Geometría Dinámica.
Sistemas y objetos transformables.

Ever Patiño Mazo
Diseñador Industrial, Jefe de la línea de Investigación en Morfología Experimental, Universidad Pontificia Bolivariana.
Facultad de Diseño. Programa de Industrial,
Grupo de Estudios en Diseño, Colombia, everpm@upb.edu.co.

INTRODUCCIÓN

El entorno lúdico en países como el nuestro es un sector poco explorado y desarrollado, ya que factores como la alta inversión monetaria y el alto desarrollo conceptual, necesarios para lograrlo, han llevado a las empresas simplemente a copiar o a comprar moldes o diseños ya existentes.

Un objeto lúdico puede ser aquel que le permita al usuario, ya sea niño, adulto o anciano, cierta dosis de diversión (necesidad tan fundamental, y que al pasar del tiempo se convierte para muchos en añorada), o que posibilite cambios necesarios para la ruptura de la monotonía; los sistemas transformables geométricos que se estudiaron en el proyecto, los cuales posibilitan por ellos mismos esa mutación, ese cambio y ese divertimento, se eligieron para trabajar en esta tipología específica de objetos por poseer intrínsecamente ese tipo de propiedades.

La geometría que permite el movimiento, y que llamaremos dinámica, sirvió como punto de partida para explorar esa gama de posibilidades en el desarrollo de objetos que requieren el cambio físico, objetos que permiten ser descubiertos a medida que se transforman y mutan. Todos ellos logran su morfología a partir de la repetición de módulos sencillos, factibles de producir, que se vinculan a morfologías mucho más complejas, ricas en movimiento y diversidad, comprobando el principio sinergético de Buckminster Fuller: "el todo es mayor que la suma de las partes".

Son muchos los requerimientos que un objeto, mueble o accesorio deben cumplir necesidades que varían de acuerdo a la tipología y en el entorno en la cual están inscritos. Pero ahora, además de tener en cuenta ese tipo de premisa, el diseño toma en cuenta la lúdica, la transformabilidad y el cambio como puntos de partida para la proyectación, y ellos son en sí mismos más que suficientes para su justificación.

ANTECEDENTES

Los sistemas desplegables han despertado la curiosidad del hombre desde hace varios siglos, se conocen varios estudios del célebre Leonardo da Vinci sobre cálculos de estructuras de paraguas, tijeras y máquinas voladoras. Desde entonces las estructuras desplegables se aplican continuamente en distintos campos, desde el diseño de productos, espacios, hasta la industria aeroespacial. Los objetivos de su desarrollo han sido básicamente los mismos, reducir el volumen general de la estructura en su estado más amplio y útil, para poderlo transportar fácilmente y operarlo de una manera más rápida y sencilla. Ahora, además de valorar la plegabilidad de una estructura, han surgido aplicaciones dinámicas en las que la transformabilidad y el continuo movimiento hacen parte de su prioridad funcional.

Pasaron muchos años para que se volvieran a retomar estos estudios; en los años 60 Buckminster Fuller, al que se le conoce por ser la persona que popularizó las cúpulas geodésicas, logró innovar tanto en el desarrollo estructural como en la investigación y aplicación de estructuras dinámicas, en su mayoría a la arquitectura. Vale recalcar que aunque la humanidad siempre ha utilizado mecanismos para satisfacer o facilitar ciertas necesidades, sólo fue hasta Fuller que esos mecanismos se empezaron a tomar como sistemas, ya no sólo era necesaria la transmisión de movimiento, sino que el mecanismo podría ser óptimo. Fuller utilizaba los mínimos recursos para realizar la actividad, recursos como la relación de masa y energía estaban siendo utilizados eficientemente, poco material, poca mano de obra, poco tiempo de ensamble, y de transporte, la estructura cumplía con todos los parámetros de seguridad, y además de todo esto, sus creaciones resultaban particularmente bellas.

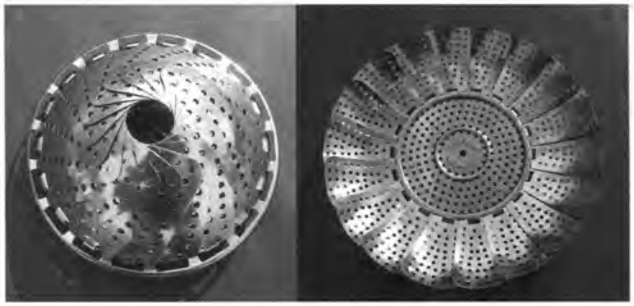
Luego de Fuller varios arquitectos e ingenieros se han dado a la tarea de innovar en sus proyectos utilizando las estructuras dinámicas, cabe mencionar a Santiago Calatrava que además de utilizar comúnmente referentes biomorfos en la apariencia de su edificación, proyecta la función a partir de ese mismo estudio; no solo se queda con una aproximación estética, él aborda el concepto desde múltiples perspectivas, funcionales, productivas y estructurales, siempre haciendo uso de la construcción natural. Otro gran diseñador contemporáneo de este tipo de estructuras es el ingeniero Chuck Hoberman, quien fundó en los 90 una empresa que lleva su nombre, comenzó utilizando los conceptos de plegabilidad en juguetes, y ahora ha crecido de tal modo su proyección tipológica, que está desarrollando objetos de mobiliario, arquitectura, exhibición y productos médicos.

ESTRUCTURAS DINÁMICAS

Los tres personajes antes mencionados, como muchos otros más se basan en las estructuras dinámicas para generar nuevas ideas que rompen con lo cotidiano. Desde este primer acercamiento las estructuras dinámicas se podrían definir como sistemas colapsables o transformables, que cambian su forma a partir de la modulación de barras y articulaciones sencillas, que deben su forma y composición a conceptos y estructuras geométricas, y cuyo funcionamiento no se puede predecir sin tener en cuenta todo el sistema; Fuller denominó esto Sinergética y es un concepto que nos dice que todas las partes de un sistema cualquiera son igual de importantes, no existiendo por tanto un elemento accionador principal, cualquier cambio efectuado en una de las partes modificará el conjunto. Dentro de este esquema general, la geometría dinámica sería la base o fundamento de las estructuras dinámicas, ya que ella cumple a cabalidad con las principales características de este tipo de estructuras.

Desde esta definición las estructuras dinámicas son mecanismos, pero no todos los mecanismos son estructuras dinámicas, ya que no cumplen con todas las características. Por ejemplo un mecanismo muchas veces tiene varias entradas de movimiento, las estructuras dinámicas para que puedan tener un funcionamiento sinergético tienen en su mayoría sólo una entrada de movimiento, esto quiere decir que al accionar sólo una de las piezas, todo el sistema se modificará.

Fig. 1. Esquema Estructuras Dinámicas



Las estructuras colapsables son aquellas que funcionan al estar completamente abiertas o cerradas, por tanto existen en ellas un condicionamiento de apertura y cierre muy limitante. Pueden ser totalmente desarmables, o sea que todas sus partes están unidas por diversos medios que se pueden retirar en el cierre, estas en particular no poseen un funcionamiento sinergético; o plegables, que se da en la medida que en se conserva todo el sistema, tanto estando abierto como cerrado, gracias a articulaciones mecánicas o a diversos soportes estructurales, como sistemas hinchables. En los dos casos la función particular existe en el momento en que se encuentran estáticas, en el momento de estar cerradas funcionan para guardarse, y en el momento de estar abiertas en la mayoría de las veces cumplen con una función primaria, que antecede al pliegue, que es la de soportar cargas.

Por otro lado las estructuras transformables dependen de un cambio morfológico continuo, no están condicionadas a la apertura y el cierre.

Su función principal está en la estética que produce la mutación. Por esta cualidad este tipo de estructura comúnmente es utilizada en el entorno lúdico, si analizamos los productos de Hoberman, la mayoría de sus juguetes no dependen de la apertura y el cierre, son interesantes en la medida en que el cambio ocasionado represente interés para el usuario.

Si observamos el esquema de las estructuras dinámicas de la figura 1, podemos ver que dentro de los principios mencionados, ambos tipos de estructuras están fundamentadas en la geometría y en la sinergética. Cabe señalar que se puede proyectar un mecanismo sin tener muy en cuenta estos principios, pero la utilización de estos elementos responderá en mayor o en menor medida en la optimización y/o innovación morfológica.

Fig. 2. Objeto Colapsable desplegable.
Diafragma para la cocción de alimentos. Diseño Metaltex S.A.
Fig. 3. Esfera transformable. Diseño Hoberman.

MARCO TEÓRICO

Si los sistemas dinámicos dependen en gran medida de la composición y estructura geométrica, fue pertinente en primera instancia estudiar los patrones básicos que fundamentan tal conocimiento. Enunciaremos en el momento sólo una pequeña parte de la geometría espacial, la base teórica que sirvió para construir el actual proyecto.

Uno de los enunciados de Fuller es "Space has Shape", el espacio tiene forma, el espacio por ningún motivo representa la nada, es en cambio una estructura espacial con propiedades físicas que influencian y permiten que la forma exista. Esta estructura espacial se asemeja a un sistema geométrico donde todo está dispuesto, ordenado, aunque la forma del diseño existe corporalmente, está determinada por el mundo inmaterial de formas puras y geométricas. Al ser la geometría "el estudio del orden espacial mediante la medición de las relaciones entre las formas" (Lawlor, Robert, 1996.Pág. 6), su práctica ayudará a develar la estructura inherente de las superficies, los cuerpos y el espacio.

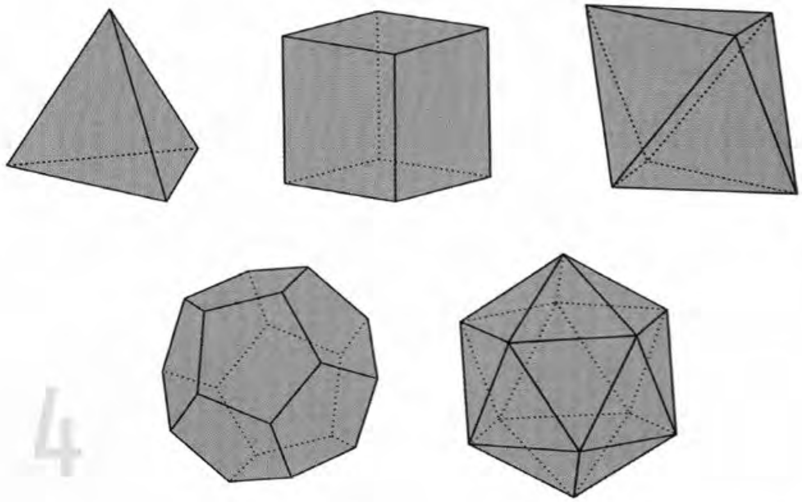


Fig. 4. Poliedros Platónicos

POLIEDROS PLATÓNICOS

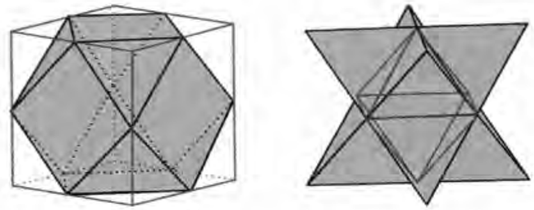
Poliedro viene de las palabras, "poli" que significa muchos, y "edro" que significa cara plana, y se puede describir como un volumen que está limitado por polígonos que se interceptan en aristas o vértices. Se pueden clasificar en cóncavos y convexos, regulares e irregulares. Los poliedros convexos son aquellos que tienen todos los vértices en dirección opuesta al centro. Y los cóncavos son los que tienen vértices alejándose y otros acercándose, ocasionando planos en configuración cóncava. Hay poliedros convexos regulares e irregulares, los regulares son aquellos que tienen todas sus caras polígonos regulares iguales, y por consiguiente ángulos iguales.

Todos los poliedros, ya sean regulares o irregulares, convexos o cóncavos poseen tres componentes principales que constituyen el sólido geométrico: caras, aristas y vértices. Las caras son las superficies que lo limitan, las aristas son los segmentos que son frontera entre dos caras, y los vértices son los puntos donde convergen tres o más aristas.

Mientras que en el espacio bidimensional existen infinitos polígonos regulares convexos, en el espacio tridimensional hay un número finito de poliedros regulares convexos. Mucho se ha hablado al respecto, y se ha llegado a la conclusión que son solo cinco los sólidos que cumplen esas características, reciben el nombre de Platónicos, ya que se presume que fue Platón el que los describió por primera vez en Timeo, el diálogo en el cual presenta una cosmología a partir de la geometría. Son el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro, y representan tridimensionalmente al triángulo, el cuadrado, y el pentágono, reciben sus nombre de dos raíces griegas, la primera hace referencia al número de caras, por ejemplo "tetra" que significa 4, y la segunda, "hedrón" que como vimos anteriormente es cara. **Es imposible construir volúmenes regulares que utilicen solo hexágonos, heptágonos, octágonos o cualquier otro polígono regular o irregular, es imposible ya que la suma de sus ángulos empieza a ser más de 360°, imposibilitando la tridimensionalidad.**

PLATÓNICOS

5



TRANSFORMACIONES GEOMÉTRICAS

Inmerso en la producción geométrica es de igual importancia conocer cuáles son los procesos que intervienen en la generación y mutación de la forma, tomando en cuenta, claro, que hablamos en este caso de formas poliédricas hasta ahora regulares. El objetivo de éstas transformaciones no es más que el de generar otro nuevo sólido o estructura que parte de un módulo inicial, en otras palabras, al ser los poliedros platónicos un referente de regularidad y orden, y de mínimas conformaciones, pueden ser utilizados como módulos para ser transformados. De allí parte en gran medida, otra serie de cuerpos y estructuras seudo regulares con propiedades formales y estructurales importantes para la materialización.

La truncación es una de esas herramientas de variación geométrica, consiste en cortar los vértices de un poliedro, como resultado aparecen nuevas caras, las cuales son polígonos generados por la conexión de las aristas cortadas. Dependiendo desde donde se parta para el corte, se genera el nuevo sólido. La truncación máxima de un poliedro es generada cuando los cortes de diferentes vértices se tocan.

La estelación es un proceso contrario, y consiste en proyectar las caras del poliedro generando un nuevo vértice. Las caras del poliedro son reemplazadas por pirámides cuyos lados son iguales al número de aristas de la cara. Las diferentes formas de estelar dependen de hasta dónde se proyectan las caras.

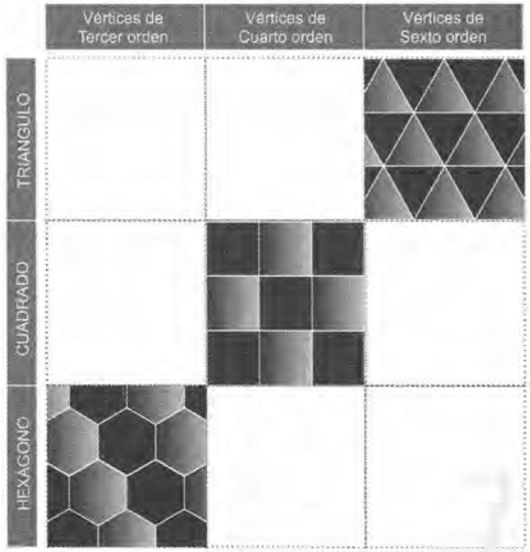
Otra herramienta de variación es la dualidad. Ésta es la capacidad que tiene un poliedro de generar otro a partir de la conexión de líneas perpendiculares a la mitad de sus caras, desde esta premisa todo poliedro tiene un dual. El tetraedro es dual de sí mismo, el octaedro es dual del cubo y viceversa, el icosaedro es dual del dodecaedro y viceversa. Cuando se realiza la truncación máxima de dos poliedros duales el resultado siempre es el mismo sólido.

En el caso del octaedro y el cubo, el resultado es el cuboctaedro, y en el caso del dodecaedro y el icosaedro, el resultado es el icosidodecaedro. (Ver fig. 6)

Teniendo en cuenta estas tres herramientas se construyen otras categorías de poliedros, los sólidos arquimédicos, los catalanes y los poliedros Kepler-Poinsot. Las posibilidades de formalización siguen siendo limitadas, por ejemplo, los 13 sólidos arquimédicos tienen vértices de tercer, cuarto o quinto orden, nunca de sexto (el orden significa el número de aristas que están confluyendo en el vértice); si existen triángulos o hexágonos, se hallan siempre en múltiplos de cuatro; ninguno de ellos posee caras con siete, nueve, once o un número mayor de aristas. Esto conlleva a concluir que la geometría aunque es la base del ordenamiento espacial, presenta gracias a su regularidad y precisión requerimientos constructivos limitantes, pero que de igual forma estas limitaciones dotan a los cuerpos de propiedades geométricas y estructurales importantes a la hora de ser utilizados.

6

Fig. 5 Truncación máxima del cubo y estelación del octaedro
Fig. 6 Estelación máxima del dodecaedro y el icosaedro



CRECIMIENTO BIDIMENSIONAL

Análogo a la cantidad limitada de poliedros regulares y semirregulares es el número limitado de redes bidimensionales regulares y semirregulares que pueden construirse en el espacio bidimensional. A diferencia de los tipos de vértices que utiliza el triángulo para salir al espacio, si unimos 6 triángulos alrededor de un mismo vértice, o sea en un vértice de sexto orden, tenemos los 360° completos, la agrupación se queda en el plano, y si continuamos pegando triángulos, o repitiéndolos a partir de una simetría de especular, manteniendo 6 alrededor de cada vértice, se puede extender en el infinito mundo bidimensional. Según Peter Stevens sólo se pueden construir otras dos redes con estas características de uniformidad, utilizando elementos regulares e idénticos que pueden crecer indefinidamente. (Ver Figura 7).

Con iguales limitantes, encontramos sólo ocho redes semirregulares conformadas a partir de polígonos regulares de más de un tipo manteniendo las características de sus uniones, los tipos de vértices se mantienen a lo largo de la construcción. Todas estas redes utilizan triángulos o cuadrados, o ambos, y únicamente agrupados a partir de vértices de tercer, cuarto o quinto orden.

La ausencia de pentágonos regulares en estos grupos de mosaicos regulares y semirregulares es evidente. Los pentágonos no se unen entre sí o con otros polígonos regulares para ocupar el espacio bidimensional, de la misma forma que los poliedros que tiene caras pentagonales no pueden agruparse con otros para llenar el espacio de manera continua. Las propiedades del pentágono le permiten con mayor facilidad encerrar el espacio, es por tanto que dos de los poliedros platónicos, el icosaedro y el dodecaedro, deben su constitución a éste.

"Así, observamos que los cristales, que son conjuntos de moléculas cuya estructura se repite, nunca presentan caras de cinco lados. De hecho, ninguna forma inanimada muestra simetría pentagonal, y, por ejemplo, jamás ha caído del cielo ningún copo de nieve en el que la estructura de sus cristales de hielo tuviera dicha disposición. Sólo las formas animadas, complejas y cuyas estructuras constituyen algo más que un simple apilamiento de moléculas idénticas, ofrecen morfologías pentámeras." (Stevens, Peter S., 1987. Pág. 15)

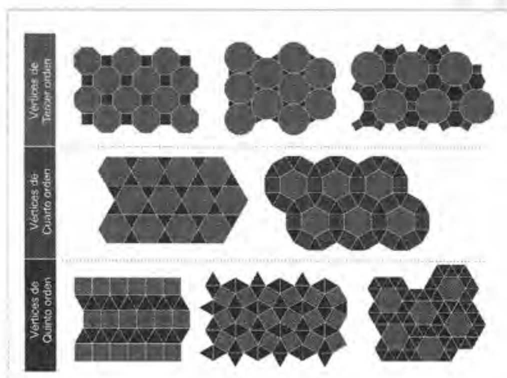


Fig. 7. Redes regulares
Fig.8. Redes Semirregulares

MÉTODO

Son pocas las investigaciones que han abordado este tipo de sistemas transformables, por ende se comenzó el proyecto desde una perspectiva exploratoria, centrando el estudio en esclarecer conceptos y principios poco profundizados. Varios centros de investigación han desarrollado este tema sobre todo en lo referente a innovaciones de alta ingeniería, como el Kinetic Design Group (Massachusetts Institute of Technology), que trabaja conjuntamente con la NASA, o el Deployable Structures Laboratory (University of Cambridge) que también desarrolla productos para la industria aeroespacial; pero en lo referente al objeto manipulable de desarrollo técnico mucho menor al que se necesita para abrir un satélite, son pocos los estudios que se han comenzado. Traducir en términos menos técnicos todo ese conocimiento podría significar la formulación de un proyecto de investigación de gran envergadura. No siendo el objetivo de esta investigación meramente emular estos desarrollos, constituyó el centro del proyecto explorar en primera instancia el territorio poco conocido de la morfología estructural y dinámica.

Luego de conocer el estado del arte de las estructuras dinámicas, se procedió a estudiar la geometría espacial, y por ende la geometría plana para dirigir la investigación desde esta área del conocimiento, ya que es un elemento regulador de la estructura de las superficies, los cuerpos y el espacio. Se analizaron las propiedades que le son inherentes a la geometría y que permiten su estabilidad, y por tal motivo, en ausencia de ellas, su inestabilidad. Sabiendo cómo se diseña un cuerpo estático, se puede diseñar un cuerpo inestable, la inestabilidad en este caso se estudió como principio de movimiento.

Desde unas variables cualitativas se le hicieron pruebas de estabilidad a los principales cuerpos geométricos, para constatar cuáles eran los principios que regían la estructura e inestabilidad de su composición morfológica. De los resultados de estas pruebas se elaboraron modelos físicos que comprobaron los principios encontrados. Se pasó luego a una etapa de proyectación en la cual se tomaron como base los modelos transformables generados, para diseñar objetos transformables, que utilizaran dichos principios.

PRUEBAS DE ESTABILIDAD E INESTABILIDAD

Luego de conocer los principios que dan origen a los sistemas y formas tridimensionales (geometría espacial), se prosiguió la investigación, haciendo pruebas que demostraran la estabilidad de los cuerpos geométricos. En primer lugar se hicieron modelos de los poliedros platónicos con aristas rígidas pero vértices flexibles, esto ayudaría a seleccionar desde esta premisa cuales eran los sólidos más estables, aun teniendo articulaciones.

El primero en ser construido fue el tetraedro, luego fue sometido a cargas de compresión, de tracción y de torsión, como era de esperarse su respuesta ante tales cargas fue de total equilibrio. Teóricamente se puede comprobar este resultado utilizando la fórmula que Artur Loeb desarrolló para predecir el funcionamiento de un sistema poliédrico. El número de aristas debe ser igual a tres veces el número de vértices menos 6. En el tetraedro esta fórmula es cierta; este cuerpo tiene 4 vértices, que multiplicados por 3 da 12, y si a 12 se le resta 6, el resultado es 6, número igual al número de aristas que posee.

Este resultado, no es nada nuevo, ya que se sabe que una manera de estructurar un sistema es triangulándolo; el ejemplo más sencillo es una cercha convencional, la cual debe su equilibrio a la distribución de esfuerzos que logra el sistema triangulado. Desde esta perspectiva la mínima conformación espacial que se puede construir con triángulos es el tetraedro. Fuller decía que el tetraedro utiliza los mínimos elementos para lograr la estabilidad, y llamó a este funcionamiento patrón de integridad, o sea el comportamiento de los sistemas en busca de la estabilidad. En la práctica, Fuller explicaba este concepto de la siguiente manera: si se le hace un nudo a un cordón cualquiera, o sea dándole una vuelta de 360°, este tiende a soltarse, pero si se repite la operación, o sea adicionando otros 360°, para completar 720° en un nudo ciego, el nudo logra conquistar su patrón de integridad. Lo mismo pasa con el tetraedro, el cual tiene en cada vértice 180°, ya que confluyen tres triángulos equiláteros en cada uno de éstos, y como es sabido los ángulos internos del triángulo equilátero miden 60°. Si multiplicamos estos 180° por 4 que es el número de vértices que posee, el resultado son los mismos 720° del nudo ciego.

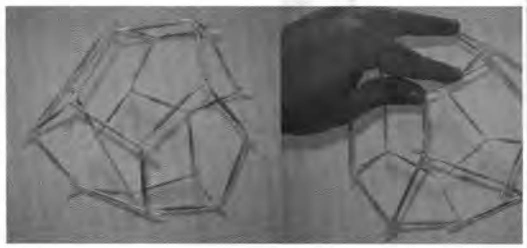
Repitiendo la prueba con el cubo, mostró que éste no logra la estabilidad tan fácilmente como el tetraedro; ante una carga de compresión horizontal todo el sistema colapsa lateralmente, y ante una carga de torsión, no opone ninguna resistencia. Al aplicarle la fórmula 12=3(8)-6, el resultado es que 12 no es para nada igual a 18, al cubo le faltarían 6 aristas para ser una forma estable. Estas 6 aristas se pueden anexar partiendo de cada uno de los vértices al vértice opuesto en cada una de sus caras logrando una configuración tetraédrica, ya que el cubo tiene 6 caras y el tetraedro 6 aristas. (Ver figuras 10 y 11)

Fig. 9. Tetraedro sometido a una carga de compresión.
Fig. 10. Cubo sometido a una carga de torsión.
Fig. 11. Tetraedro estabilizando el cubo

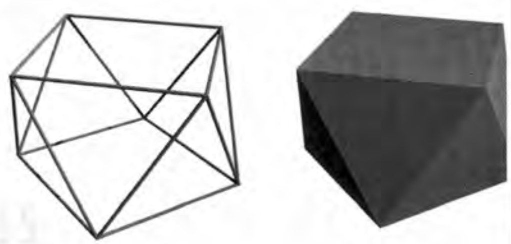
12

13

14



15

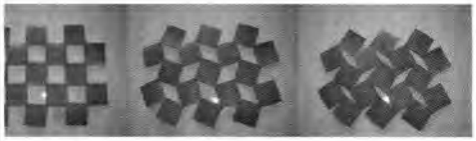


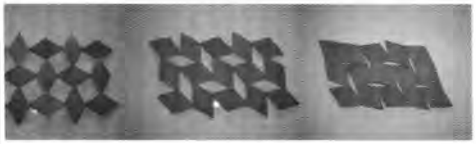
Otra forma de estabilizar el cubo es manteniendo la deformación que le dio la torsión a la configuración, mediante diagonales que no formen tetraedro. El resultado es un antiprisma de base cuadrada con diagonales en sus caras que se ve en la figura 12.

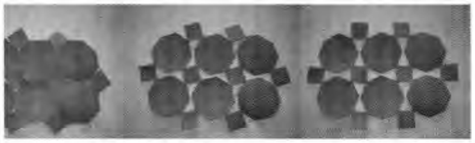
Resultados similares al del tetraedro se dieron en el octaedro y el icosaedro, ambos cuerpos formados por triángulos, pero con configuraciones o características geométricas que se alejan del triángulo, el primero tiene sección transversal cuadrada, y el segundo tiene una sección transversal hexagonal irregular, y secciones secundarias pentagonales; la primera suposición fue que estas características podrían influenciar la estructura, de tal forma que esta se tornara inestable, pero esto fue totalmente erróneo, la triangulación predominó en el comportamiento estructural y al aplicarles la fórmula de Artur Loeb se confirmó dicho resultado.

En la construcción del dodecaedro se observó que con sólo la característica del vértice flexible ya se empezaba a deformar la estructura, el componente de inestabilidad del pentágono se reproducía en todo el sistema. Aplicando la fórmula: $30 = 3(20)\text{-}6$, lo que es igual a $30 = 55$, la diferencia son 25; son entonces necesarias 25 aristas para estabilizar el poliedro. Por tal motivo este sólido es el que más se aleja del patrón de integridad propuesto por Fuller, esto quiere decir que no sólo es el más inestable de todos, si no al que más se le dificulta llegar a la estabilidad.

Fig. 12. Estabilidad del octaedro.
Fig. 13. Estabilidad del icosaedro.
Fig. 14. Inestabilidad del dodecaedro.
Fig. 15. Antiprisma de base cuadrada







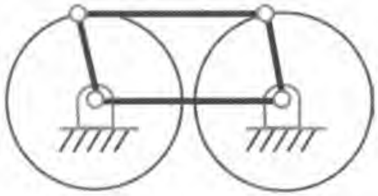
Luego de realizar esta exploración con los sólidos platónicos, se decidió construir las redes regulares e irregulares planas para estudiar su inestabilidad. De las tres regulares solo se fabricó la red de cuadrados, ya que la configuración elegida para las articulaciones excluía a la otras dos. La red de hexágonos no dispone de una composición tal que permita articular un polígono hexagonal con otro sin que se cierre el mecanismo o sin la ayuda de una barra adicional y en la red de triángulos anticipábamos su estructura estable inherente a su morfología.

La red mostró que aplicándole un carga horizontal se deforma de la misma manera que el cubo, lo interesante es que la red se sigue comportando como sistema aún después de aplicarle la carga, no es necesario aplicarle la fuerza a todos los elementos de la red, solo con inestabilizar uno de los cuadrados, este se encarga de transmitir el movimiento a los demás, evidenciando el comportamiento sinergético propio de las estructuras dinámicas que fundamentan este estudio. Sencillamente, el cuadrado que se inestabilizó, rota en su eje de simetría, haciendo desplazar a sus vértices entorno a su punto centro, como los vértices son articulaciones compartidas, al trasladarlas mueven los vértices de los cuadrados que los rodean, haciéndolos rotar en sus puntos centros, estos por tal motivo desplazan a sus vecinos y así sucesivamente.

Se construyeron otras redes, en este caso semirregulares las cuales en general mostraron un comportamiento similar, la constante en todas ellas es que involucran un cuadrado o un polígono de más de cinco lados para que se pueda realizar la deformación. El movimiento resultaba restringido por el tipo de articulación manejada, ya que era un pasador que unía los vértices montando las superficies de los polígonos.

De las redes que se fabricaron la única que se deformó sin un patrón de giro sinergético fue la red de hexágonos y triángulos que se ve en la figura 20, en ella la configuración hexagonal que adquieren los mecanismos establece un mecanismo de más de cuatro barras con movimiento irregular.

Fig. 16. Red de Cuadrados con articulaciones.
Fig. 17. Red de cuadrados y triángulos que forman rombos.
Fig. 18. Red de octágonos y cuadrados.
Fig. 19. Red de hexágonos, cuadrados y triángulos.
Fig. 20. Red de hexágonos y triángulos.



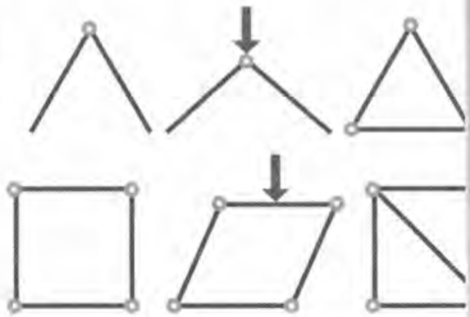
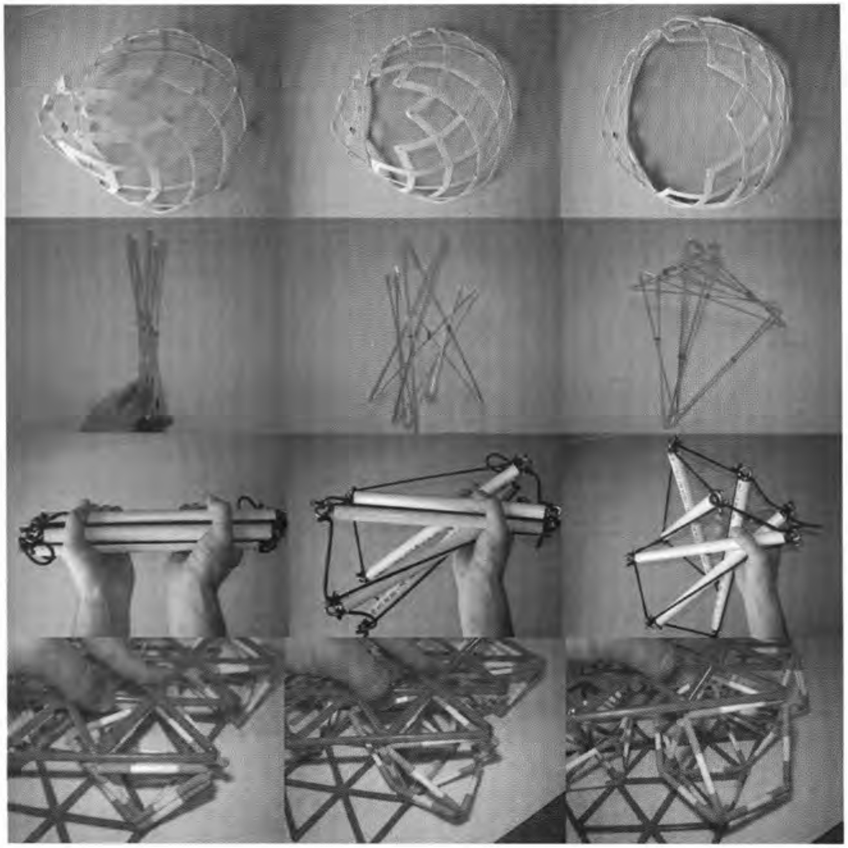


Fig. 21. Mecanismo de cuatro barras.
Fig. 22. Esquema de estabilidad e inestabilidad.

PRINCIPIOS DE MOVIMIENTO

Después de realizar los modelos de los poliedros y las redes bidimensionales se constata que en los casos que se genera una inestabilidad controlada es porque se presenta un mecanismo de 4 barras, que geométricamente no es más que un cuadrado con articulaciones en sus vértices. En las redes todas tenían un grado de libertad, o sea que la articulación sólo se podía mover en un sentido, lo que concluía con un sistema transformable de mayor control. En los poliedros, al poseer articulaciones de 3 grados de libertad el movimiento era menos regular y estaba condicionado al tipo de carga que soportaba.

Un mecanismo de cuatro barras se puede definir como un sistema compuesto por cuatro barras unidas por pivotes o articulaciones, la mayoría de las veces una de las barras, como en la figura 21, permanece fija y se nombra como el suelo, la otra es la barra que proporciona el movimiento, la tercera la barra superior, y la última la barra que recibe el movimiento.



En todos los modelos generados aplica esta definición, lo único diferente es que el mecanismo de cuatro barras no determina la configuración final de elemento, sólo es una de las partes del sistema, que si bien tiene movimiento no es un mecanismo de cuatro barras, si no que está compuesto por mecanismos de cuatro barras; cuyas barras son las aristas, en el caso de los poliedros, o los polígonos, en el caso de las redes, y cuyas articulaciones son los vértices de dichos elementos.

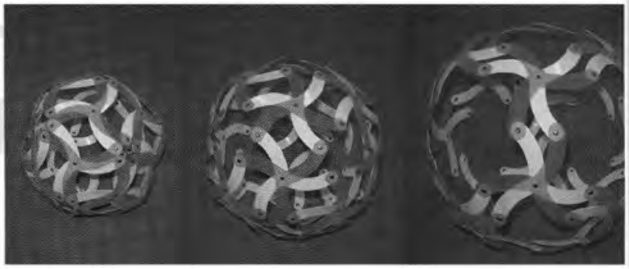
En la figura 22 vemos un esquema resultado de las estabilidades e inestabilidades comprobadas en las construcciones, el triángulo aunque posea articulaciones no funciona como un mecanismo sino como una estructura, primero falla por una de sus barras que por sus vértices, el cuadrado, a la primera carga, se deforma, produciendo inestabilidad, o para el caso del proyecto, resultando en movimiento, la forma de bloquearlo, es, otra vez, el triángulo.

Luego de sacar las conclusiones de la etapa de exploración mecánica con la geometría básica, se hicieron varios modelos dinámicos que utilizaban estos conceptos y adicionaban unos más complejos; como por ejemplo superficies curvas, desplegabilidad de sistemas tensegrity, agrupaciones espaciales, diafragmas, se comprobaron principios de movimiento y modelos transformables de otros estudios e investigaciones, no siempre de nuestra autoría; pero todos ellos trabajaban bajo los mismos principios geométricos y sinergéticos planteados al inicio de la investigación. Se pueden ver algunos de ellos en la figura 23.

Fig. 23. Otros modelos desplegables.

23

24



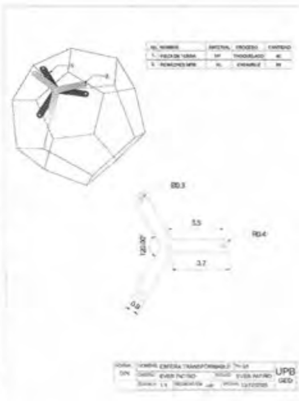
RESULTADOS.

Utilizando los principios analizados en la fabricación de modelos se desarrollaron tres propuestas de objetos dinámicos, dos de ellos transformables y pertenecientes al entorno lúdico, y el otro desplegable, perteneciente a un entorno doméstico pero con alta carga lúdica.

ESFERA ICOSAÉDRICA TRANSFORMABLE

Se llama icosaédrica porque está construida a partir de 20 módulos de barras triangulares, similar al icosaedro. El módulo base son dos piezas triangulares que poseen el pivote en el centro. Cuando dos módulos de estos se unen generan un mecanismos de cuatro barras. Geométricamente estos mecanismos están dispuestos en las aristas de un dodecaedro.

Toda la esfera se construye uniendo de a cinco módulos base alrededor de cada centro de las caras de un dodecaedro como se observa en el plano de la figura 25.

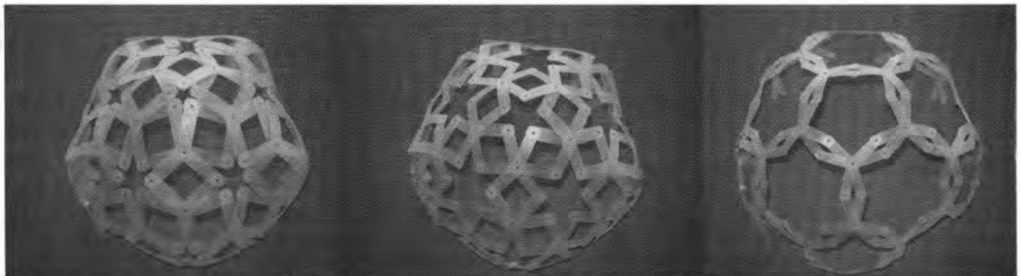


25

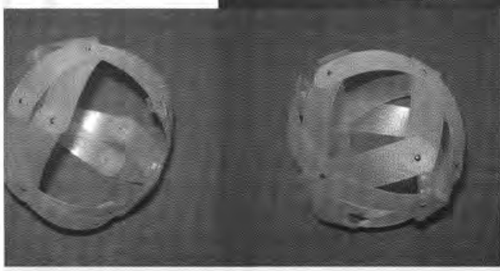
26

Fig. 24. Transformación esfera icosaédrica.
Fig. 25. Planos esfera .
Fig. 26. Mecanismo básico

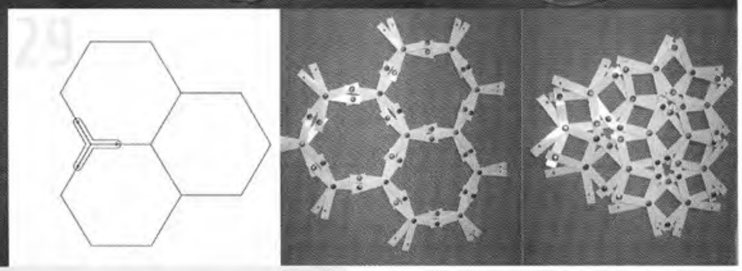
28



27

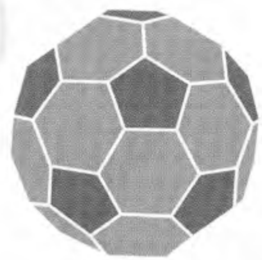


29



Este mismo sistema constructivo se puede emplear en otros poliedros o sistemas poliédricos para proporcionar la transformación. La traducción sería como en el caso anterior ubicar los módulos básicos dependiendo del número de vértices del cuerpo a fabricar, por ejemplo si se va a realizar un tetraedro se deben utilizar 4 módulos que son los mismos 4 vértices que tiene el sólido, ubicados de tal forma que se unan de a 3, logrando construir las caras triangulares. Se pueden ver el tetraedro en la figura 27.
En la figura 28 se ve una cúpula aplicando este principio, ahora a partir de la configuración de un icosaedro truncado (sólido arquimédico), el cual tiene dispuestos hexágonos rodeando a los pentágonos. El pentágono es el que permite la tridimensionalidad, si sólo hubiera hexágonos, se llenaría el espacio en una red bidimensional hexagonal, como en el modelo de la figura 30.

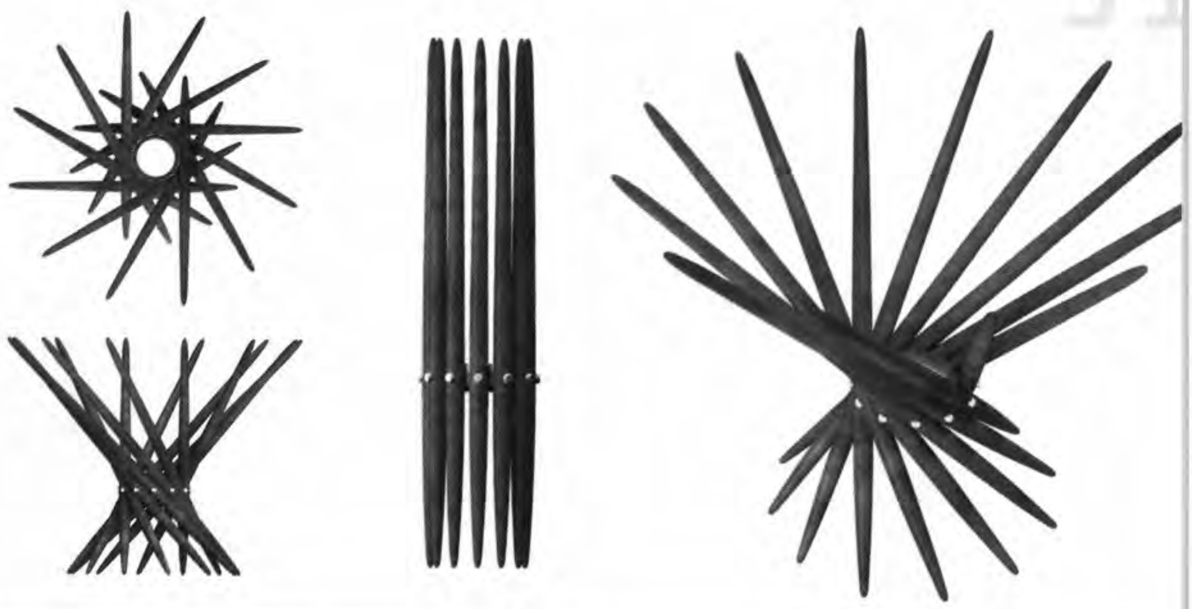
30



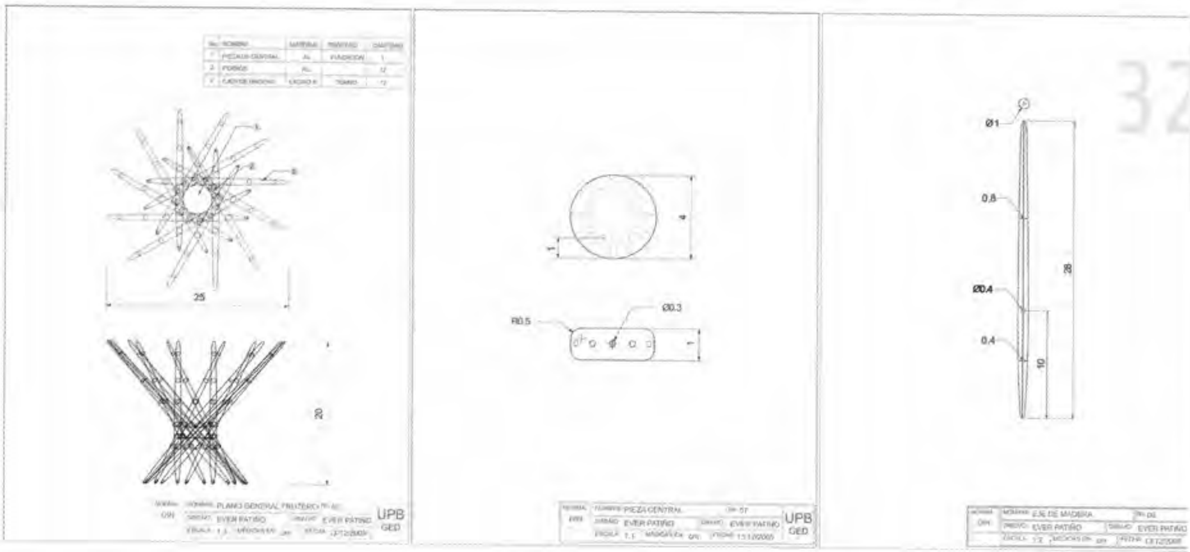
RESULTADOS

Fig. 27. tetraedro transformable.
Fig. 28. Cúpula transformable
Fig. 29. Red Hexagonal
Fig. 30. Icosaedro truncado

31



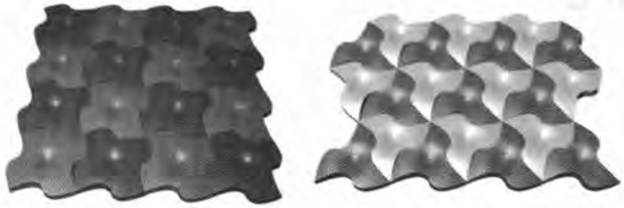
32

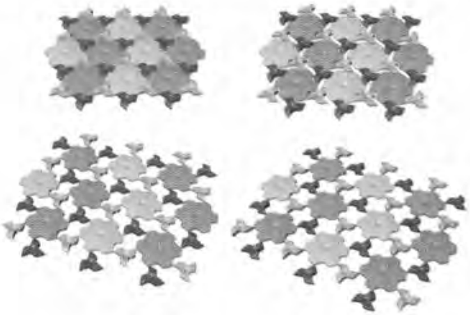


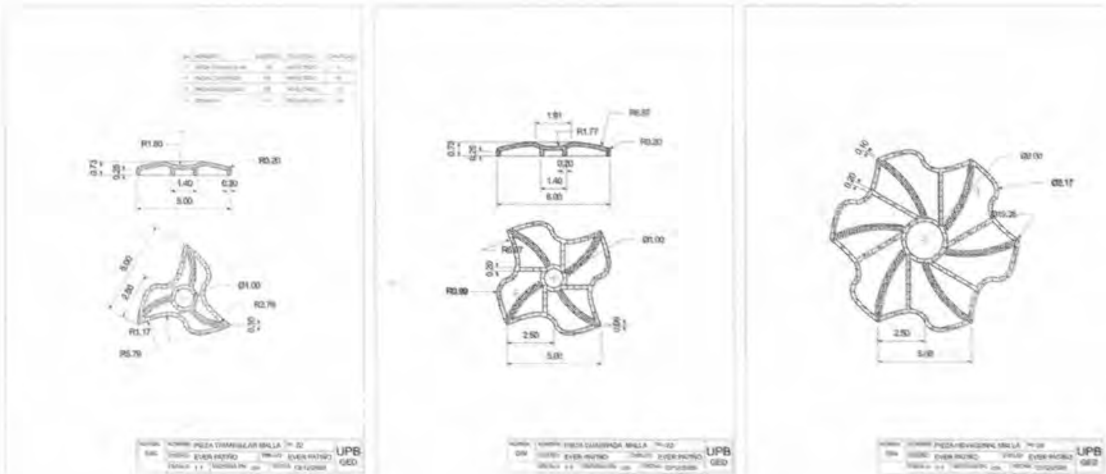
FRUTERO DESPLEGABLE

Frutero colapsable construido con 12 piezas de madera (cedro) torneada, que giran alrededor de una pieza en aluminio. La configuración está basada en un cuerpo geométrico reglado llamado hiperboloide, el cual puede ser construido con piezas rectas que al girar generan curva. El mecanismo del sistema se bloquea cuando las piezas de madera se empiezan a apoyar una sobre otra, comportándose recíprocamente.

Fig. 31. Frutero desplegable.
Fig. 32. Planos Frutero desplegable







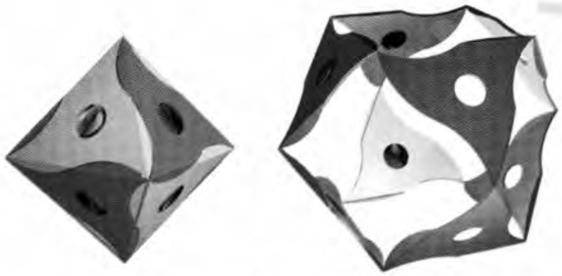
MALLAS TRANSFORMABLES, JUEGO DIDÁCTICO.

El juego didáctico, mallas transformables, está compuesto de 3 piezas geométricas, basadas en un triángulo, un cuadrado y un hexágono, los cuales han sufrido una transformación en sus lados, que les permiten modular y generar movimiento visual. El juego permite en primera instancia la construcción de redes regulares y semirregulares, que le ayudarán al jugador a comprender la estructura de los polígonos básicos y del espacio bidimensional en general.

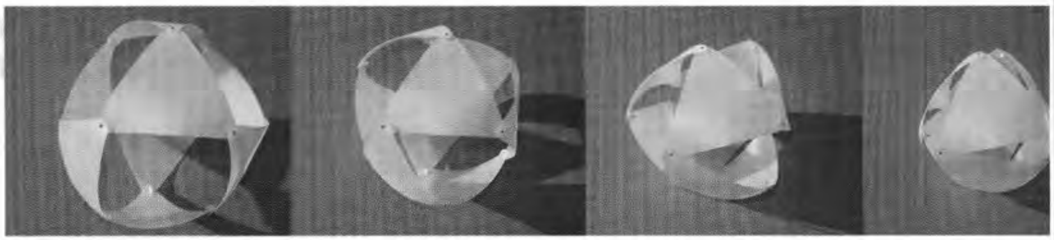
La otra función que posee el juego es la generación de movimiento sinergético a partir de la geometría. Esto quiere decir que accionando solo una pieza el sistema debe transformarse. La construcción de estas mallas se realiza siguiendo en primer lugar lo aprendido en el proceso anterior de redes bidimensionales, para luego conformar sistemas que no se triangulen, y creen mecanismos de cuatro barras. Las piezas poseen canales en donde van ubicadas bisagras de polipropileno.

Fig. 33. Piezas básicas de las mallas transformables.
Fig. 34. Dos configuraciones en red.
Fig. 35. Red de hexágonos y triángulos en transformación.
Fig. 36. Bisagra de polipropileno.
Fig. 37. Planos. Piezas mallas transformables.

38



39



PUZZLE JITTERBUG

Objeto lúdico transformable basado en la secuencia jitterbug, se construye con módulos triangulares y bisagras plásticas de polipropileno. Al estar cerrado se configura en octaedro, y al estar completamente abierto es un cuboctaedro. La secuencia de movimiento de cerramiento completa, como se ve en la figura 39, es posible, porque las caras triangulares opuestas giran en el sentido contrario, esto ocasiona un moviendo en todo el sistema, haciendo que las figuras cuadradas que se forman entre los triángulos se vayan transformando en rombos, hasta quedar completamente cerrados.

40

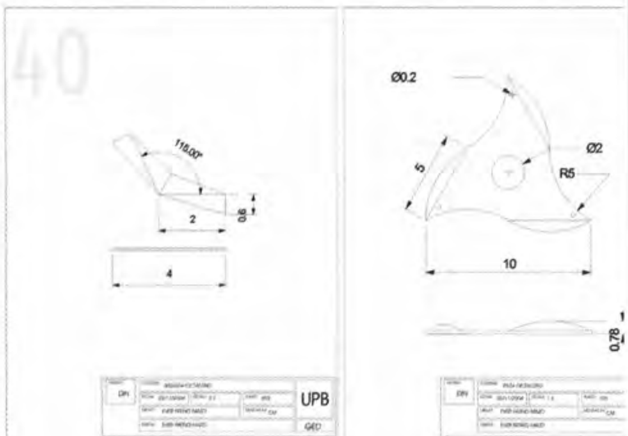


Fig. 38. Puzzle jitterbug cerrado y abierto.
Fig. 39. Secuencia de transformación.
Fig. 40. Planos. Puzzle Jitterbug.

41

RECIPIENTE DIAFRAGMA

Organizador para la habitación infantil, se basa en barras anguladas configuradas en tijeretas que permite el cerramiento. Posibilita modular por colores y disponer en superficies verticales u horizontales. Para construir un diafragma a partir de barras anguladas, se debe partir de un polígono cualquiera, en este caso se tomó un polígono de 12 lados. Éste polígono tiene ángulos internos de 151˚, éste ángulo es el que se utiliza para realizar la angulación entre los segmentos (Ver figura 42). Dependiendo del nivel de transformación que se necesite se hacen más o menos segmentos.

43

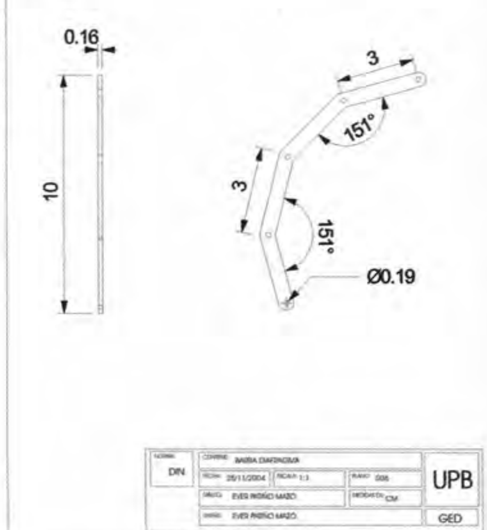


Fig. 41. Recipiente diafragma en diferentes posiciones.
Fig. 42. Secuencia de transformación de un diafragma poligonal.
Fig. 43. Planos de la barra.

CONCLUS

CONCLUSIONES

Se pueden sacar varias conclusiones en lo relativo a la metodología y a los resultados de la investigación, en ambos aspectos es predominante la innovación en la búsqueda de nuevos patrones, modelos y principios que pueden ser utilizados como herramientas en un proyecto de diseño que tenga dentro de sus fines la transformabilidad, plegabilidad, transportabilidad o variabilidad.

• La geometría dinámica, como un medio para mutar la configuración de una forma, contradice el principio de estabilidad, ya que esta es la capacidad de retener la forma. Así una estructura transformable debe necesariamente ser inestable. Se puede decir, pues, que una estructura es transformable si es posible realizar un movimiento entre las barras, aflojando, de manera intencional, las articulaciones.

• El diseño de estructuras desplegables plantea dos etapas adicionales al problema general de diseño, la primera es la de modelizar las transformaciones geométricas de la estructura en todo el curso del cambio, desde que está plegada hasta que llega a la posición desplegada, y la segunda es la de convertir el modelo geométrico en un modelo mecánico, partiendo del hecho de que las aristas son barras o sistema mecánicos, los vértices, articulaciones de diferentes grados de libertad, y las caras, superficies.

• La geometría espacial, en el proyecto de diseño es una herramienta que sirve para vislumbrar de una manera más clara el funcionamiento de las formas y los sistemas, ya sean estáticos, o dinámicos, y optimizar tanto el proceso de proyectación, como el resultado final del proyecto o producto.

• Las estructuras dinámicas difieren de los mecanismos convencionales entre otras cosas, en que los primeros sólo tienen una entrada de movimiento y en los segundos este requisito no siempre es cierto. La geometría y la sinergética son los pilares que fundamentan la formalización y materialización de una estructura dinámica desde los principios teóricos que desarrolló Buckminster Fuller; en el diseño mecánico esto elementos de optimización no son necesarios.

• Para un diseñador es mucho más fácil y coherente diseñar desde la geometría, que desde la configuración mecánica. El acercamiento a cómo se comporta el sistema que va a generar movimiento, resulta más tangible de ésta forma, que desde un análisis riguroso que posiblemente vuelva complejo el proceso.

• Se evidencia tanto en los resultados de la investigación como en los estudios afines que anteceden a este proyecto, que a partir del repite de elementos sencillos se puede generar formas y sistemas dinámicos de alta eficiencia productiva, funcional y estética.

REFERENCIAS DE LAS FIGURAS

Los modelos de las figuras 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 22, y 41 fueron construidos por estudiantes de los cursos "Proyecto especial en biónica" y "Optativa de investigación en Biónica" del segundo semestre del 2005. Los demás modelos fueron fabricados por la Línea de Investigación en Morfología Experimental y la docente Sandra Marcela Veléz. Todas las fotos son propiedad del autor.

BIBLIOGRAFÍA

• FRANCO, Misael Ricardo Medina. ACOSTA, Leonel Torres. Adaptabilidad Arquitectónica a partir de la movilidad estructural. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, 2002. 251p.
• GHYKA, Matila C. Número de Oro "I Los Ritos". Editorial Poseidón, Barcelona. 1968. Pág. 46, 47, 48.
• GIL, Olga M. Un Mundo de Bolsillo: La geometría plegable de Santiago Calatrava. Universitat de València. En: http://www.uv.es/metode/index.html
• GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN BIÓNICA U.P.B. Biónica & Diseño: De estrategia Natural a Innovación. "Manual de Biónica". (En Proceso)
• HÉRNANDEZ, Carlos Enrique. Desarrollo de Estructuras Transformables Estran 1. En Tecnología y Construcción. No. 15. IDEC Facultad de Arquitectura UCV. Mérida, Venezuela. 1999. p7-33.
• LAWLOR, Robert. GEOMETRÍA SAGRADA. Editorial Debate S.A. Madrid, España. 1996. Pág. 6.
• PATIÑO, Ever M. Sistemas desplegables para el diseño de mobiliario. En: Universitas Científica. UPB. Diciembre, 2005. Volumen VI. Pág. 57 – 61.
• PATIÑO, Ever M. Mobiliario desplegable, una aproximación biónica. En: Universitas Científica. UPB. Diciembre, 2005. Volumen VI. Pág. 57 – 61.
• RODRÍGUEZ, Carolina M. Arquitectura Metamórfica. Universidad Nacional de Colombia, 2000. Pág. 286p.
• SANZ, Maria Agripina García. MORATALLA, Ascensión. GEOMETRÍA EN LA ARQUITECTURA. Escuela de Arquitectura de Madrid. 1998. 44p.
• SANZ, Maria Agripina García. MORATALLA, Ascensión. SIMETRÍA. Escuela de Arquitectura de Madrid. 1998. 40p.
• STEVENS. S.Peter. Patrones y pautas en la naturaleza. Ed. Salvat. 1 Ed. Barcelona. 1987. 105p.
• STEWART, Ian. GOLOBITSKY, Martin. ¿ES DIOS UN GEÓMETRA? "Las simetrías en la naturaleza". Critica. Barcelona. 1995. Pág. 42,114, 119, 311.