

EJE DE FORMACIÓN EN INVESTIGACIÓN

MONOGRAFÍA

ESTUDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y DECONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA

TENSEGRITY

Autores

Angie Nathalia Canoa Gámez

Luis Daniel López Escobar

Andrés Rodríguez Patiño

Asesor

Diana Alejandra Urdinola Serna

Alejandro Alberto Zuleta Gil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN – ANTIOQUIA

2018

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	5
1.1 Presentación.....	5
1.2 Resumen	5
1.3 Palabras clave	6
2. Planteamiento del problema	7
2.1 Tema general del proyecto	7
2.2 Características generales del proyecto de investigación.....	7
2.3 Problema de investigación identificado.....	8
2.4 Elementos del problema de investigación	8
2.5 Limitaciones de la investigación.....	8
3. Justificación.....	10
4. Marco de referencia.....	11
4.1 Antecedentes	11
4.2 Estado del arte	18
5. Objetivos.....	24
5.1 Objetivo general	24
5.2 Objetivo específico.....	24
6. Metodología	25
7. Resultados y discusión.....	29
7.1 Descomposición de la estructura.	29
8. Conclusiones.....	33
9. Referencias	35

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Estructuras tensegrity (a) “simplex” y (b) poliedro “antiprisma	11
Figura 2 Configuraciones rómbicas.....	11
Figura 3 Estructura que hace parte de las esferas de tensegridad R Buckminster Fuller.	12
Figura 4 La primera estructura.....	12
Figura 5 Aplicaciones de estructuras tensegrity	13
Figura 6. El mecanismo tipo paraguas	14
Figura 7 estructura en tijera (a) completa y (b) Demostración de una tijera	14
Figura 8 Plegar método aspa (a) fase inicial de la aspa y (b) estructura de triangulo en aspa.	15
Figura 9 Estructura desplegada de cuatro etapas con puntales bi-estables.....	16
Figura 10 (a) Domo tensegrity diseñado por Richard B. Fuller. 1953	16
Figura 11 Domo Geodésico	17
Figura 12 Subdivisiones en partes iguales y grados de complejidad.....	17
Figura 13 diferentes domos.....	17
Figura 14 (a) Walther Bauersfeld en Berlin y (b) Walther Bauersfeld primeros prototipos	18
Figura 15 Primera cúpula desarrollada a gran escala.....	18
Figura 16 Domo tensegrity, Jhon Warren 1982.....	18
Figura 17 vectores de una cúpula geodésica y su fabricación.	19
Figura 18 Exposición universal de Montreal	19
Figura 19 Trípode tensegrity.....	20
Figura 20 Oct6net	20
Figura 21 Estructura tensegrity diseñada por Kenneth Snelson	21
Figura 22 Octaedro de 6 mástiles.....	21

Figura 23(a) Primera cúpula y (b) pirámide de Fuller de aspersión.	21
Figura 24 Aviario en el Zoo de Londres 1960- 1963.....	22
Figura 25 (a) Proyecto viVood – (b)casa plegable, transportable sobre sus bases	22
Figura 26 Desarrollos de estructuras plegables geométricas.	22
Figura 27 Sombrilla plegable tensegrity	23
Figura 28 Mapudungun Domo.....	23
Figura 29(a) comportamiento estructura descompuesta y (b) los puntos de unión	25
Figura 30(a) composición del palillo y (b) detalle del vértice en el palillo	25
Figura 31(a) barras de cetro con tornillo y (b).....	26
Figura 32 unión entre dos barras por medio de un nudo con el cable	26
Figura 33 modelo digital domo tensegrity	27
Figura 34 Maqueta para la matriz de los cables.....	28
Figura 35 Maqueta estructura tensegrity con las intervenciones	28
Figura 36 maqueta de un icosaedro truncado y su composición	29
Figura 37 Análisis de la geometría del icosaedro	29
Figura 38 primera maqueta de la estructura tensegrity	30
Figura 39 Domo simple tensegrity.....	31
Figura 40 Maqueta software grasshopper	31
Figura 41 (A) sistema de telescopio en pentágonos y(B) hexágonos	32
Figura 42 vértice de una estructura tensegrity	32
Figura 43 vértice con ensamble de polímero	32

1. Introducción

1.1 Presentación

La siguiente investigación se enfoca en las estructuras *tensegrity*, definidas por su equilibrio de tracción y comprensión, con la composición de barras que se mantienen en su posición por medio de cables tensados de tal manera que se soporta a sí misma. Las estructuras tensegrity se clasifican en tres categorías: torre, arco y domos, estas tienen los mismos principios, pero se distribuyen de diferentes formas. Las estructuras tensegrity en domo tienen la capacidad de distribuir las fuerzas ya que su forma y composición distribuyen el impacto, por esto son potenciales para usarse como referencia en construcciones con el fin de resguardar, pero la información en cuanto a la posibilidad de métodos para la construcción y deconstrucción con el fin de reducir la estructura es básica y no se ha explorado a gran escala, por esto es una oportunidad para investigar, además se encuentra un potencial problema, la dificultad para transportar estas estructuras debido que no hay manera de guardarlas a menos que se descompongan en totalidad, para esto se indaga la posibilidad de plegar dichas estructuras con el fin de ampliar las prácticas en las que se usan las estructuras tensegrity en domo y se utilizara como principio de la investigación los domos icosaedricos ya que son el punto de partida para estructuras más complejas.

1.2 Resumen

La presente investigación se refiere al estudio de la estructura tensegrity basada en un icosaedro truncado propuesto por Richard B. Fuller con el fin de buscar su posible plegabilidad, para lo cual se analizó la composición de las partes de la estructura, logrando manifestar que por medio de los vértices preensamblados se puede generar la estructura con facilidad en comparación a la que se

usa comúnmente siguiendo los patrones de pentágonos y hexágonos; además al usar este tipo de ensambles se evidenció que las tensiones se pueden fabricar de manera independiente permitiendo que al momento de que falle una tensión no se pierda la estabilidad de la estructura y se pueda reemplazar fácilmente la parte afectada.

Por otro lado se pudo analizar en el comportamiento de la estructura, que al momento de disponer una sección hexagonal en la parte superior del domo esta tendrá mayor estabilidad que al momento de poner un vértice, permitiendo que todas las barras que hacen de punto de apoyo con respecto a la superficie de un domo *tensegrity*, queden en contacto; finalmente, por medio del cambio de material de los elementos tensores de las estructura se pudo llegar a comprobar la posibilidad de plegar elementos con tensegridad, ya fuese la sección del vértice o el domo tensegrity en conjunto por medio del aumento o perdida de tención de un elemento unitario en la parte inferior de la estructura, logrando que todo el elementos pueda colapsarse sin la necesidad de su desensamble por completo.

1.3 Palabras clave

Tensegridad – plegado – domos – estructuras – empaquetado

2. Planteamiento del problema

2.1 Tema general del proyecto

Las estructuras *tensegrity* son utilizadas mayormente en la arquitectura o a nivel estético. Estas son conocidas por su Composición de hilos y barras, que generan la percepción de “flotar”, las cuales pueden tener todo tipo de proporciones y dimensiones, basadas en figuras poliédricas; Con la que esta investigación pretende trabajar es la esfera *tensegrity* basada en un icosaedro truncado, propuesta por Richard B. Fuller; aun así, no se ha investigado por completo acerca de esta estructura tensegrity, es por esto que se encuentra una oportunidad de investigar su posible plegabilidad; que ha sido un importante hallazgo en las estructuras *tensegrity* en torre, pero los domos requieren más espacio, por lo cual su plegabilidad se hace compleja de realizar; por esto, el tema a investigar es su posible plegabilidad, con lo cual se debe de analizar las características físicas de la estructura y el comportamiento de los elementos tensores que la componen.

2.2 Características generales del proyecto de investigación

Las estructuras *tensegrity* tienen grandes cualidades físicas como el soportar fuerzas de tracción y compresión, con la posibilidad de soportar cargas externas utilizando la menor cantidad de material posible, permitiendo estructuras completamente auto portantes, sin embargo, las estructuras, *tensegrity* de domo son ensambladas en un punto fijo, en algunos casos sus dimensiones formales impiden su transporte, por lo que si es necesario trasladarlas estas deben ser desensambladas completamente para realizar su transporte. Por lo tanto, estudiar las posibilidades del plegado en las estructuras *tensegrity* de domo simple mejorara la portabilidad al momento de ser transportada y brindar una disminución de tiempo al momento de ser

ensamblado, dando la posibilidad de implementar estas estructuras en situaciones que requieran una rápida respuesta de ensamblaje.

2.3 Problema de investigación identificado

Las estructuras *tensegrity* pueden ser estructuras de gran escala, usadas mayormente como estructuras estáticas y referentes de estructuras arquitectónicas. Su principal característica es no utilizar ensambles permanentes y que las barras no tengan contacto unas con otras, lo que las hace estructuras imposibles de transportar ensamblada. Así, se hace necesario su total desmontaje para movilizar, generando altos costos en las trayectorias dado el tiempo que se necesita para el montaje y desmontaje, mano de obra o maquinaria y materiales que se desgastan con la fricción o pierden tensión. Esto dio apertura a preguntarse en cómo solucionarlo y reducir los costos por medio de la plegabilidad y al hacer una recopilación de datos se encontró un vacío de conocimiento, en la movilización, sin necesidad del desmontaje de la estructura. Esto abre la posibilidad de plantear una reducción de costos y tiempo por medio de la plegabilidad de las estructuras *tensegrity*.

2.4 Elementos del problema de investigación

Las estructuras *tensegrity* en domo con un alto nivel de complejidad en su composición, la dificultad de producción, el transporte de las estructuras *tensegrity* y la alta complejidad en los sistemas de plegado en estructuras *tensegrity* de torre, son los elementos referenciales en la problemática del proyecto y de su potencialidad.

2.5 Limitaciones de la investigación

La investigación determinará la forma más eficiente de plegar un icosaedro truncado, por medio del análisis de cada uno de sus componentes (barras, cableado). En las primeras figuras que se

realizan a la hora de ensamblar el domo simple, se analizará cada paso, esto permitirá encontrar los primeros desplazamientos que se dan dentro de la figura, además de un posible primer plegado. Una vez analizada la estructura, por medio de la experimentación a escala, dará la apertura a una posible empaquetación de la estructura.

3. Justificación

La oportunidad de estudiar la posibilidad de plegar un domo simple *tensegrity* con base en de un icosaedro truncado, con la intención de reducir su área superficial facilitando su transporte, debido a que las estructuras *tensegrity* tienen cualidades físicas como el de transmitir fuerzas de tracción y compresión, con la posibilidad de soportar cargas externas y de impacto con la utilización de la menor cantidad de material posible, haciéndolas unas estructuras completamente autoportante; sin embargo, las estructuras *tensegrity* de domo son ensambladas en un punto fijo ya que en algunos casos sus dimensiones formales impiden su transporte, por lo que si es necesario trasladarlas, estas deben ser desensambladas completamente para realizar su transporte. Por lo tanto, es viable estudiar las posibilidades del plegado en las estructuras *tensegrity* de domo simple para mejorar su portabilidad al momento de ser transportada y brindar una disminución de tiempo al momento de ser ensamblado, dando la posibilidad de implementar estas estructuras en reduciendo el tiempo de transporte, y situaciones que requieran una rápida respuesta de ensamblaje.

El propósito de realizar el estudio con un domo simple inscrito en un icosaedro es debido a que este tiene menos cantidad de puntos y barras con respecto a un domo de doble capa, reduciendo su complejidad al momento de la materialización y permite la realización de modificaciones de manera más práctica, para obtener una superficie estable, además su formalidad permite visualizar y percibir una morfología más cercana a la de un domo convencional.

La investigación pretende que sus compones y características, sean usadas para otros ámbitos a una escala y una producción más accesible que lo convencional. En el campo del diseño industrial se abriría la puerta a usos de espacios efímeros, domos en caso de catástrofes naturales, stands, empaques, mobiliario, etc.

4. Marco de referencia

4.1 Antecedentes

La palabra tensegridad fue utilizada por primera vez por *Buckminster Fuller*, con base a propuestas hechas por K. Snelson (Snelson, 1996) . Las estructuras *tensegrity* denominadas “*simplex*” (Figura 1) fueron establecidas por Emmerich (Emmerich et al., 1988) como resultado de tensar “barras” alternadas en un antiprisma (poliedro que tiene dos caras iguales paralelas las cuales se unen por medio de una triangulación con un número creciente de caras, con las cuales se han podido crear algunas de las composiciones estructurales más conocidas.

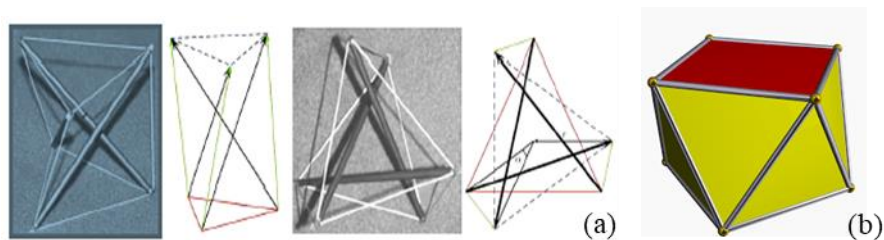


Figura 1 Estructuras tensegrity (a) “simplex” y (b) poliedro “antiprisma

la estructura más simple es la que genera un octaedro, el cual sus mástiles tienen un punto común central siempre y cuando el octaedro sea regular, ya que si no lo es pierde su punto común. Las configuraciones rómbicas son un patrón en forma de diamante, donde sus diagonales externas son cables y sus barras internas forman una cruz, con el fin de crear un equilibrio, un claro ejemplo de esta estructura poliédrica son las cometas de juguete (Figura 2).

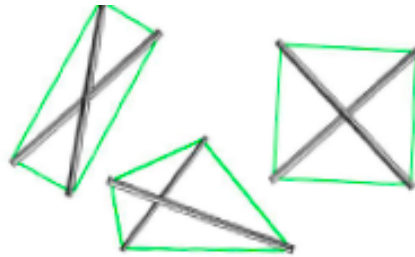


Figura 2 Configuraciones rómbicas.

Según *Buckminster Fuller* “sólo hay tres estructuras que son estables con articulaciones flexibles: el tetraedro , el octaedro y el icosaedro”, siendo el icosaedro un sólido platónico de veinte caras, que tiene el mayor volumen de superficie, es el más estable de los tres y tiene la mayor simétrica

de todos los poliedros, que al momento de truncarse se genera un patrón de 12 pentágonos y 20 hexágonos, con la cual Fuller propuso una esfera *tensegrity* a base de un icosaedro Truncado. (Figura 3)

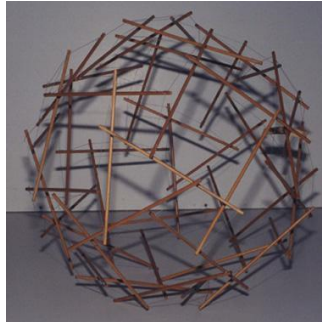


Figura 3 Estructura que hace parte de las esferas de *tensegrity* R Buckminster Fuller.

La primera estructura *tensegrity* figura 4 (a), fue un prototipo de Richard Buckminster Fuller, David Georges Emmerich y Kenneth D. Snell. desarrollaron el primer prototipo de prisma, al cual David Georges Emmerich realizo modificación permitiendo la primera estructura plegable al desincrustar un solo cable figura 4 (b). (Burkhardt, R.W 2008)

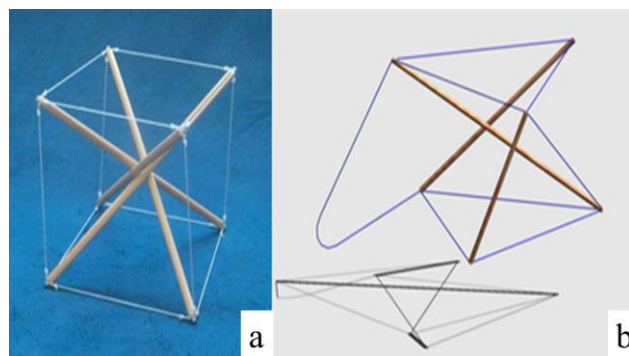


Figura 4 La primera estructura tensegrity (a) imitación de y (b) Prototipo de rhino por Patricia Blanco para mostrar el desarrollo de Emmerich

Las estructuras *tensegrity* se encuentran en equilibrio estable porque el sistema puede recuperar su posición original después de que alguna acción extrema lo haya alejado de ella; y por sí mismo porque dicho equilibrio es independiente de cualquier condición ajena del mismo, no depende de fuerzas externas, ni siquiera de la gravedad o de anclaje alguno, debido a su estado de pretensado inicial.

Principales características de las estructuras *tensegrity*:

Generalmente se trata de una barra o un cable, también puede hacer referencia a una membrana, o un volumen de aire y cada componente en su totalidad, ha de trabajar a tracción o compresión, no ambas a la vez o de forma mixta como podría ser considerada la flexión, destacan por su ligereza en comparación a otras estructuras de similar resistencia. debido a su auto equilibrio no requieren de ningún anclaje o para mantener su forma o geometría y eso lo hace un sistema estable en cualquier posición, cuanto mayor sea su pretensado del sistema *tensegrity*, mayor será su capacidad portante o resistente.

Aplicaciones:

Las estructuras *tensegrity* son mayormente usadas en la arquitectura, en tres tipos de aplicaciones Figura 5. Las cúpulas de barras y cables, (Figura 5 a)también denominadas cubiertas de cables radiales, destacan las edificaciones, puentes o refugios anti sismos. También se encuentran los arcos Figura 5(b)el objetivo de estas estructuras es estimar las acciones efectivas del viento en este tipo de estructuras y más concretamente en los arcos modulares con octaedros expandidos. También se estudia el empleo de arcos *tensegrity* que sirvan de soporte de membranas para coberturas de amplios espacios. y las estructuras *tensegrity* en torre como se observa en la (Figura 5 c). Configuradas como ensamblajes de prismas *tensegrity* elementales, que montados unos sobre otros son capaces de configurar torres de más de 30m de altura. Otras aplicaciones para torres *tensegrity* que podrían tener cabida son la construcción de pararrayos, torres de telecomunicaciones, parques eólicos y elementos estéticos entre otros.

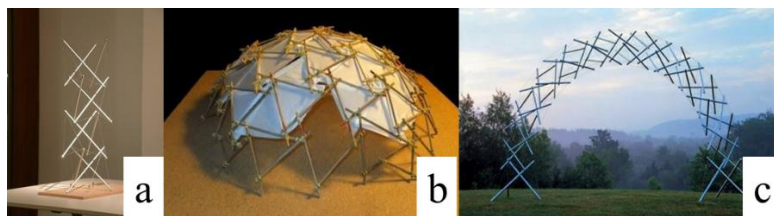


Figura 5 Aplicaciones de estructuras tensegrity (a)Cúpula *tensegrity* con recubrimiento de lona,(b) Arco *tensegrity* propuesto por Snelson Kenneth y (c) Arco tensegrity propuesto por Snelson Kenneth

Plegabilidad

Las estructuras móviles aplicadas como sistemas estructurales, construidas por matrices espaciales que tienden hacia el infinito dadas las tres posibilidades de agrupación (lineal, superficial y espacial). Permitiendo también, la variación de las proporciones y medidas de un

espacio interior. Es muy importante resaltar que, para el diseño de un buen sistema plegable, este tiene que ser, flexible, modulado (prefabricado) y de fácil transformación; teniendo estas tres características se podría obtener una buena adecuación geométrica (Morales, 2015). Las tipologías de estructuras que cumplen con estos requisitos y que tienen una bibliografía mínima y unas aplicaciones estudiadas, son:

Tipo paraguas: Estructuras que se pliegan sobre un mástil mediante el deslizamiento de un punto de apoyo sobre él. Son estructuras adecuadas para luces pequeñas, no mayores de 5 m, y tienen su utilidad como mobiliario urbano. (Figura 6)

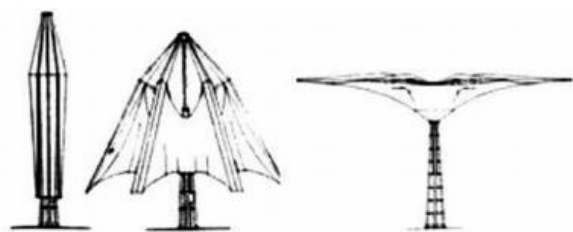


Figura 6. El mecanismo tipo paraguas es muy sencillo por lo que es uno de los sistemas más rápidos de manufacturar

Tipo mecanismo: con articulaciones bloqueables. donde las articulaciones en el interior de las barras, una vez que la estructura se ha abierto, se bloquean y la hacen rígida. Tienen el inconveniente de que el proceso de cierre es complicado y requiere soltar uno a uno todos los cierres, pero en cambio son estructuras muy rígidas y se usan frecuentemente en instalaciones aeroespaciales. (Figura 7)

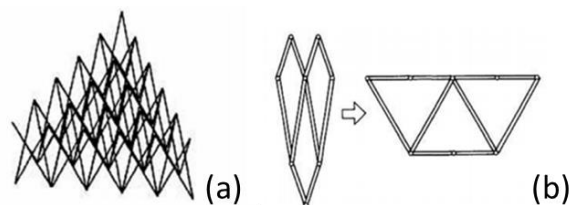


Figura 7 estructura en tijera (a) completa y (b) Demostración de una tijera

Tipo aspa: Se basan en las distintas posiciones que puede tomar un elemento como el de las estructuras están bien estudiadas en sus configuraciones elementales y son mecanismos que se obtienen combinando espacialmente piezas.(Figura 8)

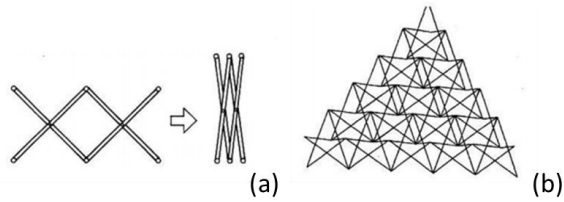


Figura 8 Plegar método aspa (a) fase inicial de la aspa y (b) estructura de triangulo en aspa.

El conjunto es móvil porque es inestable y puede plegarse y desplegarlo sometido únicamente a las leyes de la compatibilidad geométrica de las barras. Para que sirvan como estructura, estos conjuntos deben estabilizarse en alguna posición. Pero a diferencia de lo que ocurría en las estructuras de articulación bloqueable, basta con fijar dos nudos para que toda la estructura funcione.

Gunnar Tibert (Tibert, 2002) realizó un estudio en donde mencionaba la aplicación de las estructuras *tensegrity* plegables, donde definió dos métodos para la plegabilidad de estructuras *tensegrity*, el primer métodos-cinemáticos y estático el cual determina la configuración de cualquiera de la longitud máxima de los puntales o la longitud mínima de los cables, mientras que la longitud del otro tipo de elemento se mantiene constante. búsqueda de métodos estáticos para las configuraciones de equilibrio que permiten la existencia de un estado de tensión previa en la estructura con ciertas características requeridas.

De las primeras pruebas que se desarrollaron para permitir que una estructura *tensegrity* fuera plegable fue por medio de conformación de tres barras, Figura 9 con una triple división El mástil se pretensaba por medio de dos tiras de plástico ajustables, uno en el cable de base superior y el otro sobre el cable inferior, el inconveniente se presentaba al momento de ser plegados, debido a que la tira de plástico de tendía a deformar mediante se realizaban los pliegues.

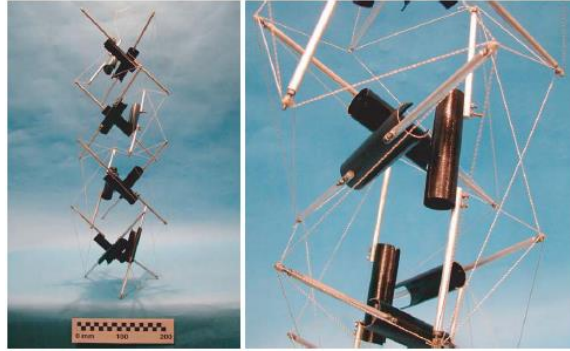


Figura 9 Estructura desplegada de cuatro etapas con puntales bi-estables

7.3 DOMOS

La primer cúpula *tensegrity* que se tiene registro fue planteada y construida por Fuller en 1953 Figura 10.(a) Es denominada "cúpula sola capa", buscando la manera de emplear las estructuras *tensegrity* cupulares en ámbitos arquitectónicos de gran escala, como cubrir parte de una ciudad entera; en este caso solo se trataba de un prototipo que no contaba con características acordes para pasar a un entorno funcional y por el tipo de material usado, su peso y sus costes se volvía una estructura poco eficiente para la construcción, Sólo tiene un caparazón de cables y todos estos cables se encuentran en el exterior de la cúpula. Un diseño mucho más fuerte es el tipo "doble capa" Figura 10(b), donde hay dos conchas de los cables: uno en el interior y otro en el exterior de la cúpula. Todos los puntales y otra serie de cables están entre estas dos conchas. Una cúpula de doble capa es más fuerte, principalmente debido a su diseño: la capa de cúpula es simplemente más gruesa que una cúpula única capa. (Burkhardt, 2007)

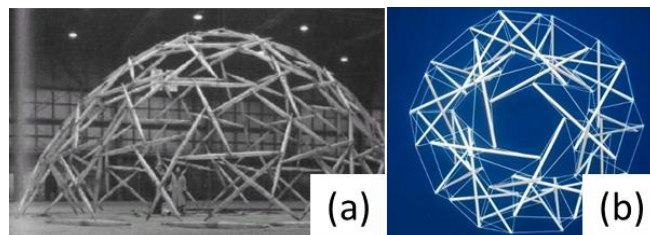


Figura 10 (a) Domo tensegrity diseñado por Richard B. Fuller. 1953 y (b) Estructura tensegrity de doble capa

Es necesario entender que las cúpulas o domos geodésicos se diseñan a partir de un poliedro denominado Icosaedro Figura 11 (poliedro de veinte caras o triángulos equiláteros), que está constituido por 20 triángulos equiláteros. Proyectando las aristas de estos triángulos planos a una superficie esférica originamos triángulos equiláteros curvados. Y así creamos un domo o cúpula

geodésica. A partir de aquí, dependiendo del tamaño y el uso, se efectúa una nueva subdivisión de estos triángulos equiláteros curvados en una nueva retícula de triángulos más pequeños, lo que origina la denominada frecuencia de la que estará compuesta el domo o cúpula geodésica. Cuanta más alta la frecuencia, más barras y nudos intervienen en su composición, y más esférico o curvado resultara. (Bandeo, 2012, p.3)

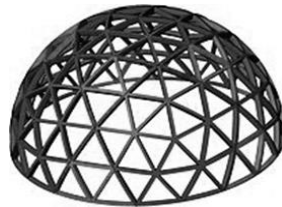


Figura 11 Domo Geodésico

Las cúpulas geodésicas se construyen a partir de los cinco poliedros regulares los cuales se ven en la imagen figura 15 estos son tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro. A partir de ellos, para generar una cúpula geodésica de orden se dividen las aristas de cada cara en partes iguales, como se ve en la Figura 12 y esto se realiza cuantas veces se quiera de ahí se define la complejidad de la “los vértices de cada una de esas caras hacia la esfera definida por los vértices iniciales del poliedro regular tomando siempre como punto de partida del rayo proyectante, el centro de esa esfera “(Alhambra Morón, All, 2008, pg 3)

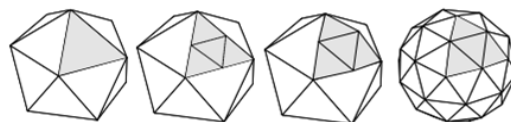


Figura 12 Subdivisiones en partes iguales y grados de complejidad

La frecuencia (frecuencia es una medida que se utiliza para indicar el número de subdivisiones que se realizan en el triángulo del icosaedro que forman la cúpula. (domosgeodesicos, 2013)) es importante, ya que esto determina la necesidad de usar muchas o pocos barras de soporte para el domo. En la Figura 13 se pueden ver 3 tipos (v) en el más grande el 4V se necesitan 250 barras para su construcción.



Figura 13 diferentes domos

En el siglo XIX Wilhelm Walther Bauersfeld, el desarrollo de la estructura de una cúpula, los primeros prototipos se pueden ver en la Figura 14 con el fin de proyectar imágenes en el planetario. Walther se basó en las fórmulas descritas por Platón. Dando origen al primer domo geodésico en el mundo.

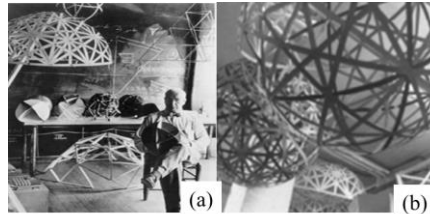


Figura 14 (a) Walther Bauersfeld en Berlin y (b) Walther Bauersfeld primeros prototipos

Posteriormente R. Buckminster Fuller un ingeniero, perfeccionó el domo geodésico en 1949. Su principal objetivo era el desarrollo de lo que él llama "Diseño de anticipación completa de la ciencia" Fuller, 1953, p.10) Figura 15



Figura 15 Primera cúpula desarrollada a gran escala

El domo *tensegrity* inventado por Fuller uno de los primeros ejemplos de domos que funcionan como una estructura *tensegrity*(Figura 16).

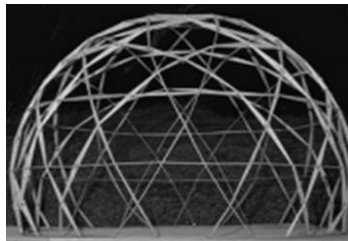


Figura 16 Domo tensegrity, Fuller 1982

4.2 Estado del arte

Una cúpula geodésica es parte de una esfera geodésica, un poliedro generado a partir de un icosaedro o un dodecaedro, aunque puede generarse de cualquiera de los sólidos platónicos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver el primer prototipo de una cúpula a gran escala con el fin de generar un “recubrimiento”. La construcción se basa en un fragmento generado desde la sección que pasa por el punto de origen, es decir el centro, ya que la esfera como figura estructural equilibrada es en cuanto los vectores que pasan por su centro con equivalentes en todas direcciones. En una cúpula geodésica al igual que en una esfera, las caras pueden ser triángulos, hexágonos o cualquier otro polígono, siempre que todos los vértices coincidan con la superficie de una esfera, si los vértices no quedan en la superficie, la cúpula ya no es geodésica.(figura 17)

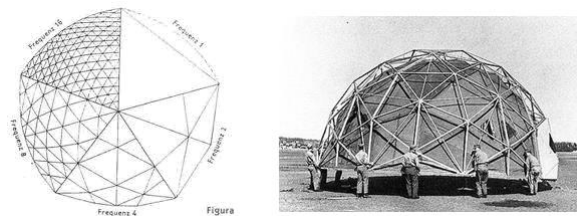


Figura 17 vectores de una cúpula geodésica y su fabricación.

Fueron patentadas en 1947 por el arquitecto americano Richard Buckminster Fuller. Su obra más famosa fue la esfera del pabellón USA en la Exposición Universal de Montreal de 1967. (Figura 18)

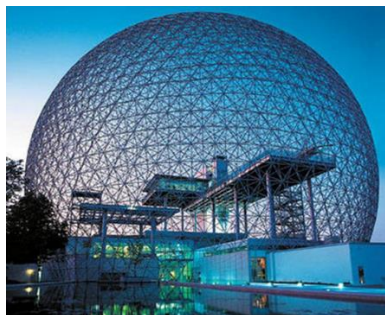


Figura 18 Exposición universal de Montreal

Trípode tensegrity Figura 19abarca seis tendones. Tres tendones, que se refiere aquí como tendones "vértice", se unen los tres puntales juntos en un extremo para formar un triángulo que representa el ápice de la trípode. El equilibrio entre esfuerzos de ambos tipos de elementos da forma y rigidez a la estructura. Esta clase de construcciones combina amplias posibilidades de

diseño junto a gran resistencia, así como ligereza y economía de materiales, además gracias a las argollas permiten ensamblarla más rápido, pero al ser un radio la estructura pierde su simetría por algunos milímetros. En la figura 23, a la derecha, se puede ver la estructura más simple y por lo tanto uno de los miembros más instructivos de la familia de la temeridad. Algunos historiadores del arte creen que fue expuesto por primera vez por el artista letón Karl Ioganson en Moscú en 1920-21.

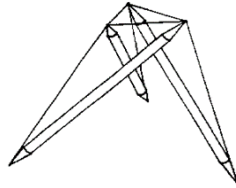


Figura 19 Trípode tensegrity

La Figura 20, Oct6vnet muestra una red de tensegridad basado en una subdivisión de un octaedro, un conjunto esférico de trípodes incrustados en la red de tensegridad. Este tipo de variación de la cúpula es construida en base al ahorro de económico de doble capa, donde una capa exterior y una capa interior de los tendones son inter-conectados por puntales y tendones adicionales. Los puntales y los tendones están organizados para hacer hincapié en la triangulación y la transmisión de cargas laterales exógenos dentro del marco del espacio.

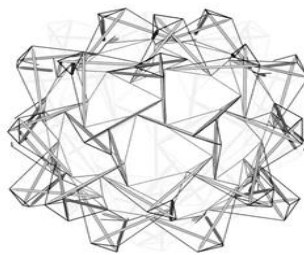


Figura 20 Oct6vnet

Estructuras de Kenneth Snelson es uno de las exponentes más importantes de las estructuras tensegrity, este diseñador- Arquitecto, ha generado diferentes estructuras *tensegrity* que permiten explorar todas las posibilidades formales que estas pueden generar. En este caso son estructuras generales. Sus estructuras eran en acero inoxidable o cepillado cromo latón estas las desarrolladas en un principio a escala como estructuras decorativas y después se implementaron a gran escala como la Figura 21 en ciudades como esculturas.



Figura 21 Estructura tensegrity diseñada por Kenneth Snelson

La Figura 22 más sencilla de este tipo es la que origina el Octaedro en que algunas barras que apuntalan vértices opuestos tienen un punto común central. Si el octaedro no es regular, este punto común desaparece. A partir del octaedro expandido se crea una figura de seis mástiles enormemente rígida. Como la casuística es tan amplia Pugh ha planteado una clasificación que ayuda bastante a comprender la generación.

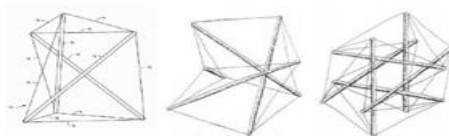


Figura 22 Octaedro de 6 mástiles

En 1974 Fuller patentó la denominada cúpula de aspersion en la que influyó la Figura 23; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Estas estructuras, que pueden no estar trianguladas, basan su rigidez en un estado de esfuerzos previos del conjunto y que, lógicamente, transmiten fuertes tracciones a los apoyos. La combinación espacial de estas tensiones puede crear mallas capaces de cubrir grandes luces. La combinación espacial de las tensiones planas da lugar a diferentes configuraciones de mallas.

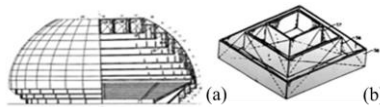


Figura 23(a) Primera cúpula y (b) pirámide de Fuller de aspersion.

La Figura 24 es un temprano ejemplo de los aviarios con recorrido interno, su paisajismo está integrado con el sistema de circulaciones del Zoo de manera que el público pueda tener acercamientos al sistema de hábitats de las aves El aviario mide cerca de 45 m. por 63 m. con una altura máxima de 24 m. Como muchos de otros aviarios, la malla está hecha de metal. Los paralelos de aluminio son tubulares y están en equilibrio con la ayuda de cables de acero.



Figura 24 Aviario en el Zoo de Londres 1960- 1963

Estructura de soporte de un “edificio” en el caso del White Rhino, construido en 2001 en Japón nos muestran el potencial de esta tipología estructural. Y sus usos son extensibles a arcos, torres, domos, mobiliario; la propuesta viVood Figura 25 desarrollada por un equipo de arquitectos e ingenieros españoles, se acerca a estos principios a través de una arquitectura plegable que permite el despliegue de la estructura sobre su propio sistema de soporte. A través de piezas prefabricadas y desmontables de madera, la casa mínima se puede ensamblar en pocas horas en el lugar José Tomás Franco. "Viviendo a pequeña escala: la arquitectura plegable del proyecto viVood" 01 abr 2014. ArchDaily Colombia. Accedido el 3 Mar 2017.



Figura 25 (a) Proyecto viVood – (b) casa plegable, transportable sobre sus bases

El arquitecto Emilio Pérez Piñero estudio las relaciones dentro de las estructuras espaciales de barras desmontables y plegables Figura 26, elabora la documentación que hace transmisible su investigación y generaliza su estudio en el comportamiento en la parcela de las desplegadas

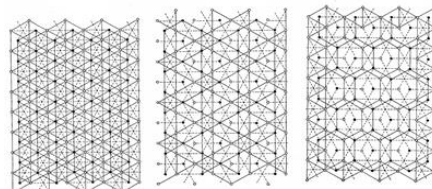


Figura 26 Desarrollos de estructuras plegables geométricas.

Gunnar Tibert: una antena plegable tensegrity. Ejemplo de una estructura tensegrity con plegabilidad similar a una sombrilla Figura 27



Figura 27 Sombrilla plegable tensegrity

Mapudungun Domo es un proyecto basado en el domo que se muestra en la Figura 28 con el fin de abrir espacios esféricos de proporciones armoniosas. Nacen de la búsqueda de la perfecta viviendas, cuenta con mejor aprovechamiento de luz natural, Reducción en el consumo de energía, cúpula abarca un gran espacio a partir de un área superficial pequeña, aislamiento acústico y es antisísmica



Figura 28 Mapudungun Domo

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Realizar el análisis geométrico y morfológico de un domo *tensegrity* simple, para el establecimiento de los parámetros constructivos y deconstructivos.

5.2 Objetivo específico

- Descomponer la estructura *tensegrity* de un icosaedro truncado, hasta su módulo geométrico base.
- Determinar los métodos que se pueden emplear en los ensambles de un icosaedro truncado *tensegrity*.
- Analizar por medio de una maqueta, la implementación de los ensambles de un icosaedro truncado *tensegrity*
- Definir los materiales empleados en la estructura que favorezcan la estabilidad del sistema y permita la intervención de los ensambles.

6. Metodología

Se realizó una estructura basada en un icosaedro truncado de 20 cm de diámetro, en la cual se resaltaron los hexágonos y pentágonos de un color diferente, con la finalidad de analizar sus patrones, permitiendo conocer el comportamiento al ser descompuesta y los puntos de unión entre estas, para así trasladar los conocimientos a la estructura *tensegrity*. ,(Figura 29)

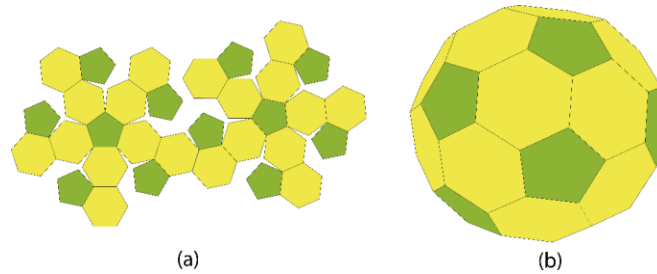


Figura 29(a) comportamiento estructura descompuesta y (b) los puntos de unión

luego, se realizó una maqueta de estudio de un icosaedro truncado *tensegrity*, usando 90 barras cilíndricas de bambú de 10 cm de longitud y 0,2 cm de diámetro, a los cuales se les realizó una incisión transversal de 5 mm en cada una de sus puntas (ver Figura 30), con el fin de introducir cauchos (cinta elástica), entre las mismas incisiones, generando dos líneas de tensión individuales para cada palillo.

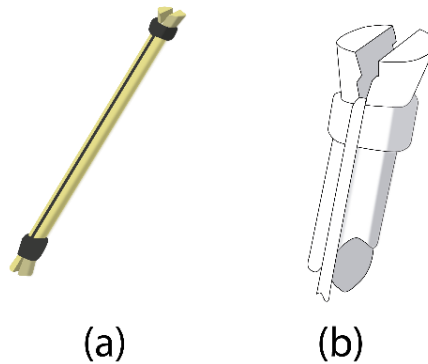


Figura 30(a) composición del palillo y (b) detalle del vértice en el palillo

Con el fin de continuar con un análisis y una descomposición más precisa de la estructura *tensegrity* se recurrió a realizar una segunda maqueta de estudio, la cual sería un 10% más grande que la primera maqueta de estudio y se usarían otros materiales para su construcción, esto, con el fin de garantizar una mejor tensión, una mayor estabilidad estructural y evitar el deterioro de la maqueta de estudio. Los materiales usados en la segunda maqueta de estudio se componían por 90

barras de madera de cedro de 15 cm de longitud y 1 cm de diámetro, a los cuales se les realizó una perforación longitudinal de 5mm de profundidad en cada una de sus puntas usando una broca de 5/32" (4mm) y un *mothortull*, para luego insertarles un tornillo autoperforante para madera de 5/32". Teniendo esto, se procedió a usar hilo de nylon 0.40 mm para realizar líneas de tensión en cada una de las barras mencionadas, iniciando con un nudo para anzuelo de pescar en un tornillo y finalizando de la misma manera en el tornillo contrario, dejando solo dos líneas de tensión longitudinales las cuales deben de estar en cuadrantes opuestos de la varilla, tal y como se esquematiza en la Figura 31.

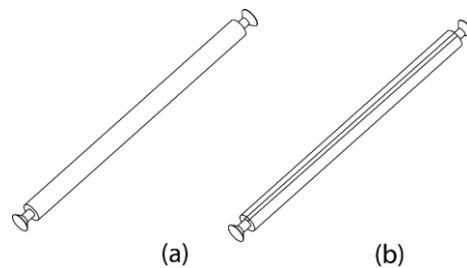


Figura 31(a) barras de cedro con tornillo y (b)

Luego, haciendo uso del tornillo que se encuentra en cada uno de las barras, se procedió a realizar un nudo con el tornillo de la barra y uno de los cables tensores de otra barra dejándolo a cuatro centímetros (4cm) alejado de la esquina de la barra; en este caso se inició la estructura procurando que un vértice quedara en la parte superior, esto para analizar su estabilidad, sigue siendo el mismo proceso, procurando que queden las mismas distancias entre vértices y tensores Figura 32

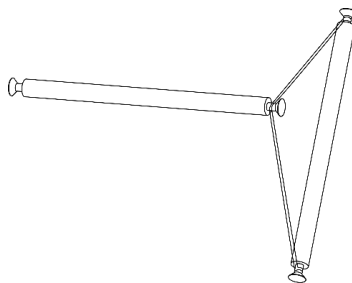


Figura 32 unión entre dos barras por medio de un nudo con el cable

Para comprender mejor como era el comportamiento de las estructuras que conformaban el domo tensegrity, se procedió a realizar una aproximación de modelo digital con el programa Rhinoceros 5.0 y el plugin Grasshopper 1.0, esto, generando un icosaedro truncado el cual hizo de base para

generar la parametrización, permitiendo que cada uno de los vértices que componen el icosaedro fueran procesados como barras, Figura 33

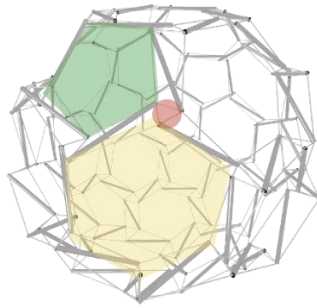


Figura 33 modelo digital domo tensegrity

Con el fin de comprobar si era posible plegar una estructura tensegrity en domo se comenzaron a realizar maquetas de estudio analizando diferentes métodos de plegado; el primer método que se planteó utilizar consistía en remplazar las barras por pistones que se estirarían al momento de inyectarles aire comprimido; el segundo método que se implementó para poder plegar la estructura tensegrity en domo era mediante tensores dentro de cada una de las barras, generando una conexión entre cada una de los tensores, esto, usando nylon de punto cuarenta milímetros (.40 mm) dentro de pitillos poliméricos de doce centímetros de longitud y cinco milímetros de diámetro (5mm Ø).

Teniendo el conocimiento de cómo se comportan los vértices en la estructura *tensegrity* de domo, se realizaron pruebas de materiales únicamente con los vértices, usando tres (3) barras de la última maqueta de estudio realizada, con la única diferencia que se cambiaron los tensores de nilón por tensores de caucho de nitrógeno, los cuales se dividieron en dos tipos; los que generarían la unión del vértice el cual se componía de un solo anillo de nitrilo de cinco centímetros de diámetro (5 cm Ø), al cual se le generarían por medio del embobinado con cobre y una matriz (fabricada con un cuadrado de pino de 5x5 y 3 tornillos de 2”), tres (3) puntos de anclaje para conectarlos a uno de los extremos de las barras; el segundo tipo de tensor, el cual generaría la unión y la tensegridad entre las barras se compuso de tres (3) cordones de nitrilo de doce centímetros de longitud (12 cm) y tres (3) de ocho centímetros de longitud (8 cm) al cual por medio de una matriz (fabricada con un rectángulo de pino de 15x5 cm y 2 tornillos de 2”) y un embobinado con alambre de cobre se les realizó un punto de anclaje a cada extremo.Figura 34

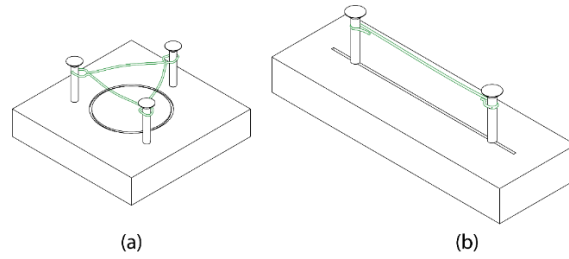


Figura 34 Maqueta para la matriz de los cables.

Finalmente; se fabricó la última maqueta de estudio utilizando vértices previamente fabricados, con lo cual se fabricaron cincuenta (50) tensores con los anillos de nitrilo, ciento cuarenta (120) tensores de doce centímetros (12 cm), y setenta barras de madera de roble de doce centímetros de longitud (12 cm), cada uno con un tornillo autoperforante para madera de media pulgada ($\frac{1}{2}$ "") en sus extremos; se prefabricaron doce (12) vértices con el fin de facilitar la construcción de la estructura tensegrity por medio de la construcción de patrones en base a pentágonos y hexágonos; por último se utilizó un alambre de cobre para cerrar la base del domo y permitir que cada una de las bases estuviera apoyada sobre suelo y mantener toda la tensegridad de la estructura.



Figura 35 Maqueta estructura tensegrity con las intervenciones

7. Resultados y discusión

7.1 Descomposición de la estructura.

En la Figura 36 se observa una estructura icosaédrica truncada realizada para identificar el patrón para esto se desarrolló una maqueta de dos colores: azul los pentágonos y amarillo los hexágonos,. Si se toma de centro el pentágono, alrededor van hexanos, pero si por el contrario se toma un hexágono de centro alrededor se intercala hexágono y pentágono.

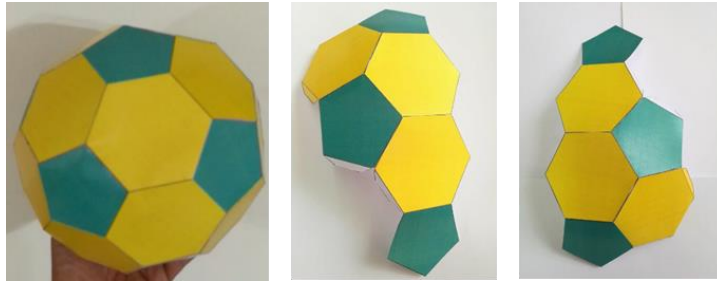


Figura 36 maqueta de un icosaedro truncado y su composición

Permitió entender toda la configuración y estructura, Figura 37base que conforma la geometría de la que parte una estructura tensegrity icosaédrica.

Análisis Icosaedrotruncado				
ISOMETRICO	DESPLIEGE	CARAS	VERTICE	ARISTA
32 caras Ángulo diedrico= 138°	12 pentágonos 20 hexagonos	hexagono y pentágono regular	60 vertices	90 aristas
centro pentagono = 5 hexagonos		centro hexagono = 3 pentágonos - 3 hexagonos		

Figura 37 Análisis de la geometría del icosaedro

Con los resultados obtenidos se inicia, es el primer acercamiento a la configuración de barras, cables y ensambles, necesarios para la conformación de esta. Para esto se tomó de referencia un video explicativo donde por medio de palillos de bambú de 10 cm de diámetro, a los cuales se les hace un corte longitudinal de 0.5 cm a cada lado del palillo, cauchos elásticos de 2.5 cm de diámetro y se inserta el caucho entre los cortes. De este modo construían figuras *tensegrity* lineales, pero como no era la estructura que se estudiaba, se tomó el tipo de materiales y los ensambles, pero empleados en la configuración en domo de una imagen referenciado en el marco de la investigación.(figura 38)

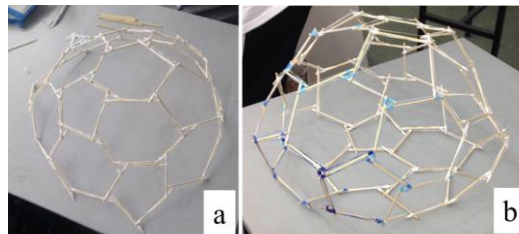


Figura 38 primera maqueta de la estructura *tensegrity* icosaédrica (a) domo de la maqueta y (b) esfera *tensegrity*

Al realizar la primera maqueta de la estructura *tensegrity* icosaédrica, encontró que la estructura perdía la tensión, debido a que la configuración de los cables se estiraba ya que el material era elástico y los palillos de bambú al recibir la tensión en los cortes de las puntas se partían. Por esto se planteó hacer una maqueta en donde se descartarán los cauchos y los palillos se cambiarán con un material resistente a la tensión.

Se realiza una maqueta de una estructura *tensegrity* icosaédrica, pero ya se aplica la Figura 39 configuración de un domo simple. Se realizó con varillas de cedro a 15 cm de longitud, para le meto de ensamble ya no re realizo una fisura, sino que se cambió a tornillería por donde paran los cables de nylon. Con respecto a la primera maqueta *tensegrity* fig. 2 la estructura en domo creció ende 45% y 50 %, lo que permitió que la configuración fuera más eficiente que el de la primera maqueta.



Figura 39 Domo simple tensegrity

Para el inicio de la búsqueda de plegar la estructura *tensegrity* en domo se realizó una Figura 40 maqueta en el plugin Grass Hopper, con el fin de analizar la posibilidad de que los cables usados en la estructura se pudieran remplazar por un solo cable de como que para tensionar la estructura se jalara el cable y para plegar la figura solo se necesitara la perdida de la tensión de un solo cable. Pero esta propuesta fue descartada ya que no se encontró un patrón en el cual el cable no pasara 2 o 3 veces con un mismo cilindro lo que enredaba el cable, lo que ocasionaba que la estructura perdiera la forma.

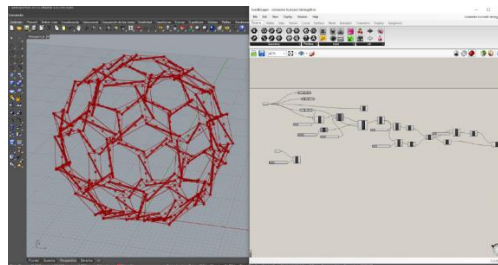


Figura 40 Maqueta software grasshopper

Se realizó una indagación de los métodos con los cuales se pudiera plegar la estructura de domo simple tensegrity, se hallaron diferentes tipos de plegado como tijera, paraguas, rueda de expansión, aeroMorph (comprensión de aire), telescopio, hidráulica, neumático y estructura de carpa, se realizaron maquetas de estudio aplicando los diferentes tipos de plegado, y el sistema más eficiente era el Figura 41 sistema del telescopio usando cilindros plásticos y nylon, se generó el sistema de telescopio es una sección de la estructura partiendo de los pentágonos y hexágonos

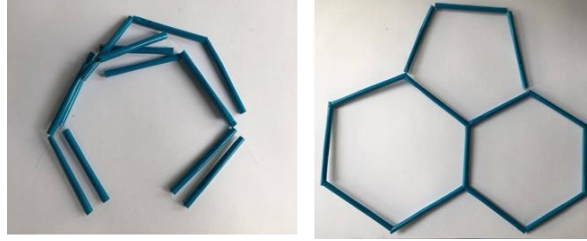


Figura 41 (A) sistema de telescopio en pentágonos y(B) hexágonos

Pero al iniciar a construir la estructura en domo los vértices no permitían que el sistema se implementara en toda la estructura por lo que no se realizaba el plegado correctamente. Con esto como un nuevo hallazgo inicia una nueva parte del proyecto donde ya no se centra en plegar los pentágonos y hexágonos, sino que se toma como centro de la estructura el Figura 42 vértice.



Figura 42 vértice de una estructura tensegrity

se desarrolla un método de ensamblaje y desensamblaje usando palos de roble de 8mm de diámetro y reemplazando el nylon por un polímero rígido al cual en el vértice se le realiza una argolla que se inserta en el tonillo. Esto se aplica en el Figura 43 vértice de la estructura tensegrity.



Figura 43 vértice con ensamblaje de polímero

Este método se aplica en la estructura icosaédrica tensegrity en domo como posible solución para reducir el tiempo como mínimo en un 30 por ciento en el montaje de estas estructuras.

Como una estructura tensegrity funciona con la tensión de cada una de sus partes se plantea el usar este tipo de ensamblaje semipermanente solo en algunos puntos de la estructura de modo que para su completa plegabilidad no sea necesario el descomponer cada parte.

8. Conclusiones

A partir de la investigación y los hallazgos encontrados por medio de las maquetas de estudio y la descomposición de la morfología de la estructura *tensegrity* inscrita dentro del icosaedro truncado es posible llegar a un módulo geométrico base formado a partir de los vértices de la estructura, tomando este como el patrón inicial para la elaboración del patrón del domo permitiendo trabajar en una pequeña escala inicial, para luego ser replicado en la estructura completa haciendo el uso de barras y cables generando una estructura auto portante y estable.

Es posible generar la tensión en la estructura a partir de una tensión unitaria y no a partir de tres cables independientes, lo que garantiza la distribución uniforme de fuerzas y estabilidad en cada una de las barras que lo componen.

Con la formalización de la estructura con sus módulos geométricos se evidenció que esta posee un patrón morfológico que facilita su análisis y su formalización a partir de plantillas para cada una de las partes lo que facilita su construcción y manipulación a la hora de fabricar y ensamblar, sin olvidar el factor tiempo, además permitió construir la estructura por medio de vértices y no por secciones geométricas, partiendo de la construcción de hexágonos y pentágonos.

Al momento de eliminar la tensión en la base inferior de la cúpula *tensegrity*, esta puede ser colapsada hasta estar completamente plana, lo que es la parte inicial para poder desarrollar un colapso controlado de la estructura, también gracias a las maquetas de estudio vemos que al momento de estructurar la cúpula es importante que en su parte superior se disponga la sección hexagonal y no un vértice, ya que si el hexágono está en el centro permite que los puntos de contacto de la base queden a la misma distancia y con una misma dirección, lo cual puede

influir al momento de su colapso, mientras, que si se encuentra un vértice en la parte superior, la estructura perderá equilibrio y soporte e su base.

La manipulación de la morfología de la estructura *tensegrity* a partir de los vértices genera una estructura auto portante, estable y a la vez fácil de desmontar ya que no se requiere decostruir por completo ,la cual da pie a próximos estudios en donde se pueda continuar con investigaciones futuras para analizar la forma de cubrir dicha estructura y generar coberturas y piezas de diseño que puedan ser utilizadas en diferentes condiciones de protección y resguardo, además de contar con factores positivos como transporte, ensamble y tiempo de producción. Dichos hallazgos contribuyen de manera positiva dentro de la investigación y el estudio de las estructuras *tensegrity* ampliando su campo de estudio al aplicarse en temas contemporáneos como lo son la arquitectura y la construcción de estructuras móviles y el diseño industrial desde la convergencia de las estructuras *tensegrity* y las estructuras domo.

9. Referencias

- Charalambides, je (2004). computer methods for tensegrity structures. university of texas at austin.
- k. Loganson´s (m. gugh. in the laboratory of constructivism: karl ioganson´s cold structures, 1998)
- Burkhardt, R.W(2008) una guía práctica de tensegridad diseño ee.uu
- Blanco B.B (2010) pretensado de columnas tensegrity para el incremento de rigidez axial. escola técnica superior d´arquitectura de barcelona.
- Davide Cadoni & Andrea Micheletti (2012). structural performances of single-layer tensegrity domes. department of civil engineering - university of rome torvergata(submitted on 4/11/2011, reception of revised paper 19/4/2012, accepted on 24/4/2012)
- Hanaor A. aspects of design of doublelayer tensegrity domes. national building research institute, technion - israel institute of tech, technion city, haifa 32000, israel(received 15.11.89. received revised 14.10.90)
- Charalambides J.E (2004). computer methods for tensegrity structures. university of texas at austin.
- Gómez, J.V (2007). tensegridad: estructuras tensegríticas en ciencia y arte. servicio de publicaciones de la universidad de cantabria.
- Pei Zhang, Jian Feng (2016) diseño de pretensado inicial y optimización de sistemas tensegrities basados en simetría y rigidez, 106-107(2017) , 68-69
- Torné, Lluís (2008). "tensegridad" [artículo en línea]. revista ipp. núm. 1. instituto de posturología y podoposturología. [fecha de consulta: 31/01/2017]. http://www.ub.edu/revistaipp/hemeroteca/2_2008/1_torne.pdf
- Hernandez, Raul (2012)“sistemas estructurales” [artículo en línea][fecha de consulta: 31/01/2017]<https://sistemasestructurales.wordpress.com/2012/03/30/tensegrity/>.
- Gomez, Valentin (2003) “tensegridad, estructuras de compresión flotante “[artículo en línea][fecha de consulta: 31/01/2017]

Blanco Blanch, P. (2010). pretensado de columnas tensegrity para el incremento de rigidez axial.

Burkhardt, R. (2007). a technology for designing tensegrity domes and spheres.

Cadoni, D., & Micheletti, A. (2012). structural performances of single-layer tensegrity domes. *international journal of space structures*, 27(2), 167–178. <https://doi.org/10.1260/0266-3511.27.2-3.167>

Emmerich, D. G., & Architecte, H. (1988). *structures tendues et autotendantes*. école d'architecture la villette.

Gough, M. (1998). in the laboratory of constructivism: karl ioganson's cold structures. *october*, 84, 91–117.

Liu, R. (2012). design and fabrication of tensegrity structures a computer based system.

Morales Guzmán, C. C. (2015). proceso de diseño de sistemas transformables, 14(1), 73–96. retrieved from <http://revistascientificas.cuc.edu.co/index.php/moduloarquitecturacuc/article/view/640/5>

Snelson, K. (1996). snelson on the tensegrity invention. *international journal of space structures*, 11(1–2), 43–48.

Tibert, G. (2002). *deployable tensegrity structures for space applications* (vol. 2002). citeseer.

vasquez, r.e. *sistemas tenségriticos*. medellín: escuela de ingenieras upb, 200

ESTUDIO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y DECONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRUCTURA TENSEGRITY

Angie Nathalia Canoa Gámez, Luis Daniel López Escobar, Andrés Rodríguez Patiño
Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia.

angie.canoa@upb.edu.co
luis.lopeze@upb.edu.co
andres.rodriiguezpa@upb.edu.co

Resumen

En esta investigación se estudia la posibilidad de hacer plegable una estructura icosaédrica de domo tensegrity basada en la esfera tensegry truncada propuesta por Richard B. Fuller. Para esto se realizó un estudio del comportamiento de las partes que componen la estructura. Analizando su composición, se evidenció que las tensiones se pueden construir de manera independiente permitiendo que al momento de que falle una tensión no se pierda la estabilidad de la estructura y se pueda reemplazar fácilmente la parte afectada. Además, por medio del cambio de material de los elementos tensores de las estructuras se pudo llegar a comprobar la posibilidad de plegar elementos con tensegridad, ya fuese la sección del vértice o el domo *tensegrity* en conjunto por medio del aumento o pérdida de tensión de un elemento unitario en la parte inferior de la estructura, logrando que todo el elemento pueda colapsarse sin la necesidad de su desensamble.

Abstract

In this research you can make a selection of the database structure based on the sphere proposed by Tensegry Truncated by Richard B. Fuller. For this, a study of the behavior of the parts that make up the structure was made. Analyzing its composition, it was evidenced that the stresses can be manufactured independently and that when a voltage fails, the speed of the structure has not been lost and the affected part can easily be replaced. In addition, by means of the material change of the elements of tension of the structures it was possible to reach the possibility of verifying elements with tensegrity, either the vertigo section or the tensegrity dome as a whole by means of the increase or loss of tension of a unitary element in the lower part of the structure, achieving that the whole element can collapse without the need of its disassembly.

Palabras Clave:

Tensegridad, plegado, domos, estructuras *tensegrity*.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras *tensegrity* son el resultado de tensar “barras” alternadas en un antiprisma poliedro que tiene dos caras iguales paralelas las cuales se unen por medio de una triangulación con un número creciente de caras, se destacan por su ligereza en comparación a otras estructuras de similar resistencia o, si se prefiere, tiene una gran capacidad portante si se compraran a otras estructuras. Además, no dependen de la gravedad debido a su auto equilibrio no requieren de ningún anclaje o para mantener la forma o geometría y eso lo hace un sistema estable en cualquier posición y cuan mayor sea el pre-tensado de sistema *tensegrity*, mayor será la capacidad portante.

Por otro lado, las estructuras plegables son estructuras construidas por matrices espaciales que tienden hacia el infinito dadas las tres posibilidades de agrupación (lineal, superficial y espacial). Permitiendo también, la variación de las proporciones y medidas de un espacio interior, para el diseño de un buen sistema plegable, este tiene que ser, flexible, modulado (prefabricado) y de fácil transformación

Por tal motivo El presente documento tiene como objetivo hacer evidencia del proceso de formalización y plegado de una estructura tensegrity basada en un icosaedro truncado, teniendo en cuenta que por sus características formales no se había analizado la posibilidad de que este tipo de estructuras se pudieran plegar; ya que como característica principal presenta gran complejidad al momento de su construcción, pero que a diferencia de otras estructuras, tienen la cualidad de ser autoportante, estable y resistente, con lo que se analizaron sus materiales y patrones geométricos para obtener una estructura que se pudiera plegar y que al momento de ser desmontada parcialmente no perdiera sus cualidades mencionadas anteriormente, permitiendo que este tipo de estructuras tenga aplicaciones para espacios comerciales y habitables.

METODOLOGÍA

Para abordar el proyecto de investigación se realizaron maquetas de estudio a través de las cuales se analizaron diferentes aspectos de las estructuras *tensegrity* como su morfología, partes y distribución para garantizar la construcción de un domo *tensegrity* y además de que durante el proceso se dieran a conocer las características y el comportamiento de la estructura para cumplir con los objetivos planteados al inicio del proyecto. Además, se tuvieron en cuenta una serie de materiales necesarios para las diferentes piezas de estudio los cuales fueron seleccionados dependiendo la complejidad de materialización de las maquetas.

Los materiales utilizados para la materialización fueron:

- Desarrollos volumétricos de cartulina plana de diferentes colores para entender la geometría de las diferentes partes de un icosaedro truncado el cual fue base para la creación de la estructura tensegrity ver (figura 1)

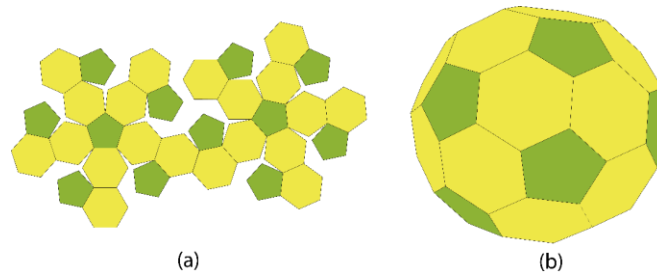


Figura 44. modelo de estudio (a) comportamiento estructura descompuesta y (b) los puntos de unión

- 90 Barras cilíndricas de bambú de 10 cm de longitud y 10mm de diámetro y cintas elásticas, ver (figura 2) .

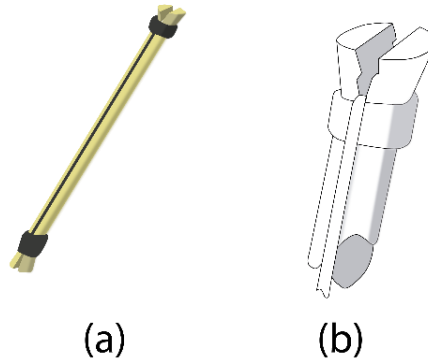


Figura 2 maqueta de estudio bambú (a) composición del palillo y (b) detalle del vértice en el palillo

- 90 varillas de madera de cedro de 15cm de longitud y 1 cm de diámetro, una broca de 5/32" (4mm) y un mothortull, 180 tornillos auto perforantes para madera de 5/32" y nylon de madera de 4mm, ver (figura 3).

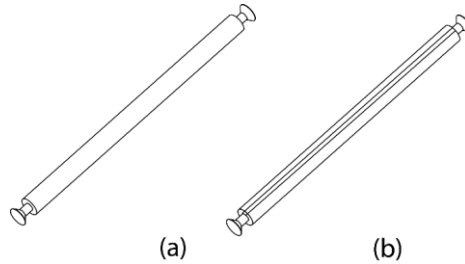


Figura 45. Representación esquemática para las maquetas de estudio en barras (a) barras de cedro con tornillo y (b) barra con nylon tensado.

Además, se hizo uso de recursos digitales que permitió hacer experimentación con modelos como lo son el programa Rhinoceros 5.0 y el plugin Grasshopper 1.0, ver (figura 4)

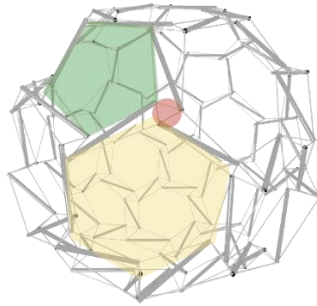


Figura 4. Modelo digital domo *tensegrity*.

Se hizo uso de materiales como 50 tensores con anillos de nitrilo, plantillas de formación, alambre de cobre, tornillos auto perforantes de madera y 70 barras de madera de roble ver(figuras 5 y 6)

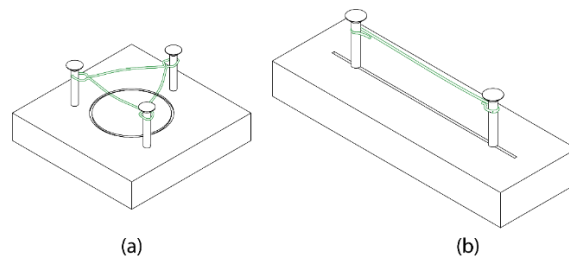


Figura 5. Maqueta para la matriz de los cables.



Figura 6. Maqueta estructura tensegrity con las intervenciones

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para comprender cómo funciona un icosaedro truncado *tensegrity*, se estudió inicialmente su geometría (figura 7), lo cual permitió entender toda su configuración y componentes. Como se evidencia en la (figura 8) los centros del icosaedro son hexágonos y pentágonos, los cuales se tomaron como el punto de partida para implementar los métodos de plegabilidad (figura 8), en la

implementación de estos métodos se hizo evidente que la tensión en la estructura se iba perdiendo en métodos de plegabilidad como el de sombrilla y telescopio, los cables se enredaban haciendo imposible la reconstrucción de la estructura *tensegrity*.

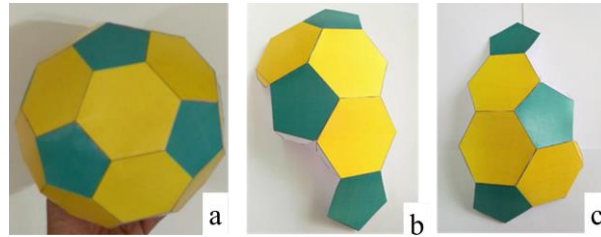


Figura 7. Maquete de la figura geométrica icosaedro *a* y *b* desarrollo de formalización *c*

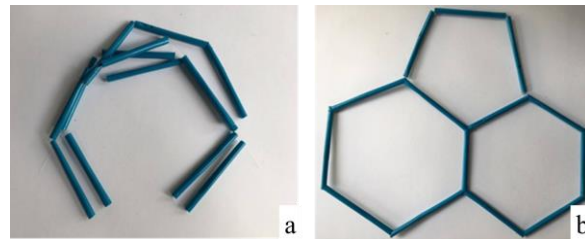


Figura 8 Métodos plegabilidad (a) Pentágonos y (b) hexágonos tensegrity truncado

A partir del icosaedro truncado se realizó un modelo completo de la una estructura *tensegrity* basada es un icosaedro truncado. (figura 9) con el fin de identificar que nuevos métodos se podían implementar para lograr la reducción de la estructura con el fin de un posible plegado.

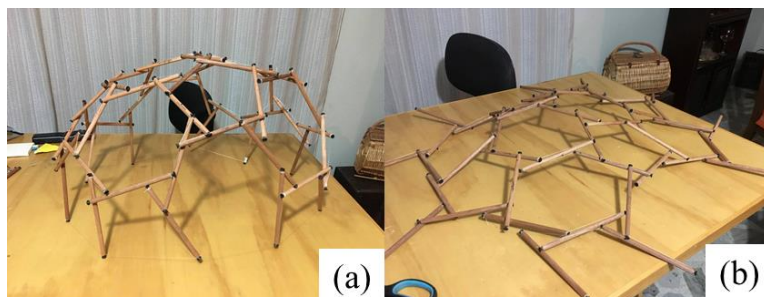


Figura 9 Estructura tensegrity (a) armada y (b) sin tensión

A partir de esta maqueta se evidenció que el punto en donde todas las tensiones se reunían o cruzaban eran los vértices, de esta manera si se pliegan los vértices es posible aplicar dicho método en la estructura, para esto se descompuso la estructura icosaedrica de domo tensegrity, hasta llegar a su vértice (figura 10), de donde parten los cables y la unión de las barras. Para la maquetación

de este se usaron cables nylon, barras de roble y para la unión se emplearon tornillos que sujetaran los cables.



Figura 10 vértice tensegrity

Sin embargo, el nylon no permitió el desmontaje de la estructura sin desarmarla con totalidad, por eso se empieza a buscar un tipo de material que remplace los cables y que soporte la tensión de la figura *tensegrity*. Por tal motivo, parte de la estructura se realizó empleando cables caucho de nitrilo, los cuales se modificaron para que la punta terminara en argolla la cual se insertó en los tornillos de las barras (figura 11 a). Para esto se realizó una unión con plaqueta doblada que cierra a presión. Se necesitan dos tipos de ensamble uno para las barras (figura 11 b,c) y otro para la unión de los vértices (figura 11 d,e). estos se prueban en el vértice (figura 11 a).

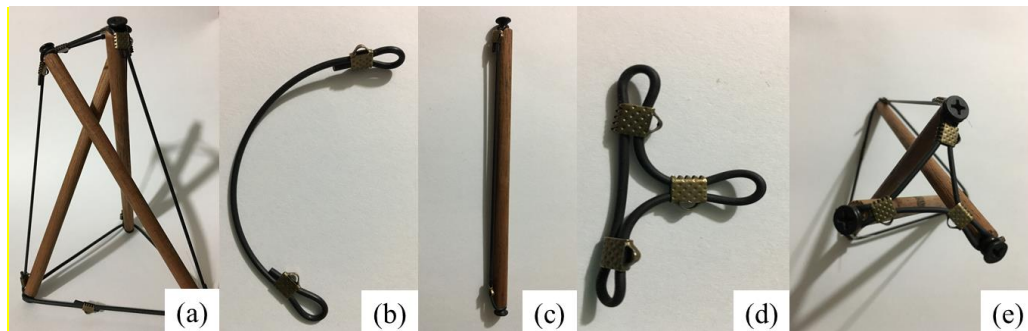


Figura 11 Ensamble de los vértices (a) vértice tensegrity, (b) ensamble con polímero, (c) barra con el ensamble, (d) ensamble vértice y (e) vértice con el ensamble.

Este método se aplicó en la estructura icosaédrica tensegrity en domo (figura 12), como posible solución para reducir el tiempo en el montaje de estas estructuras.



Figura 12 Estructura icosaedrica tensegrity con el método de plegado

Como una estructura tensegrity funciona con la tensión de cada una de sus partes se planteó usar este tipo de ensamble semipermanente solo en algunos puntos de la estructura de modo que para su completa plegabilidad no sea necesario el descomponer cada parte. La investigación permitió diseñar un ensamble que permite que la *estructura tensegrity* conserve sus propiedades por medio de la deconstrucción de los vértices, como se evidencia en lo anterior la estructura no necesita su total desmontaje

AGRADECIMIENTOS

Gracias al constante acompañamiento por parte de los docentes Alejandro Alberto Zuleta Gil y Diana Alejandra Urdinola Serna, quienes estuvieron en todo el proceso de investigación para guiarnos y aconsejarnos. Además, el consejo externo de algunos docentes de la Universidad Pontificia Bolivariana quienes nos dieron su opinión en las mesas de diálogo con el fin de compartir sus conocimientos en los procesos de investigación en el área de la experimentación morfológica.

CONCLUSIONES

Fue posible llegar a un módulo geométrico base formado por los vértices de la estructura y se tomó como patrón inicial para la elaboración del domo, permitiendo trabajar inicialmente una escala para luego ser replicado en la estructura completa por medio de barras y cables generando una estructura auto portante y estable

Es posible generar la tensión en la estructura a partir de una tensión unitaria y dividirla en tres cables independientes lo que garantiza la distribución uniforme de fuerzas y estabilidad en cada una de las barras que lo componen. También con la formalización de la estructura con sus módulos geométricos se evidenció que esta posee un patrón morfológico que facilita su análisis y formalización a partir de plantillas que facilitan su construcción y manipulación

Eliminando la tensión de la base inferior de la cúpula *tensegrity* puede ser colapsada hasta quedar completamente plana, siendo el primer paso para desarrollar un colapso controlado de esta , también es importante tener en cuenta que la estructura en su parte superior disponga de una sección hexagonal y no de un vértice , ya que esto permite que los puntos de contacto de la base queden con una misma dirección y distancia generando equilibrio al momento del colapso ya que con el vértice perdería equilibrio y soporte en la base .

La manipulación de la morfología de la estructura *tensegrity* a partir de los vértices genera una estructura auto portante, estable y fácil de desmontar en términos de construcción, lo cual da pie a próximos estudios donde se continúe con la investigación para analizar la forma de cubrir dicha estructura , generar coberturas y piezas de diseño aplicadas a la construcción y el resguardo, contando también con factores positivos como transporte, ensamble y tiempo de producción , esto contribuye de manera positiva dentro de la investigación y el estudio de las estructuras *tensegrity*, ampliando el campo estudio al aplicarse en temas contemporáneos de la arquitectura, construcción y diseño industrial

REFERENCIAS

- Charalambides, J.E (2004). computer methods for tensegrity structures. university of texas at austin.
- K. Loganson's (M. Gough. in the laboratory of constructivism: Karl Loganson's cold structures, 1998)
- Burkhardt, R.W(2008) una guía práctica de tensegridad diseño ee.uu
- Hanaor A. aspects of design of doublelayer tensegrity domes. national building research institute, technion - israel institute of tech, technion city, haifa 32000, israel(received 15.11.89. received revised 14.10.90)
- Charalambides J.E (2004). computer methods for tensegrity structures. university of texas at austin.
- Burkhardt, R. (2007). a technology for designing tensegrity domes and spheres.
- Cadoni, D., & Micheletti, A. (2012). structural performances of single-layer tensegrity domes. international journal of space structures, 27(2), 167–178. <https://doi.org/10.1260/0266-3511.27.2-3.167>
- Snelson, K. (1996). snelson on the tensegrity invention. international journal of space structures, 11(1–2), 43–48.
- Tibert, G. (2002). deployable tensegrity structures for space applications (vol. 2002). citeseer.
- Vasquez, R.E. sistemas tensegríticos. medellín: escuela de ingenieras upb, 200
- Emmerich, D. G., & Architecte, H. (1988). structures tendues et autotendantes. école d'architecture la villette.
- Gough, M. (1998). in the laboratory of constructivism: Karl Loganson's cold structures. october, 84, 91–117.