

Tensegridad Híbrida.

Exploración y experimentación de posibilidades de reconfiguración espacial de un sistema de tensegridad híbrido.

Estudiante: Joaquín Rodríguez Palomo
Profesor guía: Sebastián Rozas

Resumen

El objetivo de la investigación es explorar y experimentar con las capacidades propias de estructuras de tensegridad reconfigurables buscando generar dos tipos de movimientos mediante sus elementos rígidos y elásticos (movimiento híbrido). La investigación se desarrolla a través del origen de la tensegridad estudiando sus capacidades estáticas y dinámicas utilizadas en casos contemporáneos. Habiendo sintetizado las principales características de las investigaciones que producen un solo movimiento, se desarrolla una serie experimental de prototipos para agregar otro movimiento escalable, concluyendo en cambios de superficie y altura. De este modo, se visualizan las potencialidades de crear una arquitectura reconfigurable con las capacidades de comportamiento de la tensegridad.

Palabras clave: Dynamic tensegrity, Reconfigurable architecture, hybrid movement.

1. Introducción

Este seminario desarrolla una investigación exploratoria-experimental entorno a los **sistemas de tensegridad con capacidad de reconfiguración** con el fin de aprovechar sus cualidades de tensión generalizada, estabilidad, pretensado y holismo del sistema para **generar dos movimientos mediante la intervención en sus elementos rígidos y elásticos**.

El término "tensegridad" se define como una configuración geométrica de cuerpos rígidos que al ser estabilizados por un conjunto de elementos en tensión forman un sistema estructural donde los elementos trabajan a compresión o tracción manteniéndose en equilibrio. Resultando en un objeto que está siendo sometido a fuerzas opuestas que lo estiran y fuerzas opuestas que lo aprietan, formando un equilibrio absoluto. (Buckminster Fuller & Applewhite, 1975-1979)¹

Dicho lo anterior, Anthony Pugh considera que un sistema de tensegridad es establecido cuando un conjunto de elementos rígidos discontinuos interactúa con un conjunto de elementos de tensión definiendo un volumen estable en el espacio. (Pugh, 1976, p.p.3)². Es mediante esta definición por la que se rige la investigación.

Las estructuras de tensegridad con capacidad de movimiento usualmente responden a problemas dentro del área de la ingeniería como aterrizajes de robots por su resiliencia requiriendo que la estructura no sufra deformaciones, centrándose en la capacidad de despliegue y armado sin perder la integridad de la estructura.

En la actualidad, la arquitectura apunta al alcance de la adaptabilidad espacial en respuesta a factores sensoriales o externos, utilizado principalmente estructuras con capacidades adaptables para responder a los requerimientos de actividades humanas (Fox & Yeh, 2017)³.

En ambos casos se explora la capacidad de reconfiguración, es decir, cambiar el orden de sus elementos y regresar al inicial mediante la cinética.

Desde el S.XX, la arquitectura se ha enfocado en integrar tales cualidades en sus elementos. Su concepción deriva principalmente de la observación y estudio de los sistemas encontrados en la naturaleza vinculados al pensamiento y a la interpretación del edificio como un sistema vivo. También, al hecho de que los sistemas naturales que generan movimiento en sus componentes se estructuran bajo los requerimientos mínimos de uso energético, formando una conexión entre la función física y los límites espaciales (Yoon & Bae, 2020)⁴.

Por esto, la tensegridad es aprovechada en este campo puesto que su sistema se encuentra dentro de la naturaleza, por ejemplo, en la anatomía humana donde los elementos de tensión se reflejan en los músculos y ligamentos, mientras que los elementos rígidos en los huesos y articulaciones, reflejando eficiencia en respuesta a distintos tipos de movimientos. (Skelton, 2006)⁵.

El problema de investigación **surge del estudio de las cualidades propias de la teoría de origen de la tensegridad estática junto a investigaciones recientes (2009-2019) que exploran las capacidades de reconfiguración en sistemas de tensegridad dinámicos.** Observando que mayoritariamente se utiliza un accionamiento específico para generar **un tipo de movimiento que reconfigura la totalidad de las estructuras.** Debido a esto, se propone una investigación que apunta a **explorar mediante una serie experimental de prototipos escalables,** distintos accionamientos y movimientos para producir un **prototipo arquitectónico reconfigurable que utilice las propiedades de un sistema de tensegridad para dotarse de dos reconfiguraciones mediante la intervención de sus elementos rígidos y elásticos,** creando distintos límites espaciales.

En las investigaciones se trabaja mayoritariamente con los **elementos rígidos** del sistema de tensegridad, generando reconfiguraciones que trabajan con **un solo tipo de movimiento.** Por lo tanto, se propone **agregar más de un movimiento mediante hibridaciones** que combinan los conocimientos de las capacidades de tensegridad como estructuras estáticas y los hallazgos de las investigaciones contemporáneas, con el fin de **dotar de más posibilidades de generar reconfiguraciones espaciales.**

2. Marco teórico

El marco teórico desarrolla un análisis de fuentes bibliográficas sobre origen de la tensegridad y sus características como estructuras estáticas. Sintetizando los principios básicos que los definen, los conceptos de "tejido" de sus elementos para armar geometrías, ventajas para la reconfiguración espacial y la aplicación del comportamiento dinámico en los elementos de tensegridad (Fig. 1).

La tensegridad fue visionada por el arquitecto Richard Buckminster Fuller empíricamente como:

"pequeñas islas de compresión en un mar de tensión" (Fest et al., 2003)⁶

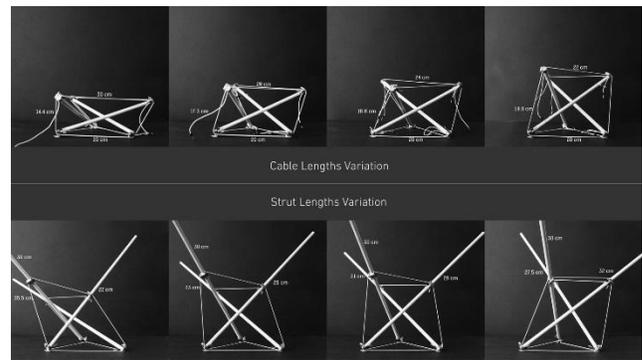


Fig. 1: Exploración de largos de módulo de tensegridad. Fuente: Reconfigurable tensegrity systems.

Aludiendo a las cualidades físicas que la estructura presenta, de las cuales visionaba la estabilidad estructural que podían tener los sistemas en base a una red tensil (Ingber, 2012)⁷.

Es por Kenneth Snelson que se concreta la primera estructura de tensegridad, mediante un juego de barras de madera contrachapada en las cuales dos módulos daban la apariencia de estar "flotando" encima de cada uno. Materializando la teoría de Fuller basada en que la forma de la naturaleza es definida por la acción de la fuerza sobre la materia, donde propone que la naturaleza misma es un sistema energético finito que consta de las fuerzas de tensión y compresión actuando sinérgicamente (R.B. Fuller)⁸.

De este modo, replanteando la postura de los elementos de compresión como los que se encargan del soporte principal del conjunto estructural, planteando que los **elementos de tensión se consideran una fuerza dominante y más versátil.**

Para entender los sistemas de tensegridad, se debe entender que los diferencia sustancialmente de los sistemas tradicionales. Estos se presentan como un conjunto de elementos rígidos discontinuos que al interactuar con conjuntos de elementos de tensión define un volumen estable. (Pugh, 1976)⁹ Distinguiéndolos del sistema tradicional de construcción principalmente en cómo responden ante las fuerzas que se distribuyen por ellos hacia otros sectores de la estructura.

Los miembros de estas estructuras están siempre trabajando a la tensión o compresión. Debido a esto, si una fuerza de tensión está siendo impartida en la estructura los elementos rígidos trabajan localmente, debido a la discontinuidad entre ellos (Burkhard, 2008, p. p.29)¹⁰. Resultando, en que los elementos rígidos no son sometidos a grandes

cargas de pandeo, dado que no transmiten las cargas por distancias largas.

Considerando la definición de Pugh sobre los sistemas de tensegridad y sus elementos, se evidencian estas estructuras no solo dentro del campo de la arquitectura, encontrándolas en la naturaleza como en plantas y en la fabricación de objetos como en ruedas de bicicleta.

Burkhard denomina **resiliencia** a la capacidad de los elementos de un sistema de tensegridad de recuperarse después de sufrir una deformación (Burkhard, 2008, p. 29)¹¹.

2.1. Principios Básicos

Las siguientes propiedades fueron concesionadas por Kenneth Snelson sobre las estructuras de tensegridad. Ayudando a identificar cuando uno o más de estos principios están presentes simultáneamente en otros sistemas (Deepak et al, 2018)¹². Sirviendo para entender como sus componentes están ligados a la adaptabilidad.

1. **Tensión generalizada/ separación de elementos rígidos:** Los elementos resistentes a la compresión se levantan individualmente evitando el roce o unión directa entre ellos. Por lo tanto, cada elemento rígido está interconectado por un sistema de elementos tensados continuamente (tensión continua, compresión discontinua).
2. **Estabilidad:** Las estructuras a pesar de tener una apariencia poco definida, son notablemente estables debido al equilibrio absoluto de sus elementos.
3. **Pretensado:** Cada elemento ya está tensionado (los elementos de compresión ya están comprimidos, los elementos de tracción ya tensados) y están estirados entre sí, una condición conocida como "auto esfuerzo".
4. **Elasticidad:** Al ser sometidas a perturbaciones exteriores responden de una manera notablemente eficiente. Los componentes se reorientan de forma inmediata ante cargas que deforman el sistema estructural, destacando en que lo hacen de manera reversible y sin romperse.
5. **Globalmente integradas (Holismo):** Dada la íntima interconexión de los componentes, el esfuerzo al que un elemento es sometido se manifiesta en todos los otros elementos.

6. **Modular:** Las estructuras tienen la capacidad de combinarse con otras. Por lo tanto, pueden ser catalogadas en tipologías según clases.
7. **Jerárquicas:** Estructuras de tensegridad más pequeñas pueden funcionar como componentes de compresión o tracción en un sistema de tensegridad más grande.

2.2. Tensegrity weaving

El concepto de binario pertenece a la dualidad de las materias donde se asocian a términos como arriba y abajo, tirar y empujar, entre otros. Evidenciándose en la compresión versus la tensión de las estructuras de tensegridad (Snelson, N.A)¹³. Al igual como vemos la alteración en los vecinos de un cuadro de ajedrez este concepto concierne también la alteración entre los elementos de un sistema de tensegridad que forman "tejidos" (Snelson, N.A)¹⁴.

Por lo tanto, K. Snelson define cinco tipos de celdas de tejidos traslapados (Fig.2) que pueden ser traducidos en estructuras de tensegridad básicas, siendo estas de dos a seis unidades entre cruce. (Snelson, N.A)¹⁵ De los cuales, las dos primeras se pueden considerar las más firmes puesto que formalmente configuran una triangulación total en la unidad.

Tal es esto, que es importante entender que el funcionamiento geométrico de la estructura se debe al alternación de sus componentes, puesto que producen el "tejido" que permite que se sobrelapen sus diversos elementos rígidos estando suspendidos y discontinuos de cada uno.

El artículo "Overview of Tensegrity" explica que los triángulos formados por los tendones de la red del sistema pueden ser clasificados de dos maneras.

En el primero, el triángulo se forma por tensión y compresión donde existen dos puntales y dos tendones, donde dos cables desde la esquina de un puntal se unen a las esquinas del otro puntal por separado imitando una aleta (Fig.3).

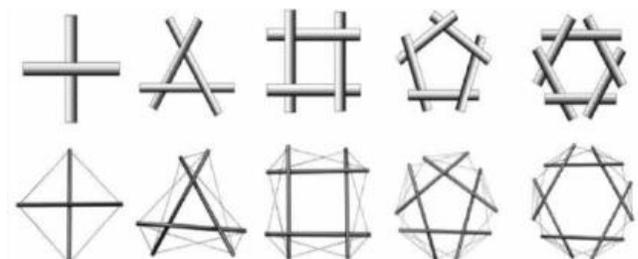


Fig. 2: Celdas tipológicas. Fuentes: Overview of tensegrity.

La segunda, cada puntal está formando una triangulación desde solo la tensión entre las puntas conectadas por tres cables. (Deepak et al., 2018)¹⁶

2.3. Ventajas para la transformación espacial

Tras comprender los principios básicos de tensegridad se pueden abarcar aspectos más específicos de estos sistemas, diagnosticando ventajas y desventajas listadas en el artículo "Overview of Tensegrity"¹⁷.

Ventajas:

- La carga se distribuye en toda la estructura, no existen puntos críticos de debilidad.
- No sufren ningún tipo de torsión y pandeo por la disposición del espacio y corta longitud de los miembros de compresión.
- Las fuerzas se transfieren de forma natural, en consecuencia, los miembros se posicionan con precisión alineándose con las líneas de fuerzas transmitidas en el camino más corto para resistir el estrés inducido.
- Pueden vibrar y transferir cargas rápidamente, absorbiendo golpes y vibraciones, haciéndolos aplicables a sensores o actuadores.
- Pueden ampliarse infinitamente mediante la adición de estructuras elementales.

Desventajas:

- Si la estructura se vuelve demasiado grande, se enfrenta a un problema de congestión de los conjuntos de barras (es decir, los puntales comienzan a chocar o tocarse entre sí).
- Muestran deflexiones relativamente altas y baja eficiencia del material en comparación con estructuras continuas convencionales.
- La complejidad de la fabricación es una barrera importante en el desarrollo de las estructuras.
- En grandes construcciones, la estructura no puede soportar cargas superiores a las críticas, debido a sus dimensiones y pretensado.

2.4. Tensegridad dinámica

La tensegridad dinámica consiste en el aprovechamiento de las características de tensión generalizada para formar estructuras con capacidad de movimientos responsivos. El significado de responsivo en la arquitectura consiste en incorporar elementos que tienen como objetivo generar reconfiguraciones físicas para responder a cambios

con variables de ubicación, movilidad o geometría (Ford, 2012)¹⁸.

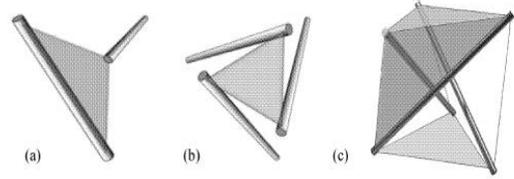


Fig. 3: Triangulación de elementos. Fuente: Overview of tensegrity.

Para aplicar reconfiguraciones, la arquitectura depende de sistemas cinéticos, donde las manifestaciones generales son el desplazamiento, traslado, escala y rotación. La manifestación de estos movimientos es activada por una capacidad mecánica, natural, química, neumática o magnética (Ford, 2012)¹⁹.

Los comportamientos que puede tener una estructura se clasifican como: estructuras cinéticas empotradas, dinámicas y desplegadas (Fox & Yeh, 2017, p. p 3-10)²⁰.

Comprendiendo que el movimiento es una de las ramas de la física mecánica, este se define en la arquitectura mediante cinco tipos. (Osama Elkhayat, 2014)²¹. Los cuales surgen desde el entendimiento que la traslación define al movimiento de un componente en una dirección plana constante; la rotación como el movimiento de un objeto en su axis y la escala como la expansión o contracción del tamaño del componente. Estas definiciones, se convierten en los principios básicos de la cinética para la arquitectura, donde combinadas forman movimientos más complejos como el giro direccional (Osama Elkhayat, 2014)²².

1. Movimiento de elementos arquitectónicos rígidos.
2. Movimiento de elementos arquitectónicos deformables.
3. Movimiento de elementos arquitectónicos suaves y flexibles.
4. Movimiento de elementos arquitectónicos elásticos.
5. Forma neumática.

Estos distintos movimientos se pueden desarrollar a base de distintos sistemas.

1. Sistemas mecánicos
2. Sistemas plegables
3. Sistemas neumáticos

3. Métodos

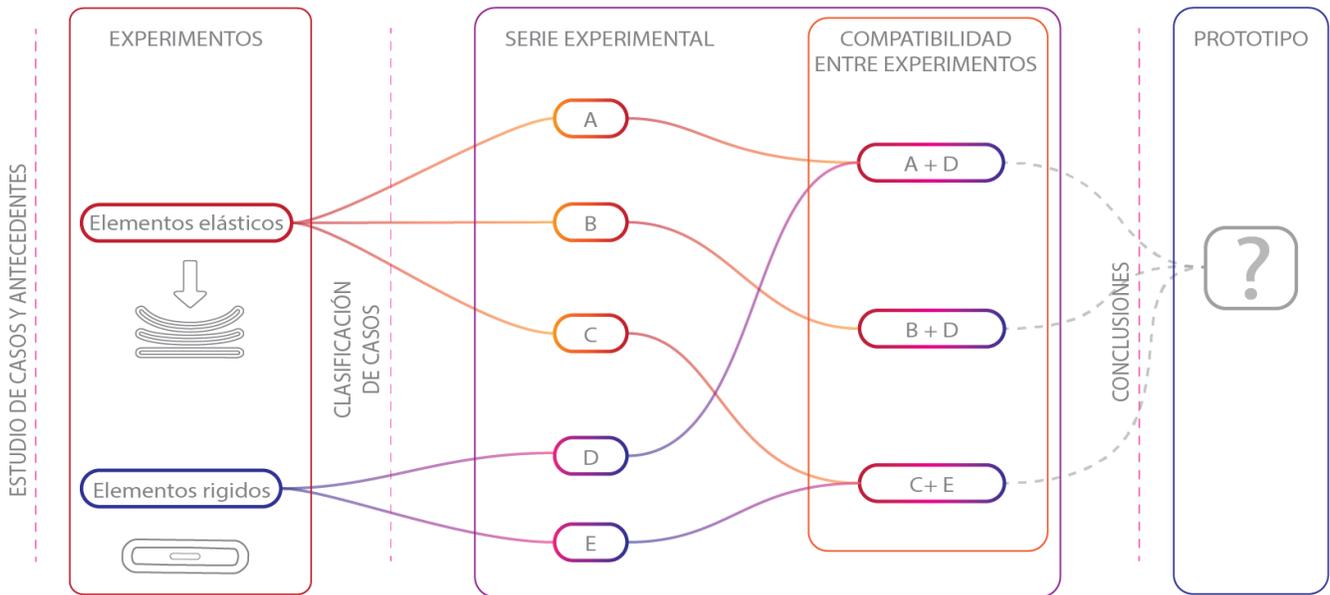


Fig. 4: Diagrama de metodología de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

La metodología para responder el problema de investigación consistió de una etapa de estudio y clasificación previo a la formulación de la serie experimental. En el estudio de casos, se sintetizan los hallazgos más relevantes dando consideraciones para la elaboración de los experimentos. Luego, se clasificaron los referentes para entender que sistemas y elementos fueron utilizados, cuales se utilizan con mayor frecuencia y cómo son trabajados (Fig.4).

Durante la serie experimental, se utilizan los conocimientos del marco de estudios para desarrollar prototipos escalables que, junto a su documentación y observaciones, resultan en un prototipo escalable de dos movimientos. Acompañado de conclusiones sobre la investigación en torno a las potencialidades de crear una arquitectura reconfigurable en base de las capacidades acentuadas de los comportamientos de tensegridad (Fig.4).

3.1. Estudio

La investigación de K.W Moored y H. Bart-Smith "Investigation of clustered action in tensegrity structures" desarrolló un concepto de actuación agrupada en un sistema plegable, que aprovecha los cables en la estructura, permitiendo que pasen por poleas sin fricción entre los nodos. El objetivo fue generar una solución escalable para estructuras activas que consisten de muchos elementos,

reduciendo la cantidad de actuadores utilizados (Moored & Bart-Smith, 2009)²³.

Utilizaron dos estrategias para introducir actuadores en las estructuras. La primera, es la actuación integrada, colocan directamente actuadores en la estructura sustituyendo elementos individuales, (Moored & Bart-Smith, 2009)²⁴ funcionando en cualquier tipo de tensegridad (Fig.5). La segunda, es la actuación enrutada por puntal, conectan un actuador a un elemento activo pasando un cable a través de puntales conectados formando un camino desde un elemento activo hasta la ubicación del actuador (Moored & Bart-Smith, 2009)²⁵. La ventaja consiste en que los actuadores migran fuera de la estructura para revertir la masa agregada y las restricciones de tamaño del elemento.

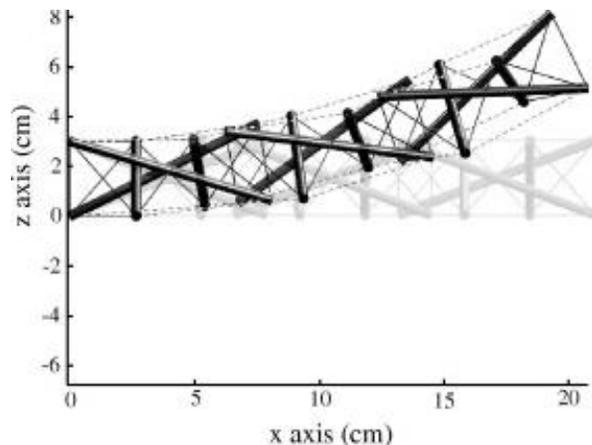


Fig. 5: Gráfico de movimiento. Fuente: Investigation of clustered action in tensegrity.

La investigación "Active control for mid-span connection of a deployable tensegrity footbridge" busca generar una conexión entre dos extremos a mitad de tramo mediante dos estructuras extensibles. Lo importante, es el proceso metodológico que utilizan para controlar la forma y la adaptación al estrés, con el objetivo de crear cambios más significativos desde su inicio hasta su alcance máximo previo a la conexión (Fig.6).

La estructura es un modelo a escala de $\frac{1}{4}$ de un puente de tensegridad desplegable. Compuesta por tubos huecos de acero, cables de acero y resortes de acero. La estructura contiene dos tipos de cables, no continuos y continuos. Los cables no continuos se componen por un segmento y terminan en las articulaciones que definen el segmento (Veuve et al., 2015)²⁶.

Se compararon dos topologías, una uniforme y otra simétrica que aluden a distintos tipos de conexiones de elementos. En la topología uniforme, la orientación de la segunda mitad es la misma que la de la primera. En la topología simétrica, la segunda mitad es una reflexión de la primera mitad del tramo (Veuve et al., 2015)²⁷.

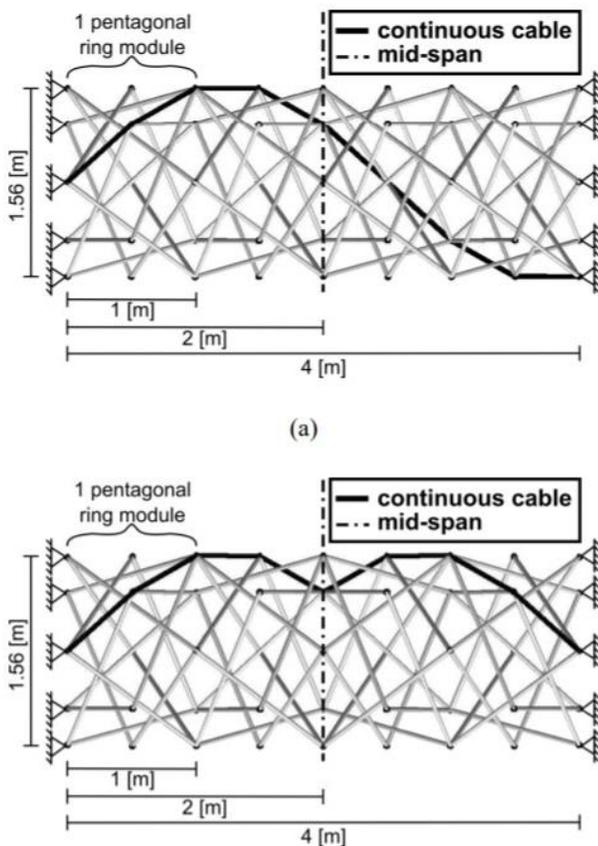


Fig. 6: Topología uniforme y simétrica. Fuente: Active control for mid-span connection of a deployable tensegrity footbridge.



Fig. 7: Detalles de módulo. Fuente: Parametric models of tensegrity structures with double curvature.

La investigación de Andreana Papantoniou, "Parametric models of tensegrity structures with double curvature" buscó generar superficies dobles con estructuras de tensegridad de doble curvatura. La metodología es la formación de unidades idénticas de tensegridad para generar una solución geométrica a su problemática.

Utiliza un módulo idéntico (Fig.7) que ofrece una solución simple de armado tanto en el proceso de prototipo y en la construcción final para que cada módulo pueda ser montado entre sí (Papantoniou, 2017)²⁸.

El método geométrico para el desarrollo de configuraciones esféricas de tensegridad de doble capa se resolvió utilizando la técnica de proyección iso-cilíndrica en la superficie. Haciendo posible la disposición uniforme de los cuadrados de la estructura esférica (Papantoniou, 2017)²⁹.

La investigación "Deployable Tensegrity Structures with Inflatable Compression Struts" consistió en el estudio de un sistema híbrido entre estructuras de tensegridad y neumáticas que busca ampliar los principios de estructuras de tensegridad en su activación de despliegue mediante la sustitución de elementos rígidos por puntales de compresión inflables. Utiliza una combinación tipológica precisa y el pretensado suficiente en los miembros de compresión para abarcar el concepto de tensegridad inflable (Fig. 8).

La investigación indica que es posible realizar combinaciones más complejas, es decir, mayor cantidad de elementos de puntales y conexiones (Dessi-Olive, 2019)³⁰. Para esto, los puntales livianos se refuerzan con aire teniendo la capacidad de plegarse y empaquetarse en un volumen mucho menor cuando se desinflan. Por lo tanto, son lo más herméticos posible para que la estructura esté temporalmente sin la necesidad de alimentaciones continuas de aire (Fig.8).



Fig. 8: Prototipo y detalle de control de aire. Fuente: Deployable Tensegrity Structures with Inflatable Compression Struts.

El prototipo considera dimensiones que permiten resistir cargas impuestas y bajas de presión (Dessi-Olive, 2019)³¹.

La investigación de Kuan-Ting Lai surge de su tesis sobre "Sistemas Reconfigurables de Tensegridad" en la Universidad de Stuttgart, en la cual estudió las capacidades de los principios estructurales para crear estructuras arquitectónicas transformables. A partir de estudios geométricos de tensegridad, diseña un prototipo de 13 unidades consistiendo en solo actuadores y paneles (Fig.9). Los elementos de compresión son actuadores neumáticos y los elementos de tensión se sustituyen por paneles flexibles de policarbonato (Lai, 2016)³².

El prototipo de cilindros neumáticos se proyectó en puntales paralelos con 4 elementos de tensores conectados a cada extremo. La reconfiguración se realizó ajustando las longitudes de los puntales, dado que el cambio de longitud del puntal tiene una influencia mayor en la geometría global. Además, que el número de puntales es menor que los cables.

El software Kangaroo 2 se utilizó en los estudios cinemáticos para entender cómo el sistema adaptaba la forma cuando la longitud de la varilla cambiaba (Lai, 2016)³³.



Fig. 9: Diagramas de Kangaroo 2 y prototipo accionado. Fuente: Sistemas Reconfigurables de Tensegridad.



Fig. 10: Módulo de fachada. Fuente: Using tensegrity and folding to generate soft responsive architectural skins.

La investigación "Using Tensegrity and Folding to Generate Soft Responsive Architectural Skins" plantea el proceso de diseño de una estructura a base de un sistema *soft-responsive* para generar una fachada cinética. El prototipo se compuso a base de materiales ligeros formando una piel menos dependiente de sistemas mecánicos duros, es decir, priorizó mecanismos suaves y a la vez sensibles (Abdelmohsen et al.,2016)³⁴. La investigación combinó conceptos de estructuras de tensegridad junto a los mecanismos de plegado, estudiando diversos patrones de fachada y perforaciones basadas en retroalimentación de datos para la red de sensores (Fig. 10).

El alcance principal del artículo fue utilizar la lógica de la tensegridad por sus principios estructurales con el propósito de explorar sistemas de respuesta blanda, estudiando estructuras que sirven de forma ligera, siendo naturalmente eficientes y dinámicas. Además, por las propiedades de este sistema se visualizaron cualidades de ligereza, desplazamiento y resistencia. Otro alcance, es el control de la forma relativamente flexible y fácil, donde la forma básica de la estructura de tensegridad se altera y deforma considerablemente con un cambio mínimo en la energía potencial (Abdelmohsen et al., 2016)³⁵.

El artículo "Remembrance" estudió estructuras cinéticas adaptables utilizando aleaciones con memoria de forma. El estudio abarcó el uso de estructuras de tensegridad y pantógrafos con el objetivo de desarrollar múltiples modelos de diferentes sistemas estructurales móviles, donde el prototipo es controlado por interfaz web (Won Jun et al, 2017)³⁶.

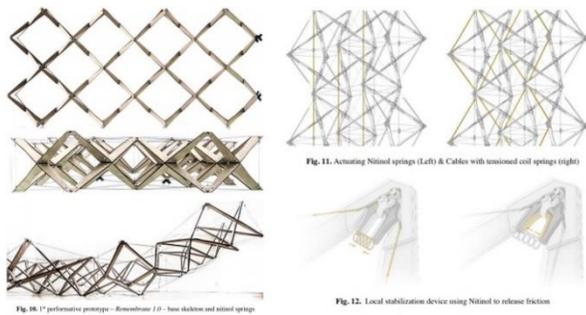


Fig. 11: Elementos y movimiento de prototipo pantógrafo. Fuente: Remembrance.

Mediante el diseño computacional y simulaciones, desarrolló un prototipo a base de resortes de Nitinol (aleación con memoria de forma) como actuadores lineales, los cuales se moldean mediante cambios de temperatura (Fig.11).

Desarrollando un sistema distribuido a base de actuadores ligeros integrados en la estructura que permiten un control preciso de la forma y mayor movimiento (Won Jun et al, 2017)³⁷.

El circuito electrónico para controlar los cables de Nitinol fue una placa Arduino y cuatro transistores que controlan la cantidad de corriente liberada en cada alambre de Nitinol (Won Jun et al., 2017)³⁸.

Una estructura pseudo-tensigrada fue utilizada, basada en un sistema geométrico pantógrafo diagrid. La estructura consta de piezas de madera con juntas de plástico flexible y una red diagonal de resortes de Nitinol. La flexión de la superficie es provocada por la contracción de los resortes de Nitinol cuando se calientan (Fig.11).

3.2. Consideraciones

De los casos presentados se tomaron en consideración distintos aspectos abarcados en las etapas de ensayo de prototipos y modelado, con el fin de considerarlos para desarrollo de las maquetas de estudio.

- En el caso de *"Investigation of clustered action in tensegrity structures"* se toma en cuenta el método de agrupamiento de actuadores, pensando que al momento de trabajar con muchos elementos que intenten generar un efecto cinético es útil juntarlos en puntos estratégicos para facilitar el accionamiento del movimiento.
- En el caso *"Active control for mid-span connection of a deployable tensegrity footbridge"* la comparativa de topologías de

despliegue es una herramienta útil al momento de ensayar con prototipos para precisar los movimientos de despliegue y flexión. Además, se considera trabajar con simetría en la configuración geométrica para mayor simplicidad al componer los elementos.

- En la investigación de Andriana Papantoniou, el uso de un módulo idéntico que ofrece una solución simple de armado durante el proceso de prototipo tiene un potencial para ocuparse también en las etapas de accionamientos híbridos, donde se puede asignar un módulo por accionamiento para luego combinarlo con otra variante, ensayando si ambos se logran simultáneamente.
- En *"Deployable Tensegrity Structures with Inflatable Compression Struts"* se considera potencialmente cambiar el sistema que dota de un comportamiento a los elementos rígidos como al del sistema neumático que utiliza la investigación y utilizando otro para los elementos de tensado. Tal aspecto puede ayudar a garantizar el sistema híbrido al que se apunta llegar.
- En la investigación de Kuan-Ting Lai, *"Sistemas Reconfigurables de Tensegridad"* resulta importante como se reemplazan los elementos de tensión. Puesto que apunta a variar las exploraciones de control de tales elementos. Donde al ocupar paneles permite desarrollar otro tipo de situaciones, en su caso, entradas de luz. Lo importante, posibilita la misma sustitución para reconfigurar en más de una situación los límites espaciales.
- La investigación *"Using Tensegrity and Folding to Generate Soft Responsive Architectural Skins"* se considera su decisión de composición a base de materiales ligeros y mecanismos para generar una piel menos dependiente de sistemas mecánicos duros, dando paso a implementar las características de la tensegridad. Es importante también, el estudio de diversos patrones de fachada que da paso a las decisiones de los mecanismos de plegado.
- Para el caso de *"Remembrance"* se considera las pruebas de aleaciones con memoria de forma que permiten el uso de un sistema eléctrico para efectuar el movimiento, lo cual puede ser útil al momento de explorar variantes de actuadores para accionar los movimientos. La investigación usa una metodología detallada en la exploración material en función de la estructura de tensegridad.

3.3. Clasificación

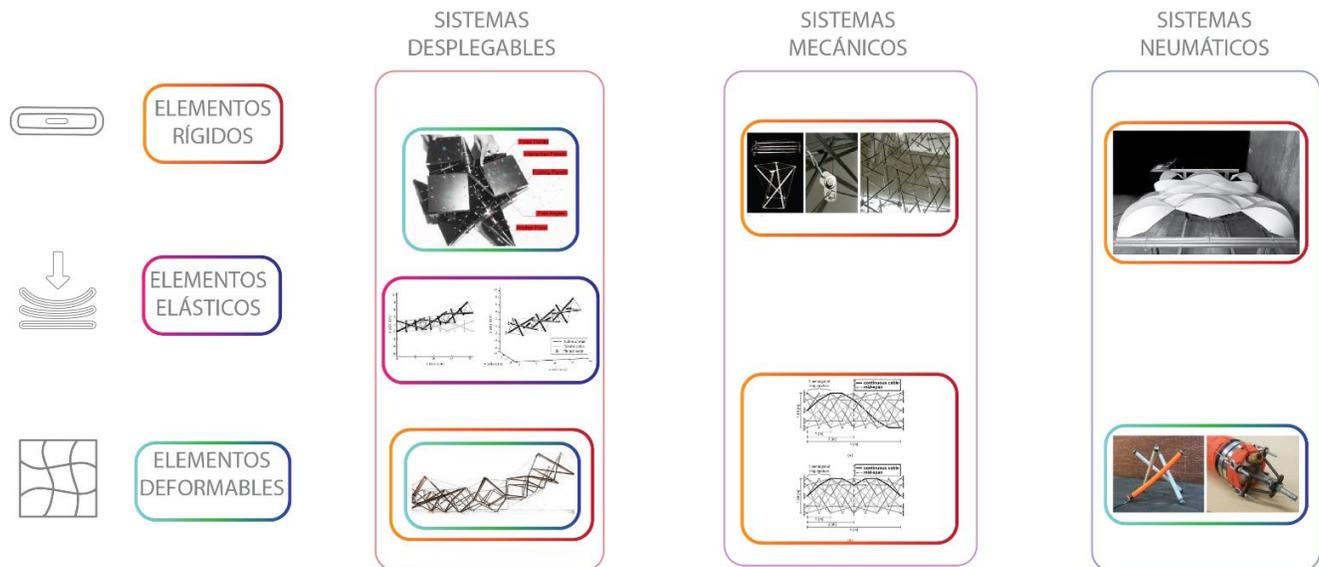


Fig. 12: Mapa de clasificación de experimentos. Fuente: Elaboración Propia.

Los experimentos fueron clasificados según los elementos esenciales que generan los movimientos y el sistema de accionamiento.

El primero por plegado, es decir, los movimientos se inducen al plegar una superficie sin que esta tenga una capacidad elástica necesariamente, por el cual se puede expandir, alargar, desplazar o rotar (Fig.12).

El siguiente por mecánica, donde los cuerpos geométricos mediante el balance de sus propios componentes generan movimiento, es decir, una unión o actuador provoca la esencia del movimiento (Fig.12).

Finalmente, los sistemas neumáticos son aquellos que se centran en usar presión en sus componentes para generar el movimiento. Aquí se encuentran específicamente el uso de materiales inflados o componentes que permiten cambios de presión (Fig.12).

La clasificación ayuda a hacer observaciones sobre cada caso, las cuales apuntaron a poder traducir tales movimientos a prototipos permitiendo trabajar con una selección material tanto para solucionar uniones, dificultades geométricas o de reconfiguración.

Para los casos en el sistema de plegado se observó que el cambio principal radica en usar superficies delgadas con subdivisiones. Estas pueden estar pensadas como en el caso de *"Using Tensegrity and Folding to Generate Soft Responsive Architectural*

Skins" de usar dobleces tipo grilla con paneles planos o de tipo diagonal como en *"Remembrance"*. En ambos se identificó el uso de materiales ligeros, siendo el primer caso tipo *"soft"* y en el segundo un material duro pero flexible.

Destacó el segundo caso en utilizar una envoltura flexible con elementos rígidos flexibles, mediante aleaciones de forma (Nitinol) para configurar los elementos rígidos y elásticos. Ya que, utiliza un solo elemento deformable para controlar todas las partes de la estructura.

Los sistemas mecánicos destacaron más en el sistema de armado y como este sostiene la estructura. En *"Parametric models of tensegrity structures with double curvature"* los nodos de conexión son el interés principal dado en como fijan y organizan la curvatura del sistema total, configurando cada módulo en un lugar específico. Además, las soluciones de armados son simples componiéndose de fijaciones metálicas que entre anclan la red tensil.

En *"Active control for mid-span connection of a deployable tensegrity footbridge"* la mezcla entre dos tipos de cables, no continuos y cables continuos resulta interesante en como mediante el control de resortes ayudan al despliegue gradual de la estructura.

En el último, el sistema neumático utilizado en la investigación de Kuan-Ting Lai resulta interesante el cambio de presión en los elementos rígidos para

adaptar sus largos y como utiliza dos configuraciones para generar movimientos donde uno dobla el panel en algunas partes y el otro lo contrae. En el caso de *"Deployable Tensegrity Structures with Inflatable Compression Struts"* destaca el control de altura por medio del cambio de presión a medida que se va inflando y deformando la estructura.

El mapa de casos también indica un **mayor uso de elementos rígidos y elementos plegables** en los sistemas para poder efectuar reconfiguraciones. Debido a esto, se explora una solución que con lleve **la adaptación de los elementos elásticos junto a otros, dado que, estos componen en gran parte la red tensil de las estructuras de tensegridad permitiendo mayor juego de reconfiguraciones** (Fig.12).

4. Procedimientos de experimentos

Los experimentos surgen como punto de partida de un módulo escalable, llevado a intervenciones en ensayos de prueba que sirvieron para explorar cualidades escalables, donde los movimientos apuntan a traducirse en objetos de tamaño proporcional (Fig.13).

Se utilizan materiales compatibles a los elementos del módulo para construir los experimentos, tales como bombillas para los elementos rígidos, elásticos de oficina para la red tensil, clavos pequeños como elementos de unión, entre otros. De este modo, se crearon experimentos que fueron evaluados en base a los objetivos de cada uno permitiendo reconocer errores y hallazgos para la toma de decisiones de los materiales y mecanismos finales.

Por lo tanto, se desarrolló un procedimiento de trabajo con el que se formó cada experimento.

Primero, se decidió trabajar por medio de un prototipo de un módulo escalable como objeto de uso global para los experimentos, para él cual se escoge el prisma de tensegridad, debido a que contiene un número mínimo de elementos como figura para trabajar, siendo tres elementos suspendidos, cinco caras y un conjunto de nueve aristas (Fig. 14). Esto otorgó mayor facilidad para desarrollar los prototipos, ahorro de tiempo y minimizó el número de elementos base con los que interactuar.

Luego, se partió por un objetivo de movimiento para cada experimento. De este modo, se tomaron decisiones tanto de materiales como de

accionamientos que vayan en línea con el experimento, pero sin limitar la posibilidad de encontrar observaciones que no hayan estado dentro del motivo apuntado.

Después, se decidió el tipo de material y accionamiento con el que se quiere lograr el objetivo. Describiendo partes, mecanismo, graficando y documentando su desarrollo.

Finalizando con una evaluación de resultados y conclusiones de mejoras posibles para cada experimento. Se evaluó el desarrollo de los prototipos en su complejidad de armado y sus logros en los tipos de movimientos realizados, concluyendo en mejoras del prototipo, posibilidades de uso en otros experimentos y elección de materiales o accionamientos eficientes. Se realizó una tabla de resultados para seleccionar los aspectos rescatables de cada experimento, para así construir el prototipo final respondiendo a la pregunta de investigación mediante conclusiones.

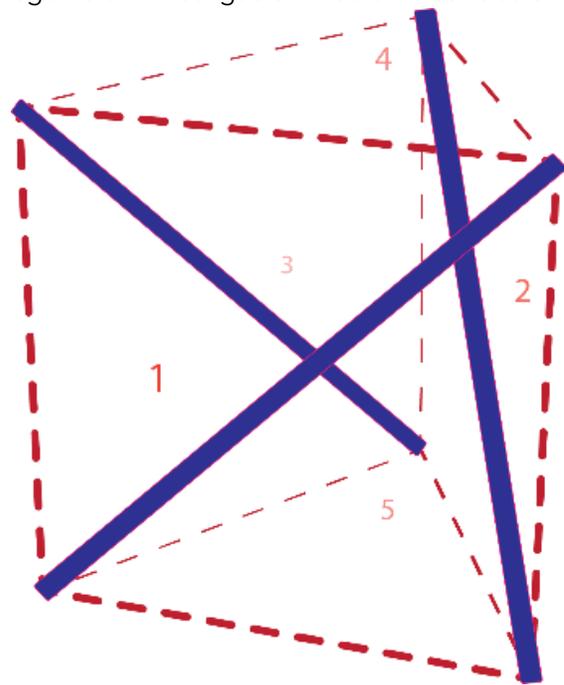


Fig. 13: Módulo tensegrity. Fuente: Elaboración propia.

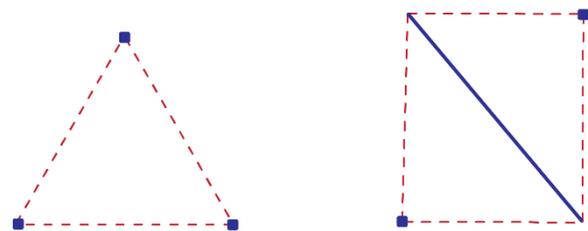


Fig. 14: Diagrama de cara basal y lateral. Fuente: Elaboración propia.

4.1. Exploración-experimental

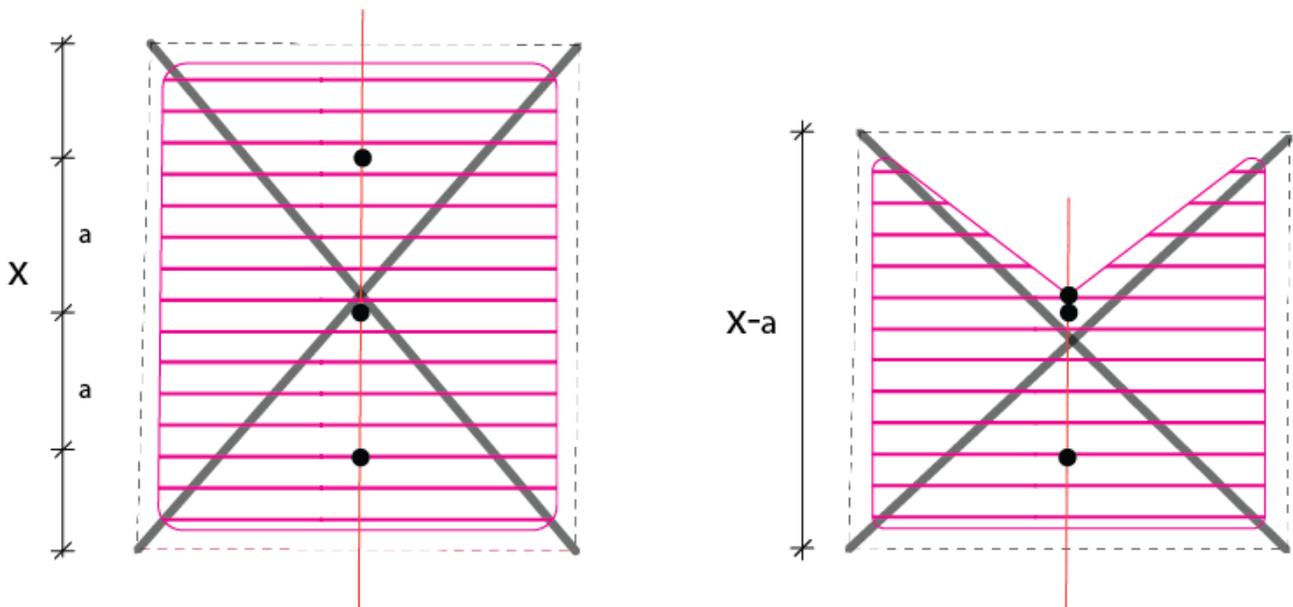


Fig.15: Diagrama de prototipo 3. Fuente: Elaboración propia.

Experimento 1

En el primer experimento se probó contraer la altura de 20 cm del módulo y que volviera a su sitio por medio de un solo esfuerzo que desplazara las puntas superiores de los elementos rígidos hacia abajo. (Fig. 15)

Para esto, se usó un conjunto de anclajes con clavos pequeños que fijaban una tela en cada esquina de los puntales formando una superficie en las caras laterales. El intento fue de plegar la altura del artefacto, para esto se tejió un hilo grueso en la tela haciendo costuras en tres partes del camino por el que pasa el hilo, con la intención de controlar el plegado a medida que se tira del hilo. (Fig. 15)

El objetivo era que desplazaran los puntales gradualmente reduciendo la altura de la estructura. Se esperaba que la superficie se plegara en tres partes, volviendo a su sitio junto con los puntales al soltar del hilo por medio de los elementos elásticos que generan el esfuerzo contrario.

Al final del experimento se redujo levemente la altura de la estructura, aproximadamente en 2 cm llegando a frenar en la primera costura, pero con mayor dificultad de continuar el descenso a medida que se seguía tirando. (Fig. 16)

Se observó, que las costuras por donde pasaba el hilo al tirar contraían más la tela hacia adentro, esto hizo que el anclaje en las esquinas contrajera en

sentido horizontal las puntas de dos elementos rígidos opuestos a cada uno. Por lo tanto, el prototipo no se contrajo lo suficiente verticalmente, pero si alrededor de 3 cm en su horizontal (Fig. 16).

Por otro lado, la tela si volvía a su configuración inicial debido a como el cambio era leve no necesitaba mucho esfuerzo de los elementos tirantes. Al final, está terminó volviendo casi exactamente a su apariencia original.

Como resultado, se propuso ver si el sentido de los tejidos en la horizontal podría acentuar el movimiento logrado en los puntales o si se podría contraer más los elásticos.

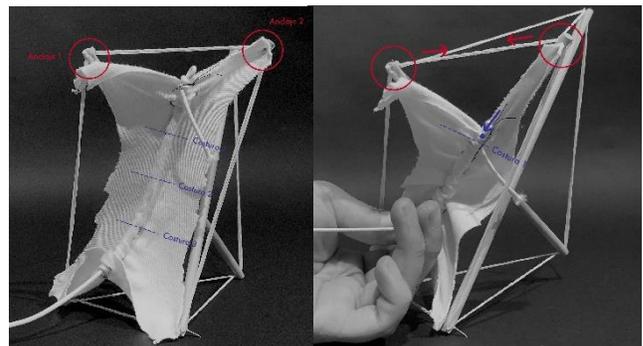


Fig. 16: Prototipo 1 movimiento estático /accionado. Fuente: Elaboración propia.

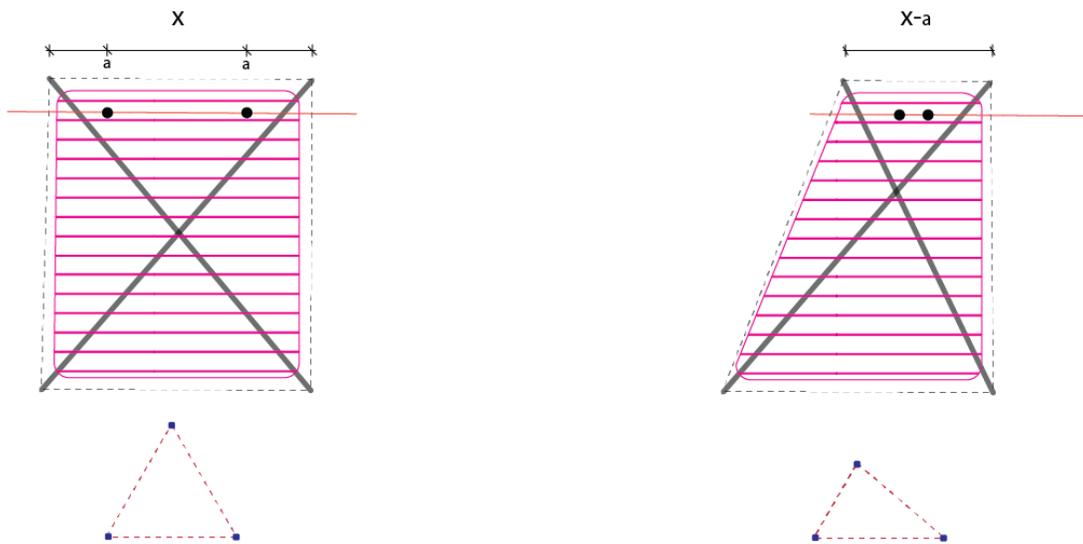


Fig. 17: Diagrama de prototipo 2. Fuente: Elaboración propia.

Experimento 2

El siguiente experimento puso en prueba la conclusión anterior. Se intentó acentuar el movimiento tejiendo el hilo por el tramo horizontal superior de la tela, con el motivo de generar un movimiento controlado por una superficie plegable para contraer la cara superior del prototipo escalable (Fig.17).

Está, se aplicó en la misma cara anterior con los mismos anclajes. La única diferencia es el sentido de movimiento y el número de costuras que se colocaron, las cuales fueron dos de 2 cm entre cada una.

Se ensayaron dos intentos, uno en el tejido superior y otro por el medio de la tela. El tejido superior mostró deformar de manera más acentuada los elementos elásticos sin unir los elementos rígidos al punto de tocarse. Con los tejidos del medio se movieron en ciertos grados los puntales, pero notaban deformar más la superficie textil que los elementos de la estructura (Fig.18).

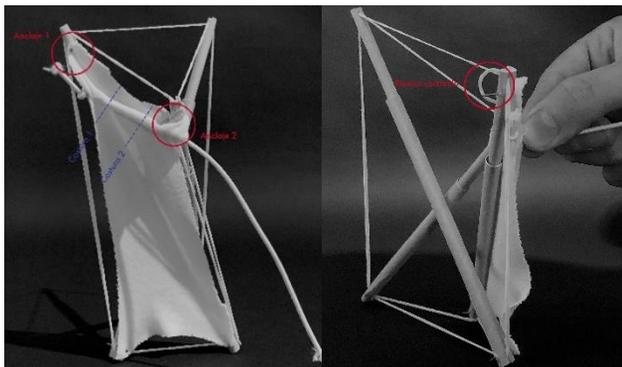


Fig. 18: Prototipo 2. Fuente: Elaboración propia.

A modo de evaluación, se observó que el accionamiento manual del experimento funcionó en acentuar el movimiento de contracción en la arista superior, lo cual también determina que los parámetros cambiados logran un movimiento más enfatizado que el anterior (Fig.19).

Se determina que al aplicar la tela a las tres caras laterales la contracción se vuelve más compleja pues necesita de al menos un punto fijo en cada puntal para contraerlos hacia cada uno. Además, pudiese mejorar si se utilizará la cara basal superior o inferior del objeto para contraer todos los puntales con un solo cordel que siguiera la dirección de las aristas.

Por último, se determinó que con una sola costura al medio daba suficiente control manual sobre la arista y si se llevará al módulo a una escala mayor este necesitaría de más costuras.

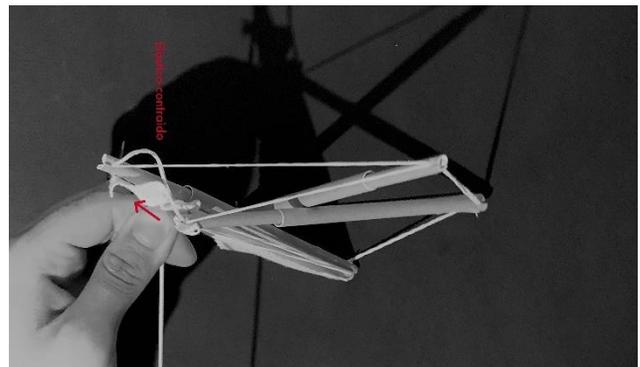


Fig. 19: Prototipo 2 en movimiento. Fuente: Elaboración propia.

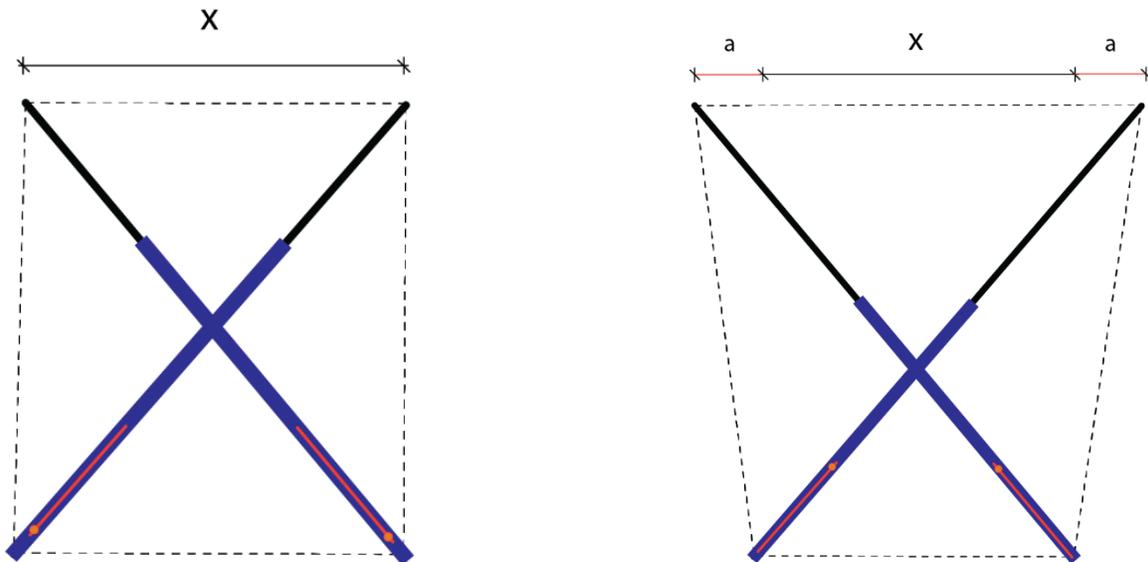


Fig. 20: Diagramas de prototipo 3. Fuente: Elaboración propia.

Experimento 3

El siguiente experimento pone a prueba las partes rígidas del módulo escalable viendo como alargar la longitud inicial de los elementos volviendo a su largo inicial por medio de la red tensil. Con el objetivo de lograr que se escale y al mismo tiempo aumente en tamaño (Fig.20).

Se probó un ensayo de pistón como visto en la investigación de Kuan-Ting Lai que consiste en dos elementos, donde la primera parte es de mayor grosor y más corta con un largo de 14.7 cm; la otra parte es un elemento alargado y delgado con una longitud de 20 cm que va al interior de la parte gruesa. Estos se unen por un clavo pequeño que va por una ranura definida en un tramo del primer elemento rígido. Luego se anclan a la red tensil normal para que al momento de estirarlas estas luego vuelvan a su posición normal (Fig.21).

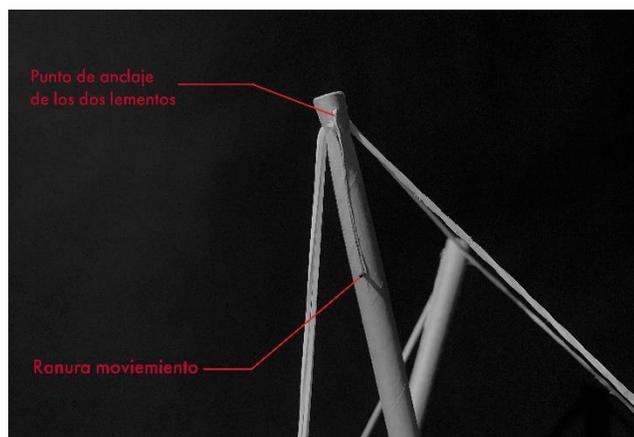


Fig. 21: Detalle prototipo 3. Fuente: Elaboración propia.

Al probar el ensayo de pistón en los tres puntales se observó que la estructura no puede superar el largo total inicial en el segmento del puntal que se estira, debido a que este perdía estabilidad en la base y ha medida del camino. Por esto, las ranuras deben ser a menos de un tercio del largo total del primer elemento (Anexo 1).

Se observó que el cambio es significativo si es que no supera los parámetros dichos anteriormente manteniéndose estable. Por otro lado, las caras basales también llegaron a escalarse, pero el cambio en movimiento fue menos significativo. Dando la impresión de que requiere de otro accionamiento en los elementos de tensión para lograr enfatizar la reconfiguración (Fig.22).

Como mejora posible, si se adaptará el pistón de manera que a medida que se alargue esté se detuviese en tramos del camino, tendría más alcances de reconfiguración (Ej. inicial, segunda distancia y final).

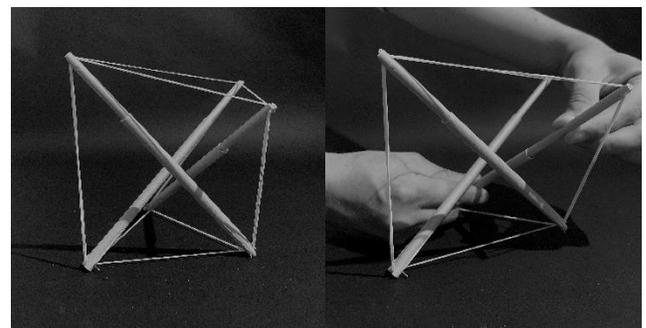


Fig. 22: Prototipo 3 estático y en movimiento. Fuente: Elaboración propia.

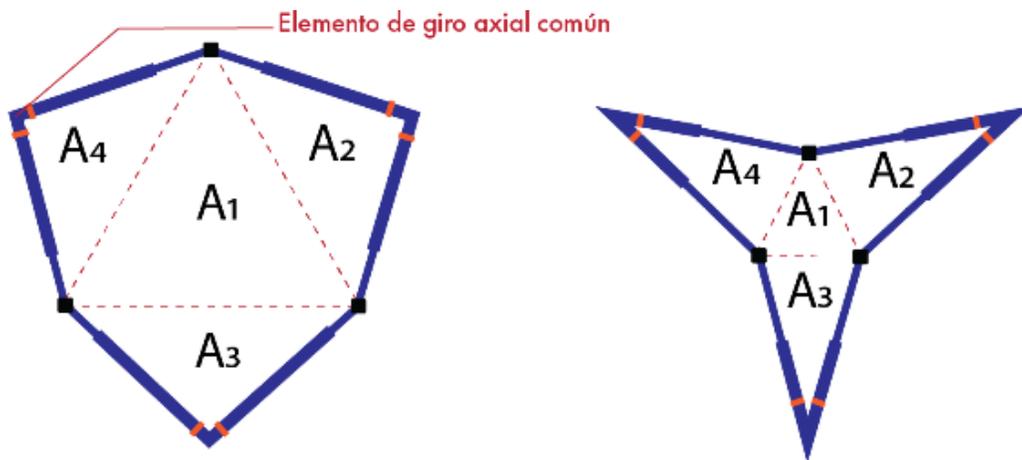


Fig. 23: Diagramas de prototipo 3. Fuente: Elaboración propia.

Experimento 4

El experimento probó escalar el ancho del módulo de forma horizontal por medio del control sus ejes laterales. Con el motivo de si se al controlar el ancho por medio de estiramientos de la red tensil se lograba ver otros movimientos en la totalidad del objeto que pudiesen ser enfatizados (Fig.23).

Para esto, se intentó sumar elementos rígidos que pudiesen doblarse para observar cómo afectaban la red tensil y a los demás elementos rígidos, anclándolos a la red. Los cuales, estaban compuestos de dos elementos rígidos cortos, unidos por un solo punto al extremo de cada uno formando un giro axial común similar al de una tijera.

La manera en que se fijaron los tres objetos fue que los dos extremos de cada elemento tipo tijera se anclaron a un eje vertical de la red tensil, de tal manera que rodeaban el perímetro del objeto (Fig.24).

Además, se hizo un amarre con un elástico grueso en el punto de unión que permitía al cerrar las "tijeras" pudiesen volver a reconfigurarse a su forma inicial (Fig.24).

Se generaron dos movimientos que fueron principalmente la ampliación de los bordes elásticos y la contracción por medio de los mismos elementos rígidos añadidos. En el cual, la ampliación fue parcialmente notable (Fig.25).

Se observó que al doblar los elementos se contraían y separaban algunos elásticos verticales notando un cierto binarismo de control donde si los elementos elásticos controlasen las partes que se doblan pudiese haber un doble control en la estructura (Anexo 2).

También, se determinó que los elementos tipo tijera tienen dificultad en mantenerse anclados y por lo tanto dificulta el control. Necesitando un tipo de tope que los mantenga en sitio.

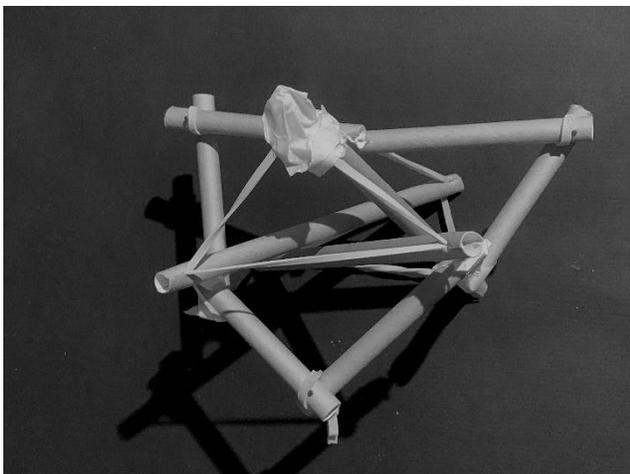


Fig. 24: Prototipo 4 estático. Fuente: Elaboración propia.

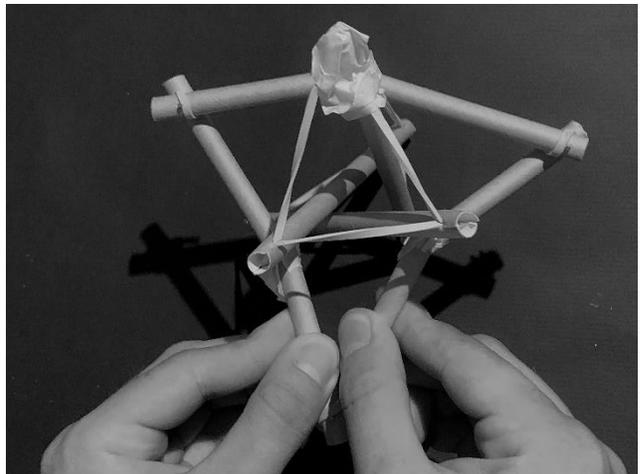


Fig. 25: Prototipo 4 accionado. Fuente: Elaboración propia.

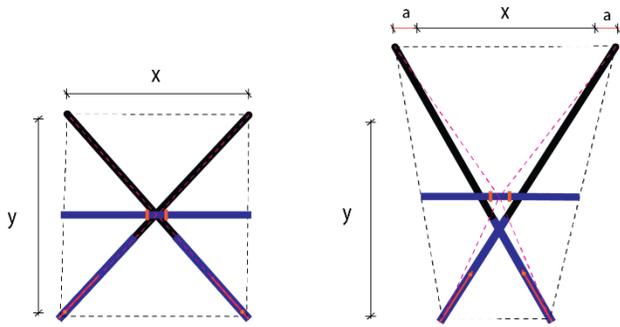


Fig. 26: Diagramas de prototipo 5. Fuente: Elaboración propia.

Experimento 5

El experimento surge de la evaluación de los experimentos 3 y 4, con la intención de determinar si los movimientos parcialmente logrados en estos pudiesen acentuar mejor y junto a los logrados probar si son compatibles en un solo prototipo. (Fig.26 y 27)

Para el caso se utilizó la estructura de tres pistones junto a la subestructura de elementos rígidos tipo "tijera", también ancladas en los mismos sitios, pero se les agregó un sistema de pistones en cada elemento para que el objeto pudiese estirarse en su altura, escalarse y contraer el área del objeto.

La unión de estas dos estructuras formó una geometría más compleja, dado que se agregaron dos elásticos en cada cara lateral formando un triángulo inverso por encima de un triángulo común. En estos, las esquinas de cada triángulo se forman al anclarse en los pistones existentes y anclando la punta en las esquinas de los elementos de giro axial.

Como resultado se denotaban movimientos tanto de extensión y contracción bien marcados en el módulo (Fig.28). De los dos, el movimiento de contracción fue el más evidente y fácil de manipular (Fig.29)

No hubo una respuesta satisfactoria al escalar la cara basal por medio de los elementos de pistón en el eje Y, en cambio, el eje X si mostró mejor respuesta tanto con los pistones como al contraer la figura.

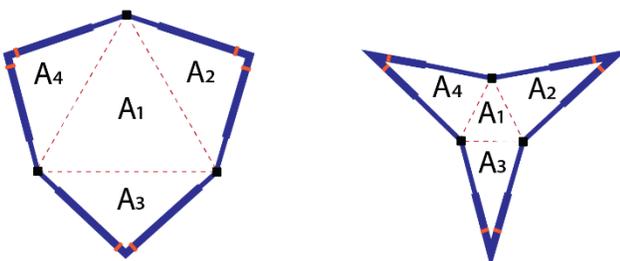


Fig. 27: Diagramas de prototipo 5. Fuente: Elaboración propia.

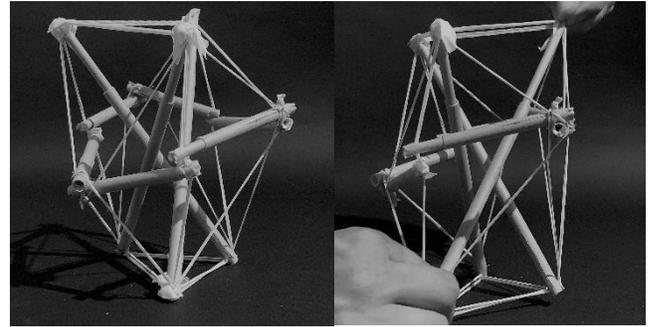


Fig. 28: Prototipo 5 estático y accionado. Fuente: Elaboración propia.

Por un lado, los elásticos de la cara basal quedaban flojos y luego volvían a quedar tirantes al dejar de contraer. Por el otro, al estirar sus pistones el cuerpo total del objeto también se agrandaba considerablemente (Fig.29).

Se observó una complejidad al momento de querer extender los pistones y doblar los elementos "tijera" simultáneamente, resultando en una dificultad al accionar los dos movimientos y que estos no se separan entre sí. (Anexo 3)

Se notó además que el prototipo respondía bien al volver a su configuración inicial, pero con el tiempo el sobre estiramiento de los elásticos generaba que los elementos agregados no se mantuvieran en su sitio.

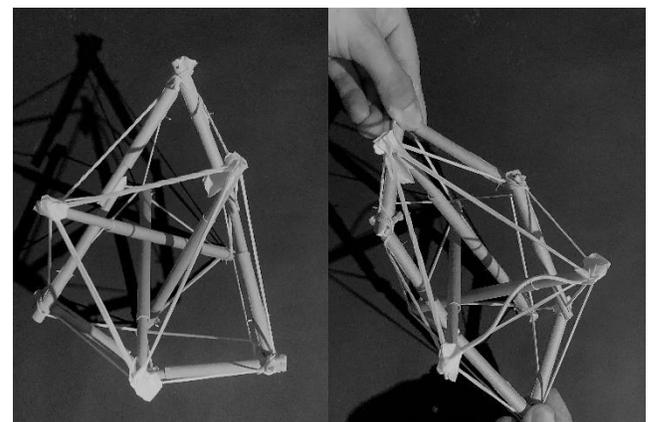


Fig. 29: Prototipo 5 estático y accionado. Fuente: Elaboración propia.

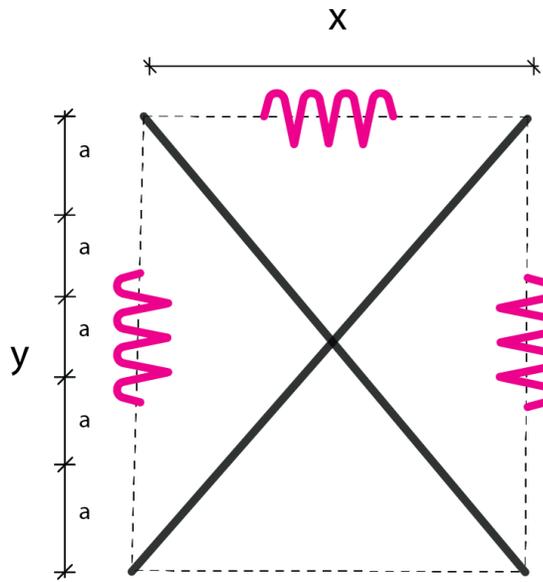


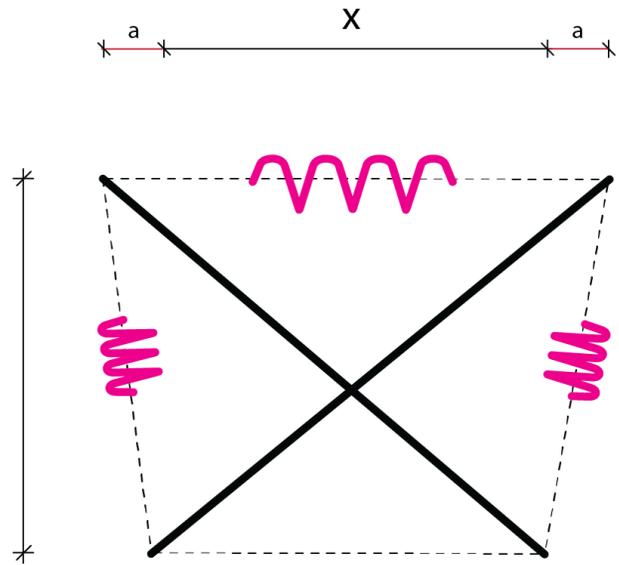
Fig. 30: Diagramas de prototipo 6. Fuente: Elaboración propia.

Experimento 6

En tal experimento se pusieron a prueba movimientos de contracción y estiramiento simultáneo únicamente en los elementos elásticos. Con el objetivo de encontrar un accionamiento que resulte de la reconfiguración de los elementos elásticos (Fig.30).

El experimento se llevó a cabo por medio de distintas distribuciones de resortes a compresión ubicándolo a medio tramo de cada elástico, la idea fue de accionar el movimiento a mano para visualizar cuanto realmente es el cambio.

Se probó dos tipos de configuraciones. En la primera, se probaron resortes de distinto largo y grosor. En el segundo se intentó contraer el elástico por medio de dos resortes unidos en sus puntas y anclados a los extremos de cada elástico cortado a la mitad (Fig.31).



A modo de evaluación, se observó que los resortes con mayor grosor funcionaban de mejor manera que los largos, puesto que la separación entre cada anillo del resorte se marcaba más al tener más tramo de alargue (Fig.32).

La contracción por medio de la segunda configuración resultó satisfactoria, reduciendo en al menos 3 centímetros la altura de la arista de la cara lateral. Depende de un control fácil de accionar manualmente, pero difícil de ubicar, puesto que los resortes al volver a su configuración inicial costaban mantenerlos anclados entre sí (Anexo 4).

Además, la idea del experimento mostró un nuevo problema en cómo controlar el estiramiento de la misma manera mediante una sola configuración de resorte que lograse estirar y contraer los elásticos.

Viéndolo de este modo, el hecho que se requirieran de dos configuraciones distintas genera la situación de encontrar un solo accionamiento y material para los elementos elásticos.

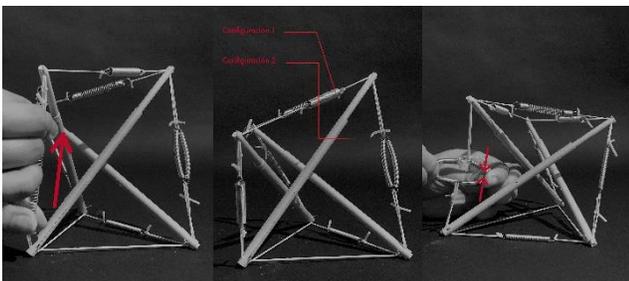


Fig. 31: Secuencia de movimientos Prototipo 6. Fuente: Elaboración Propia.

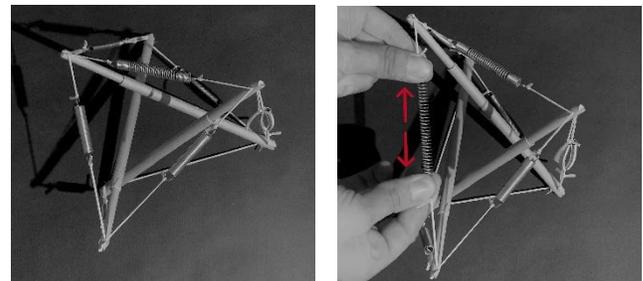


Fig. 32: Prototipo 6 estático y accionado. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Resultados

Experimentos	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5	Exp.6
Objetivo	Cambios de altura	Contracción de caras	Estiramiento y escala	Ampliación, movimientos secundarios	Acentuar movimientos	Estiramiento y contracción
Resultado	No logrado	Logrado	Logrado Parcialmente	Logrado parcialmente	Logrado	Logrado parcialmente
Elementos controlados	Elementos rígidos	Elementos elásticos	Elementos rígidos	Elementos elásticos	Elementos rígidos y elásticos	Elementos elásticos

Tabla. 1: Compilación de información base de experimentos y resultados. Fuente: Elaboración Propia.

A modo de analizar los resultados de los experimentos y llegar a un resultado final, se elaboró una tabla que registra cada experimento en logrado, logrado parcialmente y no logrado.

El primer experimento se categoriza como no logrado puesto que no obtuvo de forma marcada el cambio de la altura del objeto, por lo tanto, no mostró una reconfiguración. Si se apreció un movimiento no anticipado, lo cual dio paso a poner a prueba otros objetivos (Tabla 1).

El segundo experimento se considera logrado puesto que si presenta visiblemente una contracción de las caras basales de al menos 6 centímetros logrando que estas se reconfiguren. Aun así, la reconfiguración contrae el elástico de la cara superior pero no lo estira. También, no es sencillo de controlar simultáneamente todas las aristas del triángulo (Tabla 1).

El tercer experimento se consideró logrado parcialmente dado que, el objetivo era alargar los elementos rígidos del objeto y escalar los elásticos que forman la cara superior. Si hubo un aumento de altura significativo aludiendo a que un pistón es efectivo, estirándose fácilmente y aumentando entre 2 cm a 6 cm los 15 cm de altura inicial. Por otro lado, no es efectivo para agrandar áreas. Se intentó direccionar las cabezas de los puntales más aparte de cada una, resultando en un cambio de escala notable, pero reduciendo la capacidad de conseguir mayor altura. Se infiere, que si se configuraran los elásticos basales para así redireccionar los puntales sería más sencillo conseguir cambios de altura y escala (Tabla 1).

El cuarto experimento logró el objetivo de escalar el área del módulo de forma horizontal mostrando otros movimientos accionados. Aun así, el movimiento que no se logró definir lo suficiente fue

el de ampliación al mover los elementos tipo tijera (Tabla 1).

El quinto elemento se considera logrado puesto que cumple con el objetivo de acentuar mejor los movimientos que los experimentos 3 y 4 no detallaron lo suficiente. El movimiento de contracción mediante los elementos tipo tijera fue el más evidente y fácil de manipular. En el caso de los pistones puestos en los elementos rígidos verticales nuevamente no lograron ampliar el módulo, pero si los combinados en los elementos tijeras (Tabla 1).

El último experimento cumple parcialmente con el objetivo de lograr ambos movimientos de estiramiento y contracción mediante los elementos elásticos. Se logran ambos comportamientos, pero no en todas las aristas, mostrando problemas al ubicar los resortes que contraen el elástico, también en controlar ampliación vertical resultando mejor en la horizontal y resultando en un nuevo problema de cómo lograr con un mismo elemento ambos accionamientos (Tabla 1).



Fig. 33: Prototipo en máxima altura. Fuente: Elaboración propia.

5. Prototipo final

Después de analizar la serie de experimentos se escogieron ciertos aspectos para decidir en un prototipo final (Fig.33)

Se escogió el uso de un sistema de pistones para poder controlar los elementos rígidos debido a que el control de los elementos es más sencillo manualmente, además que lograba mayores alturas que el resto de los experimentos y aportando en un cierto grado, aunque menor, al ampliar la estructura (Tabla 1).

Para formar la configuración de elementos rígidos se optó por usar un juego de pistones para puertas de repisas entre 14 cm de largo y 20 cm de largo al extenderse, los cuales con mínima presión varían su largo, llegando 6 cm más de la inicial (Fig.34).

Para los elementos elásticos se optó por probar un juego de resortes, debido a que ofrecían controlar varios ejes simultáneamente como individualmente siendo que el largo de extensión podría variar según el grosor del anillo y el largo de la pieza (Tabla 1).

Para esto se escogió usar aleaciones de nitinol con memoria de forma, basado en el experimento seis, para controlar los elementos elásticos posicionando un ensayo de "resorte" en cada elemento de los triángulos superiores (Fig.35). Se programaron manualmente amarrando el alambre a una varilla y sometiéndolo a una temperatura por encima de los 300°C quedando programadas tres piezas, ubicadas en la base superior del prototipo. De este modo, la aleación permite con cambios de temperatura (30° para activar) contraer o estirar el perímetro de la estructura resultando en un movimiento de expansión (Fig.36).

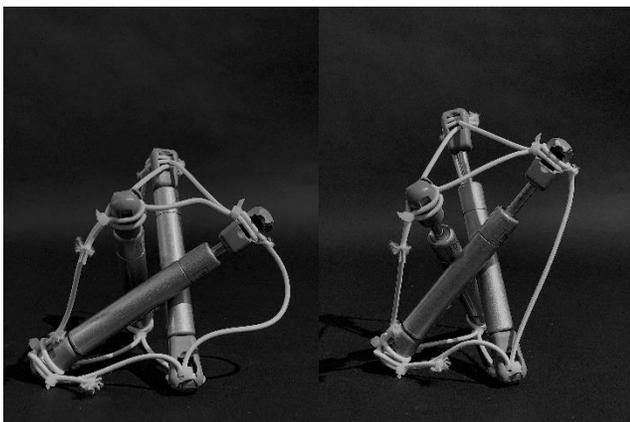


Fig. 34: Prototipo en movimiento. Fuente: Elaboración propia.

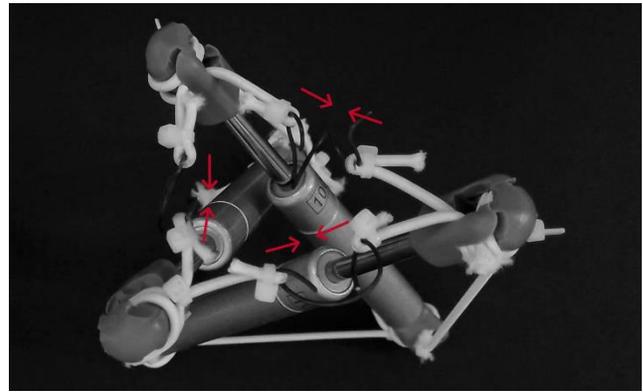


Fig. 35: Cara basal ampliada. Fuente: Elaboración propia.

5.1. Resultados

Como resultado, se obtuvo un aparato que logra alargar cada elemento rígido en 6 cm oscilando entre 10 cm a 15 cm la altura vertical total del objeto, pudiendo extender los puntales libremente a lo largo del trayecto como resultado del análisis del experimento 3, por lo tanto, aumentando la variabilidad de alturas (Anexo 5). Esto facilitó ampliar las caras superiores, puesto como los largos totales varían se pueden posicionar las puntas más separadas entre sí y así marcar mejor la ampliación (Fig.35). Aun así, los elementos rígidos por sí solos no generan un alcance suficiente de escala. Por lo mismo, se fijaron las piezas de nitinol de 3cm en los elásticos superiores por medio de huinchas de amarre. Las piezas lograron extenderse y contraerse entre sí, variando de un área de 22 cm² a 42.4 cm² (Fig.36).

A modo de síntesis, se logró resolver la problemática del seminario resultando en un aparato que permite mediante dos accionamientos distintos generar dos tipos de movimientos, donde los accionamientos ocurren dentro de un sistema neumático en los elementos rígidos y mediante un sistema de

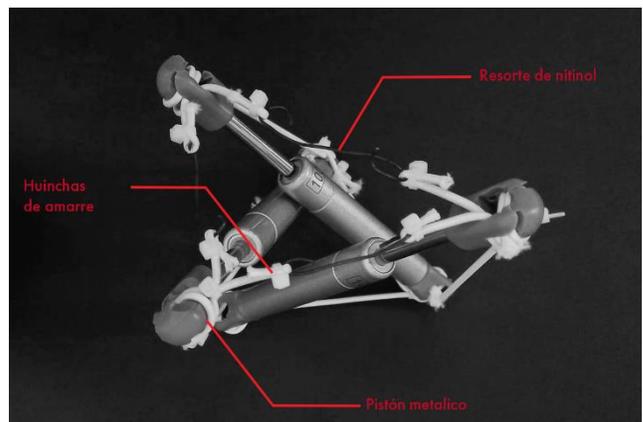


Fig. 36: Prototipo contraído. Fuente: Elaboración propia.

plegado de las piezas de nitinol que se activan en los elementos elásticos. Logrando extender de las caras laterales y escalar las caras basales, estirando y contrayendo sus aristas.

6. Conclusiones

Fruto de la investigación sobre la capacidad de reconfiguración de las estructuras de tensegridad hubo aspectos relevantes del origen de la tensegridad, el estudio de investigaciones contemporáneas y el trabajo con prototipos que se pueden destacar:

Existe una dificultad de manipulación y armado con la tensegridad por la cantidad de elementos que compone siendo hasta el módulo geométrico más básico un desafío que resulta en varios intentos de componer y unir piezas. Aun así, este hecho también ofrece muchas opciones para elaborar pruebas, estas traducibles en distintas maneras de armar un módulo, adaptando o agregando nuevos elementos a sus elementos existentes múltiples veces.

En general, el foco sobre las transformaciones en las investigaciones estudiadas se centra en trabajar más con los elementos rígidos del sistema. Sin embargo, la fase de experimentación da cuenta que hay también varias posibilidades de trabajo en los elementos elásticos ofreciendo soluciones que son más versátiles y que invitan a más posibilidades de explorar, dado que la red tensil estabiliza los elementos de comprensión, donde al intervenirla se logran cambios que afectan a toda la estructura y que esta misma devuelve a su configuración inicial.

Tomando en cuenta la experiencia de trabajar con un módulo de tensegridad se puede inferir que sus comportamientos pudiesen ser aplicados a mayor escala mediante la agregación de módulos que configuren un sistema mayor, que acentúen más los movimientos.

La exploración con tensegridad reconfigurable dio cuenta que mediante el trabajo con sus prototipos dinámicos se presenta en sí misma como una herramienta para el arquitecto que le ayuda a proyectar y tomar decisiones en torno a la reconfiguración de un espacio.

En línea con la idea anterior, el método de trabajo que se exploró con la tensegridad propiciaba la decisión de armar y desarmar múltiples veces un objeto para comprender sus partes y luego adaptarlas. En sí, dio luz a que se estaba desarrollando una herramienta de trabajo, que se le

pueden apartar sus partes para tomar decisiones entorno a la adaptabilidad.

Sobre el aprendizaje investigativo fue relevante vincular un proceso experimental con investigaciones previas. Puesto que, al estudiarse los procesos de trabajo, los tipos de sistemas, las decisiones de materiales y las conclusiones en diseños de movimiento, se comenzó a formar una exploración propia, proveniente de la información extraída. Demostrando que existe un método de trabajo que combina la síntesis de estudios pasados con la creatividad propia para resolver un problema de investigación.

Finalmente se concluye que la serie experimental da cuenta que es posible utilizar los elementos rígidos y elásticos de un sistema de tensegridad para generar reconfiguraciones híbridas de más de un movimiento. Los siguientes pasos que explorar a base de esta investigación serían aplicar un sistema que accione los pistones y resortes de nitinol simultáneamente explorando los límites de sus movimientos. Además, traducir los comportamientos a una escala mayor poniendo a prueba la aplicación del módulo en una estructura arquitectónica con más variables para reconfiguración espacial.

Anexos

Todos los anexos están disponibles en la carpeta web: https://drive.google.com/drive/u/1/folders/17hfal6XYfkAC1Q_CCOgu2q9aycGcFnc2

- Anexo 1: Vídeos de prototipo 3 (movimientos)
- Anexo 2: Vídeos de prototipo 4 (movimientos)
- Anexo 3: Vídeos de prototipo 5 (movimientos)
- Anexo 4: Vídeos de prototipo 6 (movimientos)
- Anexo 5: Vídeos de prototipo final (movimientos)

Bibliografía

- Abdelmohsen, S., Massoud, P., & Elshafei, A. (2016, agosto). Using tensegrity and folding to generate soft responsive architectural skins. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/308888013_Using_Tensegrity_and_Folding_to_Generate_Soft_Responsive_Architectural_Skins
- Buckminster Fuller, R., & Applewhite, E. J. (1975-1979). Synergetics: Explorations in the geometry of thinking (1.a ed., Vol. 1). Macmillan Publishers.

- https://www.academia.edu/39597781/SYNERGETICS_Explorations_in_the_Geometry_of_Thinking
- Burkhard, R. W. (2008). A practical guide to tensegrity design (2.a ed.). <https://www.coursehero.com/file/44013645/A-Practical-Guide-to-Tensegrity-Design-2nd-editionpdf/>
- Deepak, Y., Bursa, J., & Nandanwar, D. (2018, 20 agosto). Research gate. http://www.engineeringmechanics.cz/pdf/21_5_355.pdf. <https://www.researchgate.net>
- Dessi-Olive, J. (2019, 10 octubre). Self-Deploying tensegrity structures with inflatable struts. Academia. https://www.academia.edu/40630460/Self-Deploying_Tensegrity_Structures_with_Inflatable_Struts?source=swp_share
- Ford, J. (2012). Can architecture become more sustainable through the technological advancements of kinetic and responsive structures and skins. Academia. https://www.academia.edu/9221041/CAN_ARCHITECTURE_BECOME_MORE_SUSTAINABLE_THROUGH_THE_TECHNOLOGICAL_ADVANCEMENTS_OF_KINETIC_AND_RESPONSIVE_STRUCTURES_AND_SKINS
- Fox, M. A., & Yeh, B. P. (2017). Intelligent kinetic systems. MIT, 3-10. <http://kdg.mit.edu>
- Fuller, R. B. (1961). Tensegrity. Portfolio and Art News Annual, 4, 1. <http://www.rwgrayprojects.com/rbfnote/fpapers/tensegrity/tenseg01.html>
- Ingber, D. E. (2012, 8 febrero). Tensegrity - Scholarpedia. Scholarpedia. <http://www.scholarpedia.org/article/Tensegrity#Introduction>
- Lai, K.-T. (2016). Reconfigurable tensegrity systems. University of Stuttgart. <https://www.itke.uni-stuttgart.de/teaching/past-student-projects/reconfigurable-tensegrity-systems/>
- Moored, K. W., & Bart-Smith, H. (2009, 16 agosto). Investigation of clustered actuation in tensegrity structures. Science Direct, 46(17). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309001826>
- Osama Elkhayat, Y. (2014, mayo). INTERACTIVE MOVEMENT IN KINETIC ARCHITECTURE. Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering, 42(3). https://www.researchgate.net/publication/285578938_INTERACTIVE_MOVEMENT_IN_KINETIC_ARCHITECTURE
- Osório, F., Paio, A., & Oliveira, S. (2017). Kinetic origami surfaces from simulation to fabrication. Future trajectories of computation design CAAD Futures, 17, 229-231. <http://www.caadfutures2021.org>
- Papantoniou, A. (2017, julio). Parametric models of tensegrity structures with double curvature. Archi Doct, 5(1). http://www.archidoct.net/Issues/vol5_iss1/ArchiDoct_vol5_iss1%2004%20Parametric%20models%20of%20tensegrity%20structures%20Papantoniou.pdf
- Pugh, A. (1976). An introduction to tensegrity. Univ of California Pr. <https://www.scribd.com/document/76007955/An-Introduction-to-Tensegrity-by-Pugh>
- Skelton, R. E. (2006, enero). Dynamics and control of tensegrity systems. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/226676102_Dynamics_and_Control_of_Tensegrity_Systems
- Snelson, K. (2018). Tensegrity, weaving and the binary world. http://kennethsnelson.net/Tensegrity_and_Weaving.pdf
- Veuve, N., Dalil Safaei, S., & Smith, I. F. C. (2015, enero). Active control for mid-span connection of a deployable tensegrity footbridge. Research Gate. https://www.researchgate.net/publication/284753193_Mid-span_connection_of_a_deployable_tensegrity_footbridge
- Won Jun, J., Silverio, M., Alcover Llubia, J., Markopoulou, A., Chronis, A., & Dubor, A. (2017). Remembrance: A shape changing adaptive structure. CAAD Futures. <http://www.caadfutures2021.org>