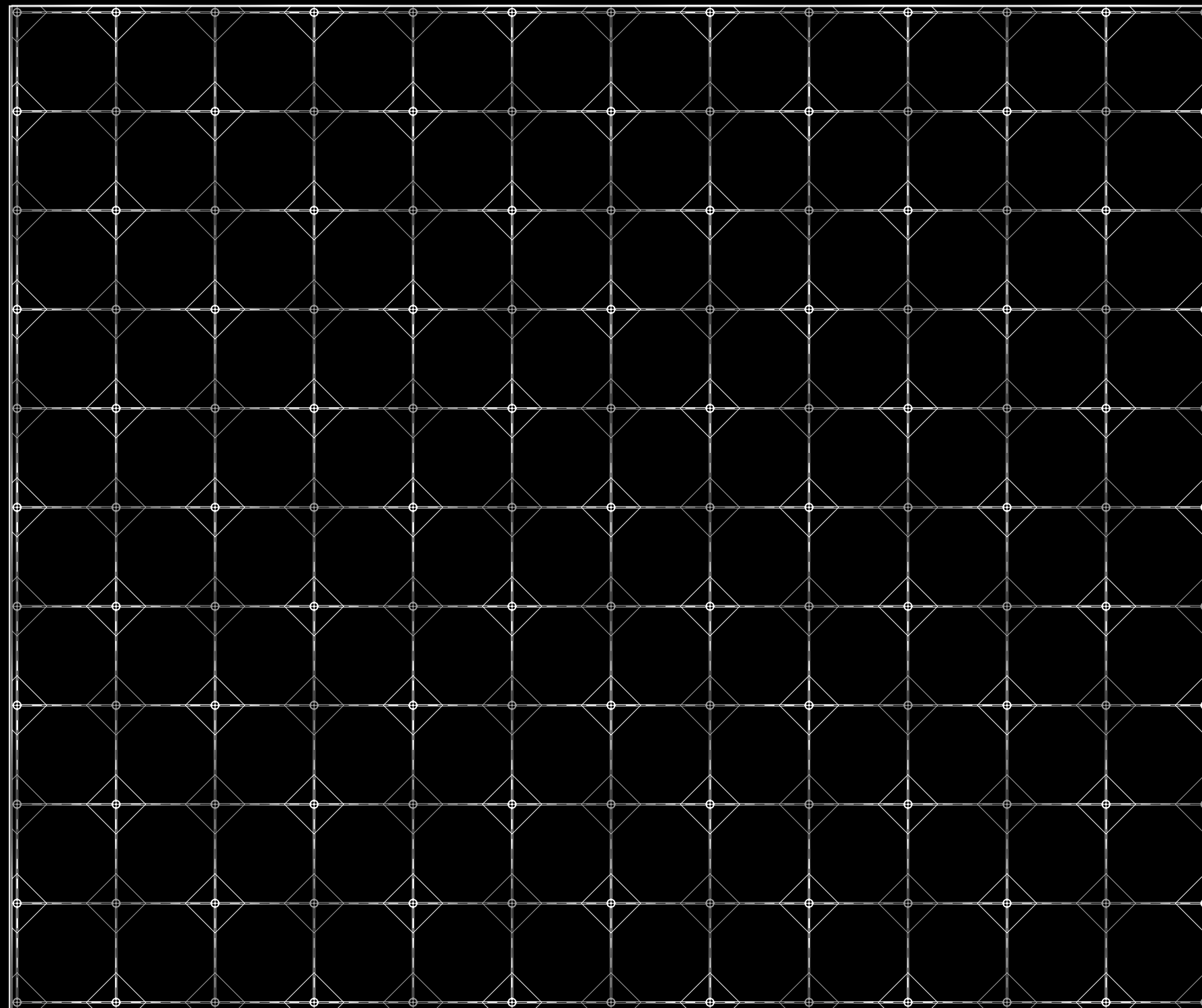
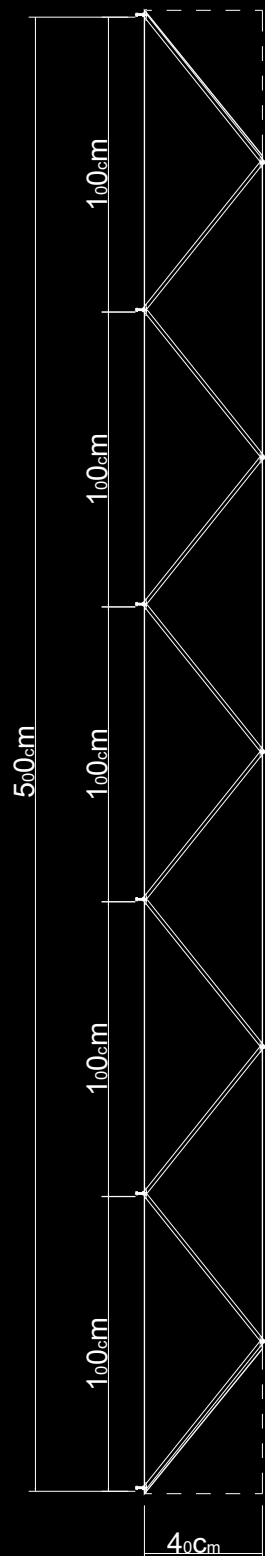
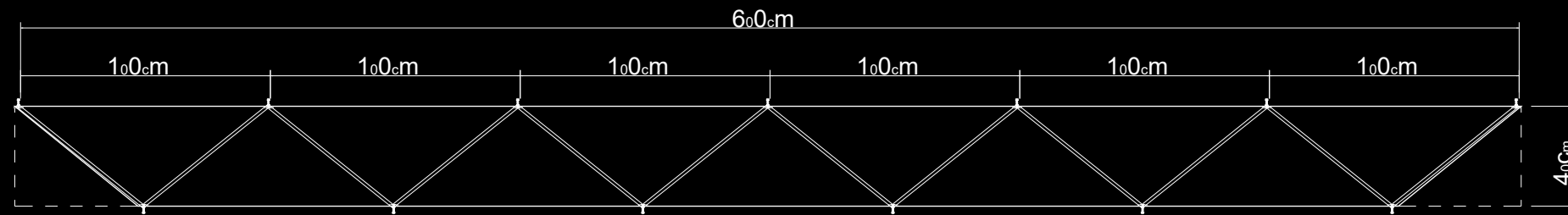
- Comparación entre distintas combinaciones geométricas de una maqueta de 9x11 nodos y una de 11x13 nodos.



- Maqueta de 11 x 13 nodos.
  - 90cm x 120cm



# PLANOS PROTOTIPO

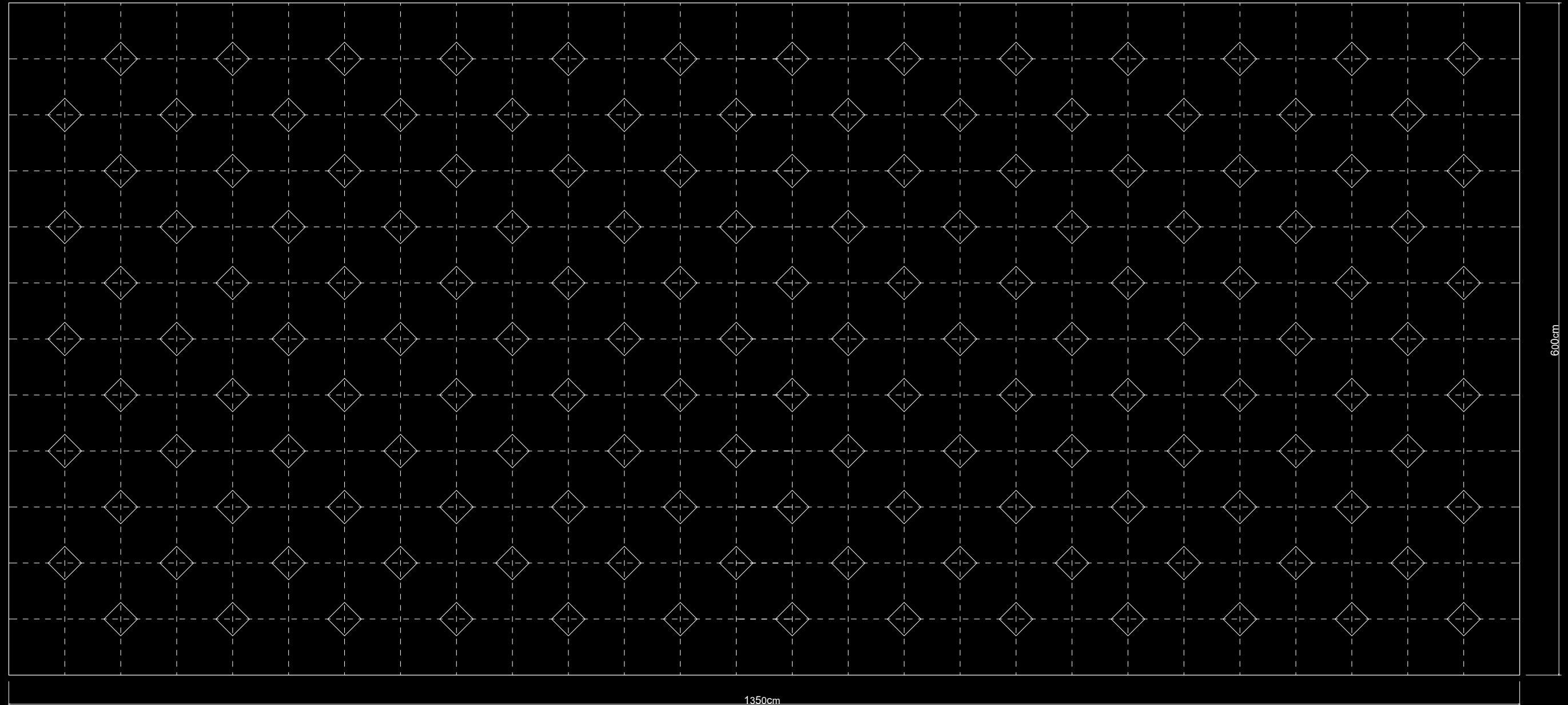


Nombre	Cant.	Precio tot.
Golilla de goma	143	\$11.440
Golilla 1 1/2"	286	\$34.320
Golilla 1/2"	143	\$6.435
Perno hexagonal	143	\$14.872
Tuerca	286	\$11.440
Tuerca de cabeza	143	\$17.160
Colihue	274	-
Clavo 1"	548	\$5.480
Tubo plástico	300	\$25.000
Cinta aislante	75	\$5.000
Gancho	150	\$15.000
Golilla 3D	143	\$8.000
Membrana	1	\$55.000
		\$243.147

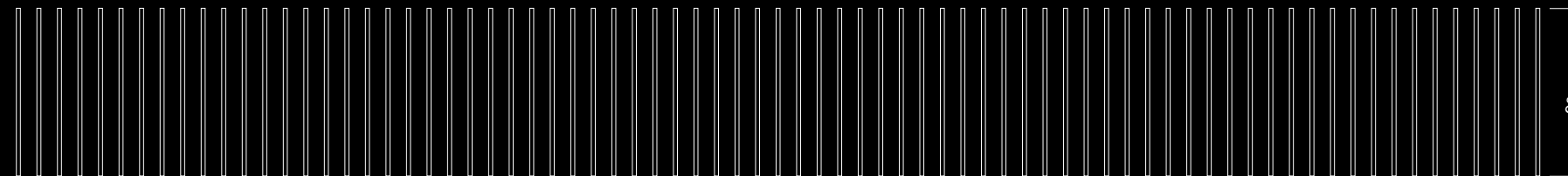


# MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PROTOTIPO

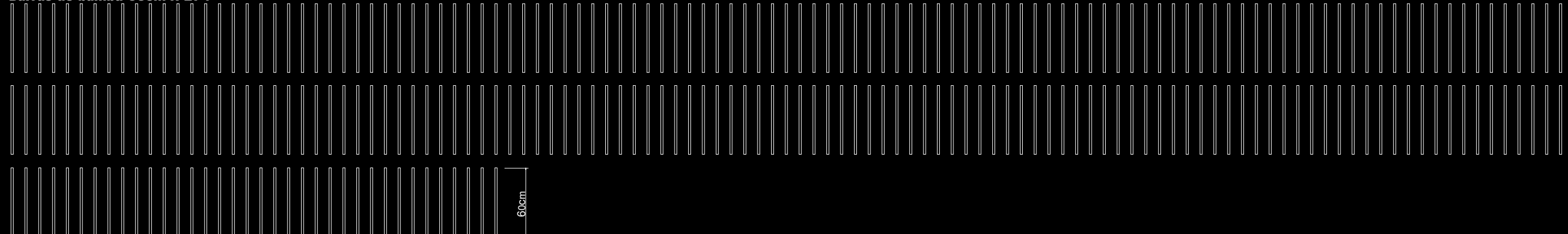
Membrana plastica 6m x 13.5m



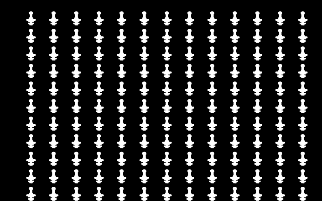
Barras de bambu 98cm x 75

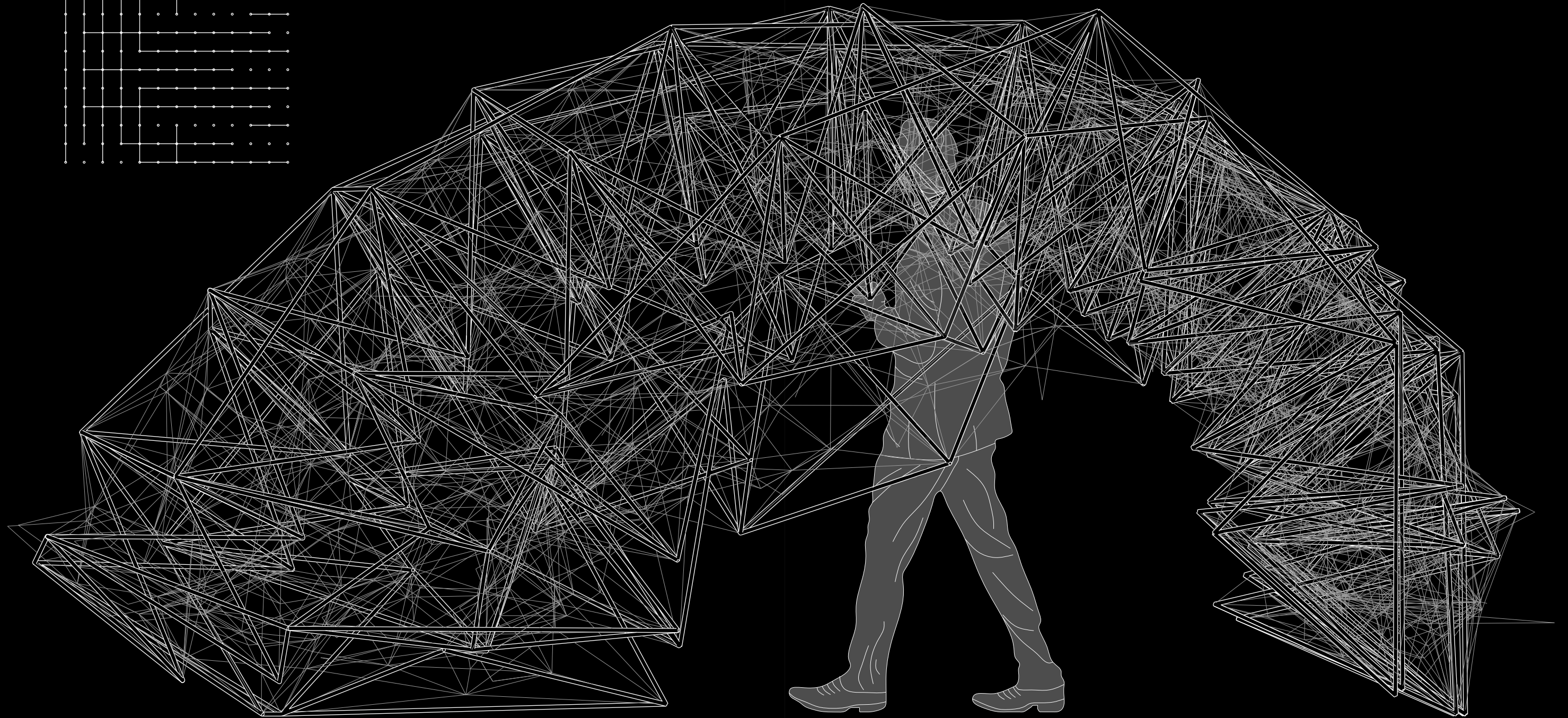
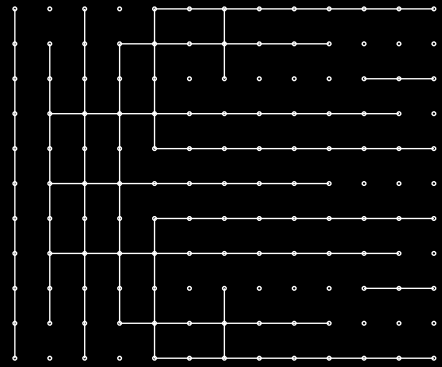


Barras de bambu 60cm x 274



Uniones x 143









## BAMBÚ

Uno de los recursos mas grandes para la fabricación de esta estructura es el bambú. Esta es una planta que crece en el sector central y sur de Chile.

Al ser un material liviano, resistente, y barato, lo hace ideal para este proyecto. Además, al ser un material renovable, reduce emisiones y desechos energéticos.

La desventaja es que requiere una gran cantidad de trabajo para preparar. También, presenta inconsistencias en su largo, lo que podría provocar problemas estructurales, requiriendo encontrar una forma de probar su resistencia antes de ser colocadas

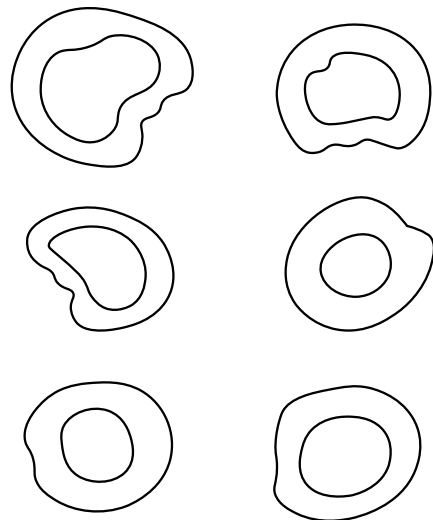




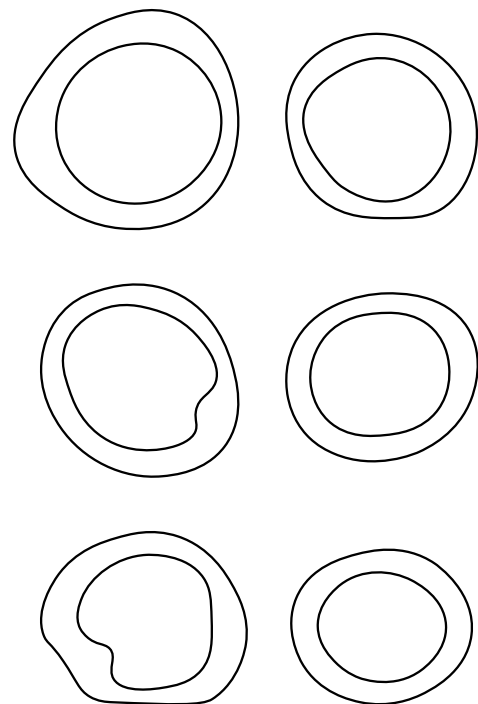
# COSECHA DE BAMBÚ

**Duración:** 1.5 semanas

La primera etapa de la construcción del prototipo consisten en cosechar y cortar bambú según medida. Esto requiere una selección cuidadosa, solo usando los que no tienen grandes imperfecciones, y con un diámetro suficiente para la unión con mangueras plásticas. Se usaron dos tipos de bambús distintos, uno con un menor diámetro pero más denso para el uso de la estructura interior, y otro de mayor diámetro y menos denso para la estructura exterior.

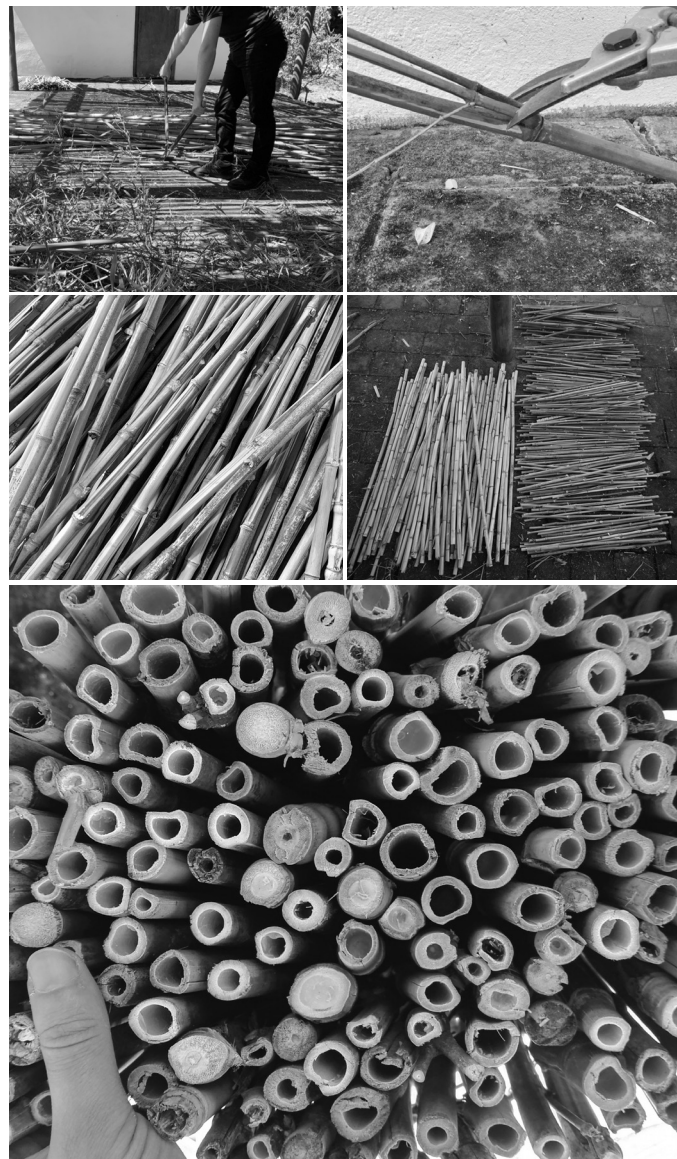


- *Bambú Phyllostachys viridiglaucescens*
- *Uso para estructura interior*



- *Bambú Guadua*
- *Uso para estructura exterior*

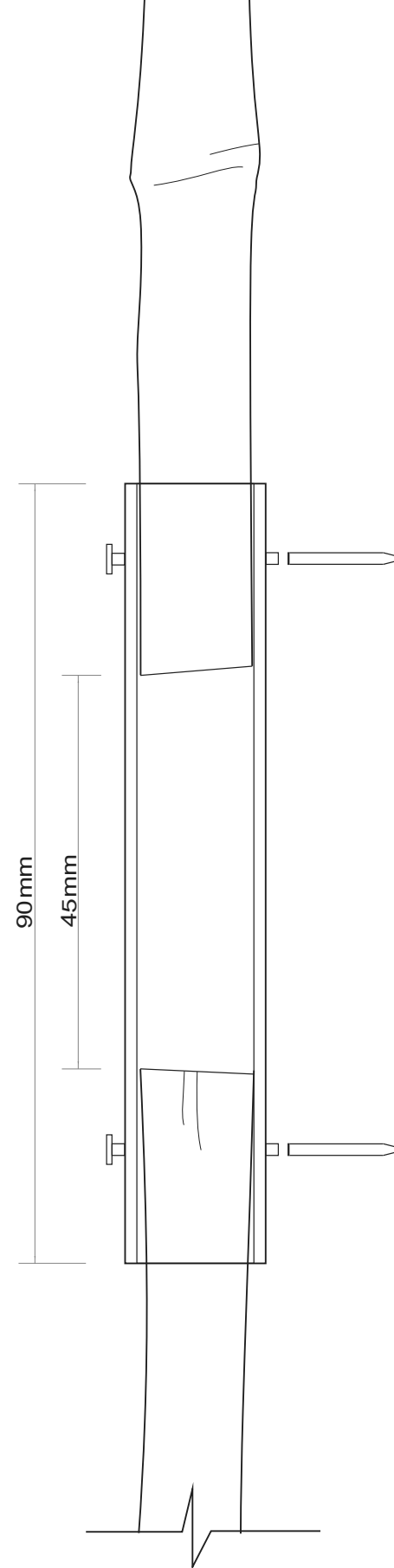
• *Izquierda: proceso de cosecha, limpieza y organización de las piezas de bambú.*



# UNIÓN DE BARRAS

**Duración:** 1.5 semanas

Unión de barras de bambú usando mangueras plásticas de 9.5cm con un clavo de 1" en cada lado. El resultado final consiste en crear 13 tiras de 10 barras, y 11 tiras de 12 barras.



- *Arriba: detalle constructivo de la unión entre bambú y tubo plástico*
- *Derecha: lugar de trabajo detalle de las uniones.*





## FORMACIÓN DE MALLA

**Duración:** 1 día

Usando las tiras de barras creadas previamente, se creó una grilla de 11 x 13 nodos. Estos fueron conectados por tornillos de 1/4" de forma entrecruzada. Es importante notar que estos deben ir en dirección de los clavos, para evitar que se rompa la membrana mas adelante.

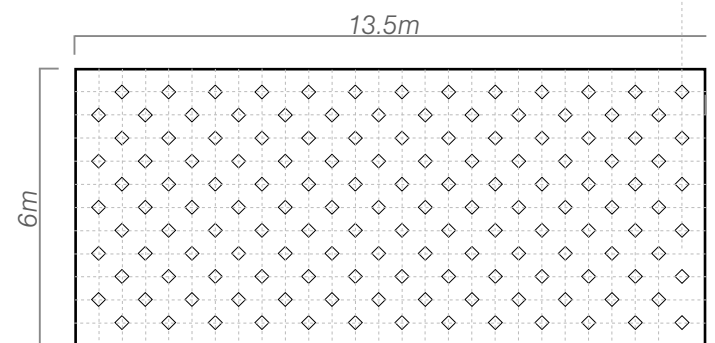
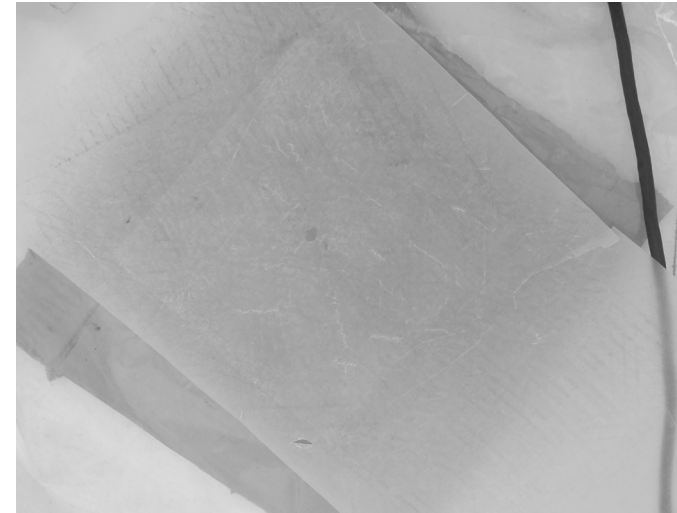
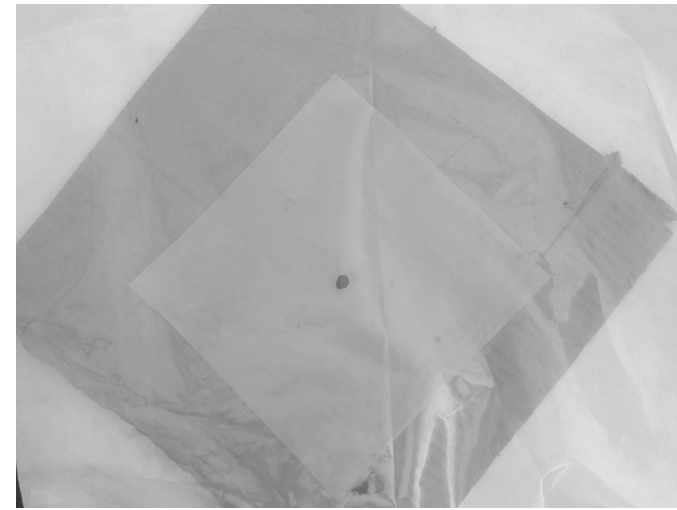


- Derecha: proceso de unión de las barras durante un periodo de 7 horas
- Arriba: detalle de la malla compacta.

## PARCHES PLÁSTICOS

**Duración:** 2 días

Para agregar resistencia a la membrana, se agregaron parches plástico en los nodos, esto fue realizado mediante sellado por calor. Previamente, la membrana fue marcada con la ubicación de los nodos con un metro de distancia entre cada uno.



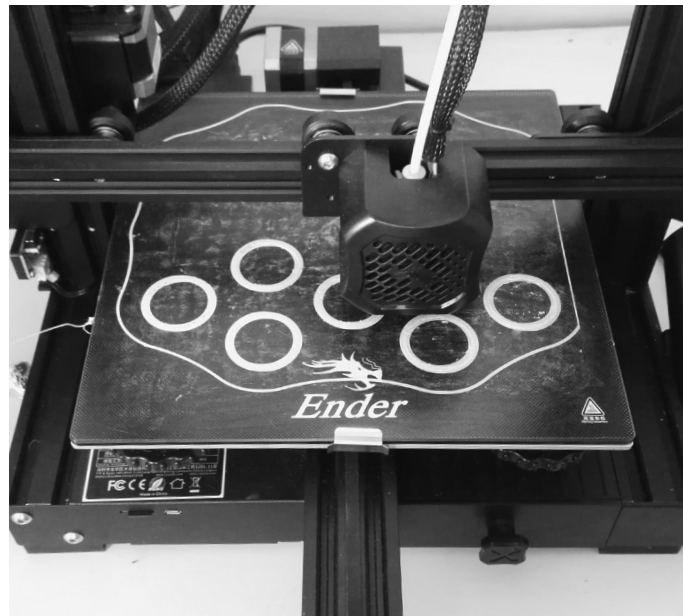
- Izquierda: proceso de unión entre plástico y parches
- Abajo: Lugar de trabajo



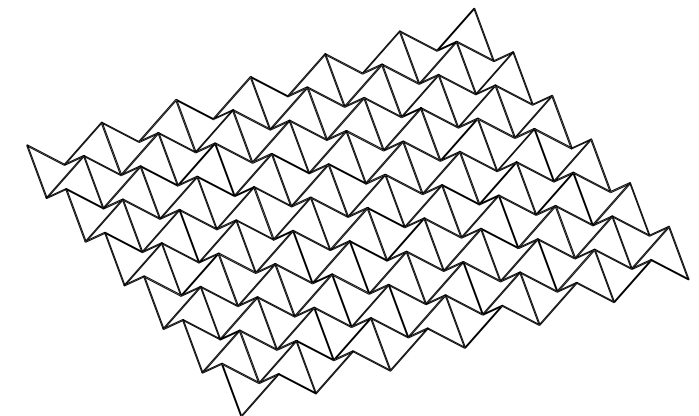
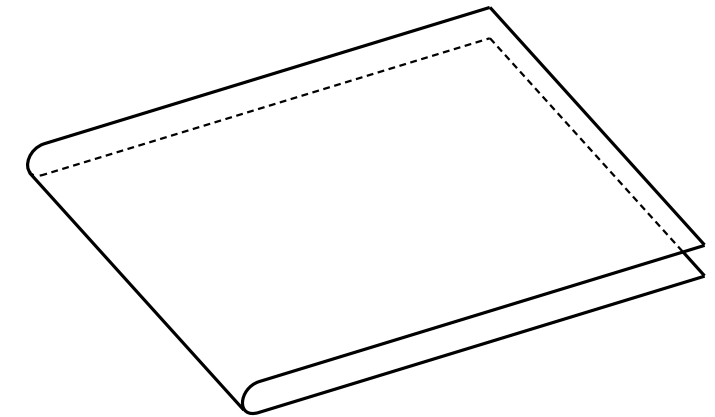
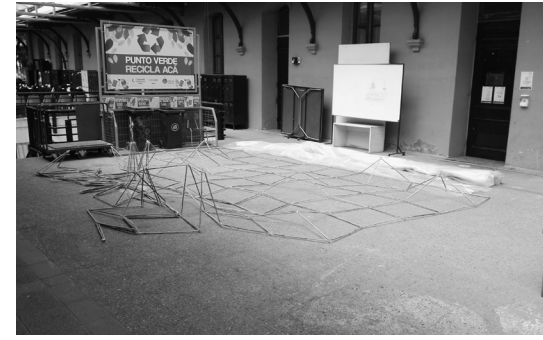
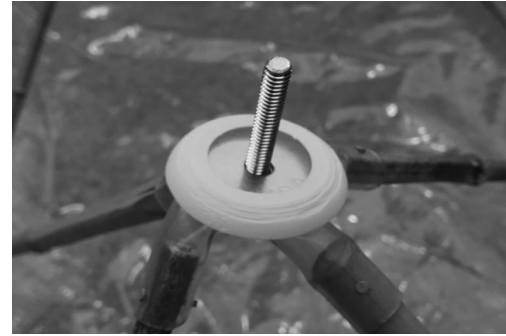
# UNIÓN MEMBRANA BAMBÚ

**Duración:** 1 día

Este paso consiste en unir la grilla de bambú con la membrana plástica. Antes de empezar, se imprimieron 143 golillas (visto en el capítulo de "resistencia a la presión"), lo que se demoró 17 horas, repartidas en 8 sesiones.



- Derecha: pasos para armar los nodos
- Arriba: proceso de impresión 3D de 143 golillas.



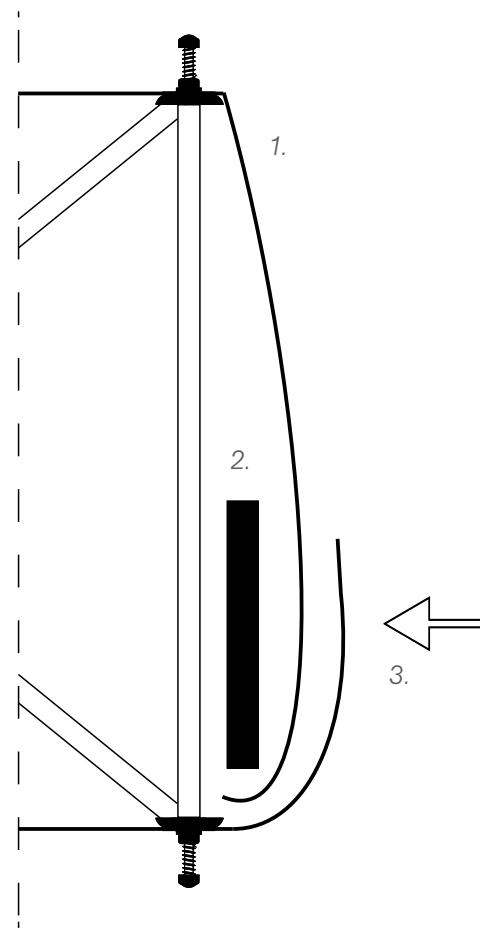
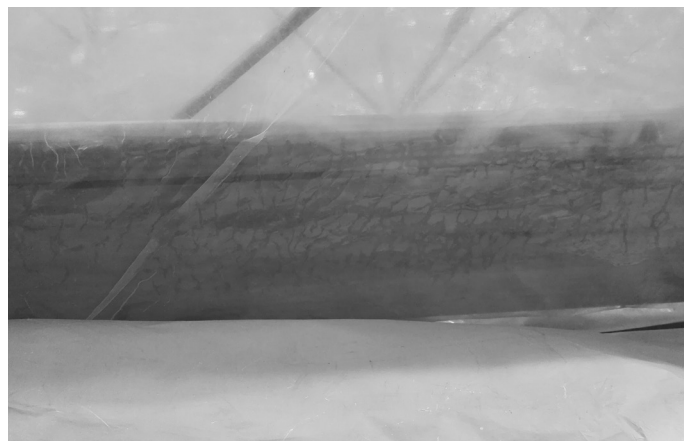
- Arriba: proceso para unir la membrana con el bambú, durante un periodo de 10 horas
- Derecha superior: tramo creado al unir la membrana con el coligue.
- Izquierda inferior: estructura comprimida para transportar



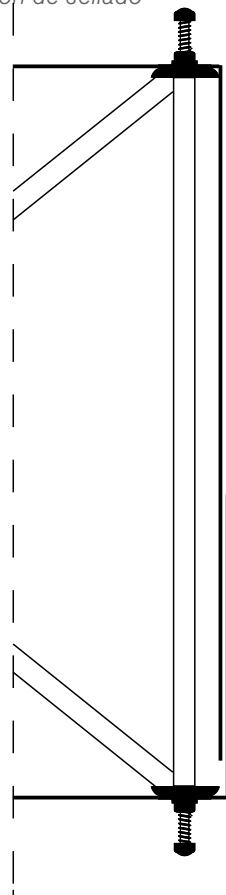
## SELLADO

**Duración:** 1 día

Al igual que la etapa de los parches, se unieron los plásticos mediante calor. Es necesario colocar un apoyo en el interior para unir ambas capas. El exceso de membrana después del sellado es desechado.



- 1. Membrana plástica
- 2. Apoyo para sellado
- 3. Aplicación de sellado



- Arriba: proceso de sellado de la membrana
- Izquierda: detalle de un listón de madera usado como apoyo

## BARRAS EXTERIORES

**Duración:** 2 días

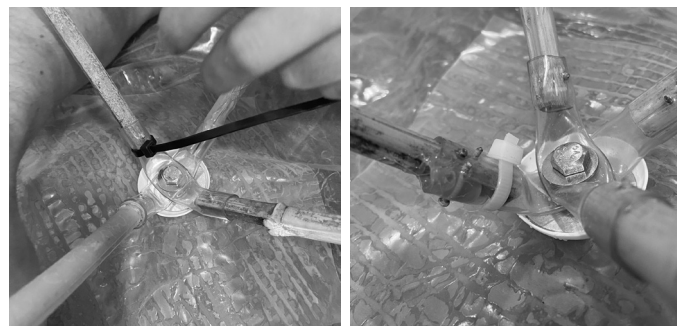
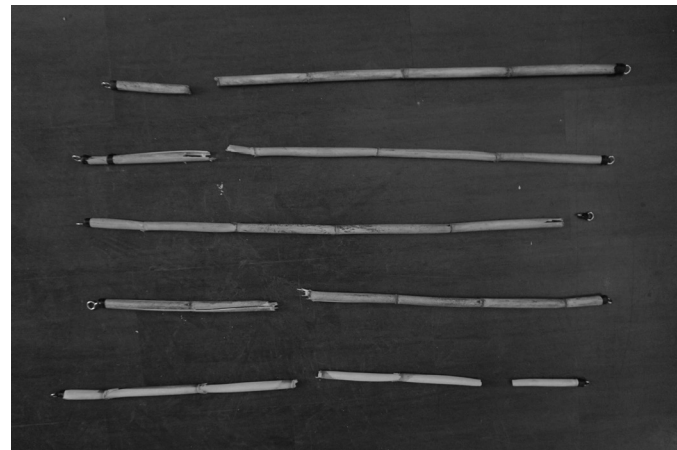
Las barras exteriores se componen de trozos de bambú con anillos metal en cada lado. Para adhesión, se colocó un trozo de arcilla amarrado con cinta adhesiva, las puntas del bambú están cortadas para mejorar la tracción.



- Arriba: proceso para armar barras. Vista exterior del prototipo
- Derecha: barras exteriores finales

## MANTENCIÓN Y REPARACIÓN

Al ser un modelo sellado, su mantención resulta ser difícil. Pero existe suficiente espacio en su interior para hacer reparaciones simples. Entre las cosas que podrían fallar son las barras de bambú, y los nodos los cuales los unen. Los nodos son especialmente frágiles al momento de ser transportado, lo que llevo a colocar refuerzos en las piezas mas frágiles. Se usaron amarracables y silicona caliente para rellenar. Las barras exteriores son sometidas a grandes presiones, lo que puede llevar a que las mas débiles (trizados, delgados, curvos, o viejos) se rompan.



• Abajo: vista al interior del prototipo, donde hay espacio suficiente para hacer arreglos simples.

• Derecha: vista exterior del prototipo



• Barras exteriores quebradas por la fuerza de presión. Estas presentaban problemas antes de ser quebradas.

• Refuerzos colocados en las uniones mas débiles, usando amarracables, y silicona caliente como relleno.



**PRUEBAS DEL PROTOTIPO**





## PRUEBA 1: ACCIONAMIENTO LINEAL

Esta prueba consiste en succionar el prototipo sin la estructura exterior. Esto sirve para comprimir la estructura para transportar. También sirve para revisar las distintas partes y hacer mantenimiento, que este bien sellado, que las piezas estén bien amarrada y para revisar que la membrana resista la presión interna.

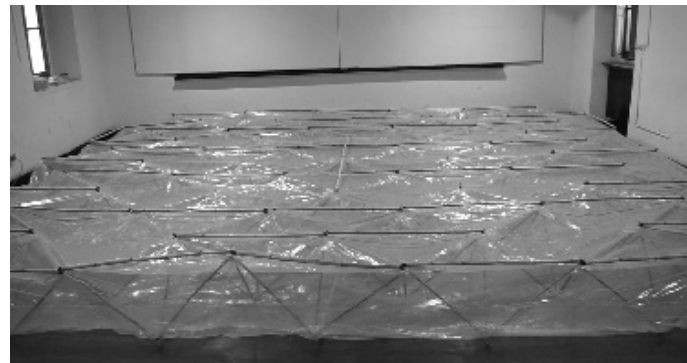


- Derecha: prototipo en proceso de compresión.
- Izquierda: proceso de accionamiento durante un periodo de 6:30



## PRUEBA 2: ARCO

La primera prueba del prototipo consiste en crear una forma de arco. La forma final se desvió de esta debido a que las barras longitudinales no llegaban a piso, causando que se comprimiera en los lados. El accionamiento fue exitoso, levantándose solo usando una aspiradora, y sin causando rupturas ni quiebres



• Arriba: vista al interior del prototipo

• Derecha: proceso de accionamiento durante un periodo de 6:30

• Pagina opuesta: levantando el prototipo durante el accionamiento



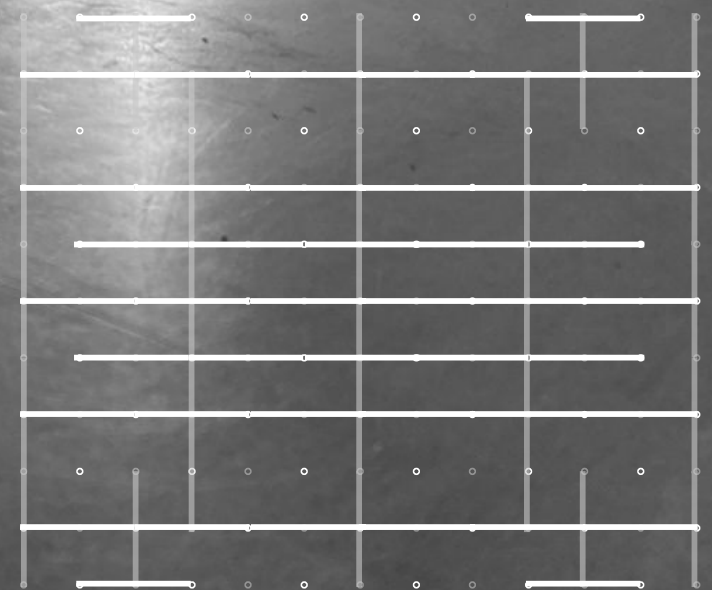
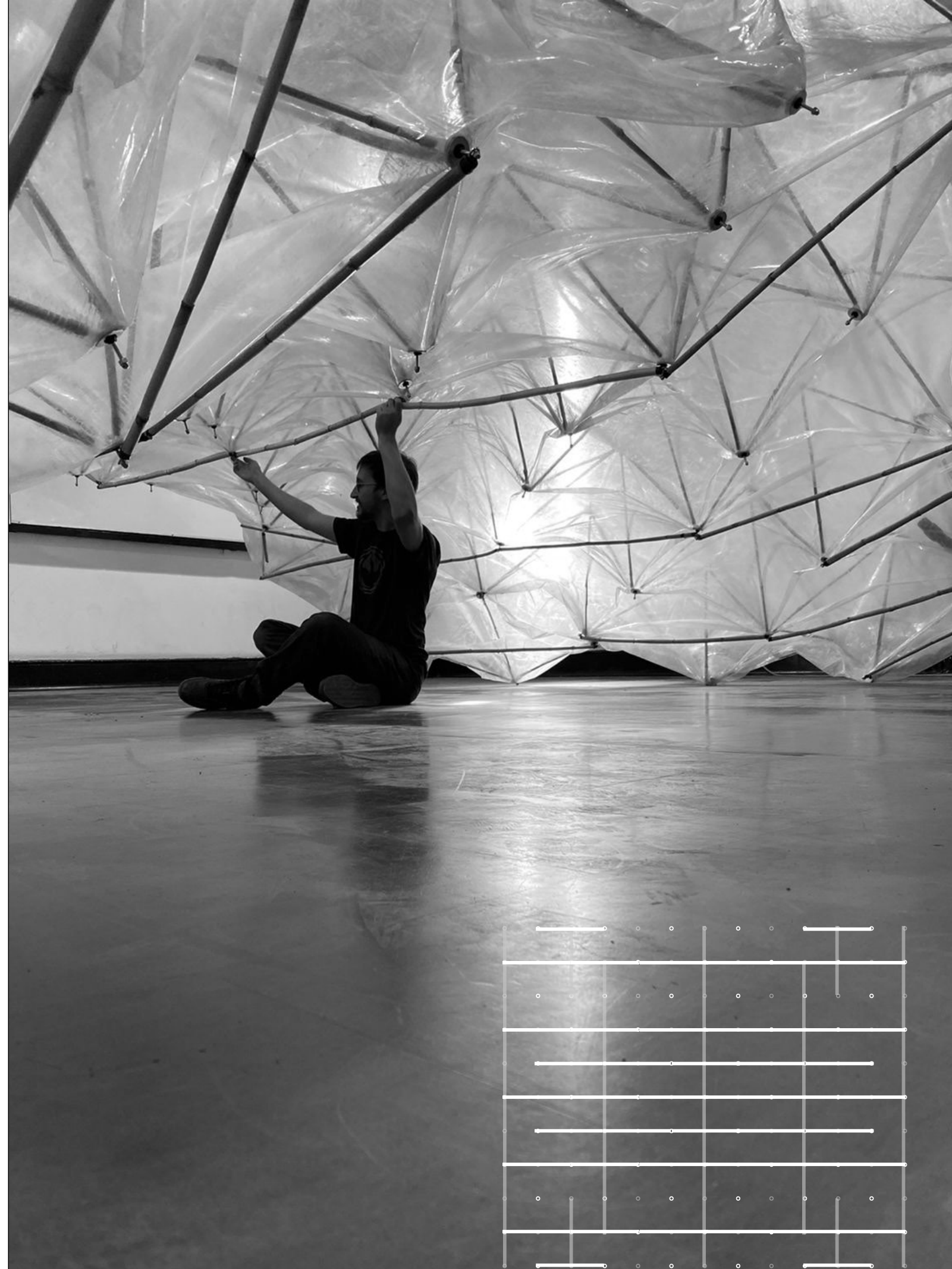


## PRUEBA 3: DOBLE CURVATURA

La forma de esta estructura consiste en colocar barras longitudinales en la parte superior y barras transversales en la parte inferior. La estructura se pudo levantar solo con la diferencia de presión, tomando forma. Esta es una geometría compleja que demanda una gran cantidad de presión en su interior, lo que llevo a que se quebraran varias barras exteriores. Esto se puede arreglar reforzando las barras o mejorando el control de la presión interior

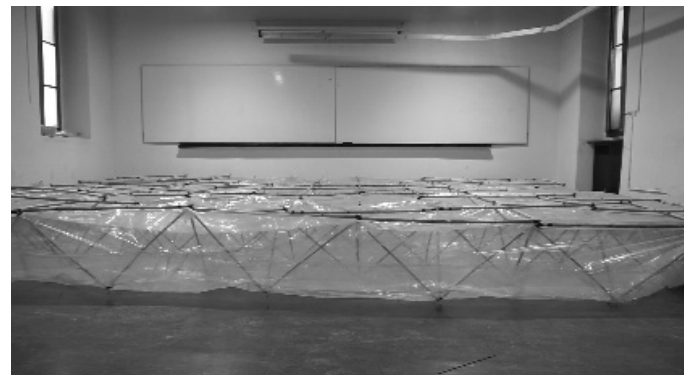


- Pagina opuesta: vista interior el momento de ser accionado
- Derecha superior: vista interior
- Derecha inferior: proceso de accionamiento. Duración 6min



## PRUEBA 4: BÓVEDA

El patrón de esta forma consiste en atravesar unas diagonales formando una x. La desventaja que tiene es que la mayoría del peso de la estructura esta en ejercida en la membrana y no en las barras, lo que puede llevar rupturas o quiebres. Accionando el prototipo muestra que la membrana es suficientemente resistente para recibir estas cargas sin sufrir daños.



• Arriba: vista interior el momento de ser accionado

• Pagina opuesta: vista exterior

• Derecha: proceso de accionamiento. Duración 6min 30





## PRUEBA 5

Esta es una geometría que se parece al de doble curvatura, pero las barras van de forma diagonal, apoyándose en las dos esquinas de la estructura. Esto lo hace complejo, ya que hay una gran carga puesta en los dos apoyos y en el arco superior, debido a esto, la estructura no se pudo parar sin ayuda exterior.



## PRUEBA 6

Las barras en este experimentos estaban dispuestas de tal para formar una ola. La baja cantidad de barras exteriores causo que no se levantara a una gran altura



## PRUEBA 7

Esta geometría esta compuesta de un lado plano y un arco, formando un gradiente entre los dos. La presión fue suficiente para ser accionado sin problemas



• Abajo: accionamiento interior de la prueba 7



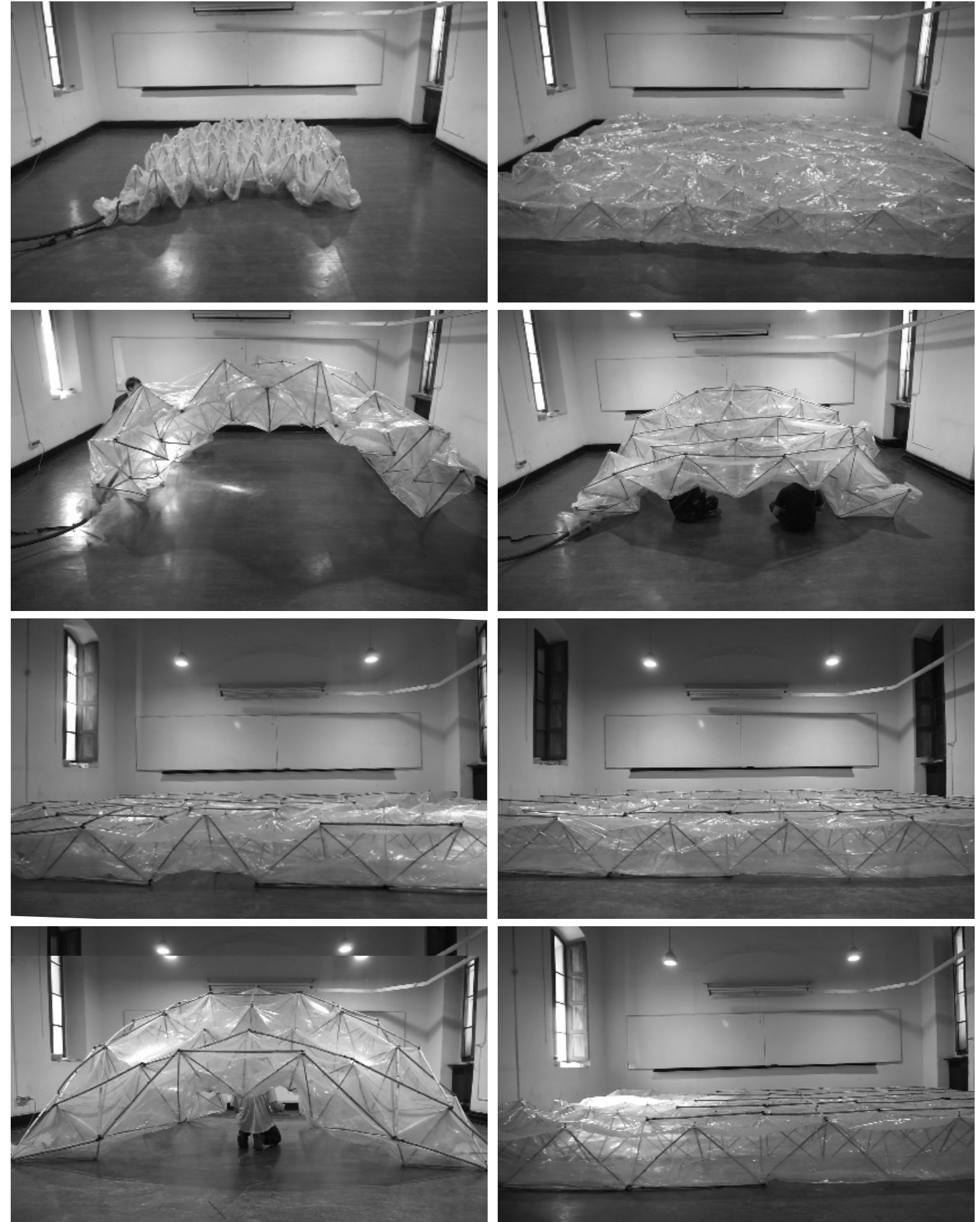


## CONCLUSIONES

Esta investigación nos llevo por las distintas propiedades de las estructuras auxeticas, las ventajas, desventajas, y como escalar a escala arquitectónica. Mientras que estos conceptos funcionaban bien con maquetas pequeñas, fue necesario construir un prototipo escala 1:1. Esto comprobó la escalabilidad de estas estructuras, aun con un cambio de tamaño y peso tan drástico.

Una estructura como esta presenta una forma distinta para diseñar espacios en la arquitectura, "programando" su forma para adaptarse a su entorno. Con ayuda de un software, en el futuro se podría lograr cualquier forma con parámetros predeterminados.

Aunque este sistema funcionara de una forma muy similar a los modelos mas pequeños, este igual presenta sus problemas. Al ser mas grande y mas pesado, las barras exteriores presentan una carga mucho mayor, en algunos casos quebrandola cuando el estrés es demasiado. De la misma forma, estas barras son mas difíciles de colocar al aumento de escala, lo que puede tomar hasta dos horas de cambiar por completo en el prototipo.



• Estructura auxetica con distintas combinaciones geométricas



# IMÁGENES UTÓPICAS

- Derecha: estructura usando sus propiedades de desplegado para lugares de clima extremo
- Abajo: estructura auxetica conectando dos edificios







