

EJE DE FORMACIÓN EN INVESTIGACIÓN

MONOGRAFÍA

DESARROLLO BIDIMENSIONAL DE UN FRACTAL DINÁMICO A PARTIR DE
TIPOLOGÍAS DE PLIEGUE DE TIJERA UTILIZANDO COMO MODELO EL
FRACTAL COPO DE NIEVE KOCH

Autores

Pablo Mejía Silva

Aura Cristina López Jiménez

María Andrea Ruiz Balbín

Asesores

Diana Urdinola

Alejandro Alberto Zuleta Gil

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN – ANTIOQUIA

2018

1. INTRODUCCIÓN	
1.1. Presentación	6
1.2. Resumen	6
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	7
2.4. Elementos del problema de investigación	9
2.5. Limitaciones de la investigación	9
3. JUSTIFICACIÓN	10
4. MARCO DE REFERENCIA	11
4.1. Antecedentes	11
4.2. Estado del arte	16
5. OBJETIVOS	20
5.1. Objetivo general	20
5.2. Objetivos específicos	20
6. METODOLOGÍA	21
7. RESULTADOS Y DISCUSIONES	23
8. CONCLUSIONES	34
9. REFERENCIAS	35

Listado de figuras

Figura 1. Sistemas mecánicos básicos de las estructuras dinámicas (a) triángulo con unión deslizable y cuadrado con uniones articuladas, (b) recorrido de una barra durante el proceso de pliegue y despliegue, (c) tijeras en X con un grado de libertad, y agrupaciones de tijeras y (d) agrupaciones de diafragmas 11

Figura 2. Teorías matemáticas fractales (a) El triángulo de Sierpinski, fractal creado por Waclaw Sierspinski (Este triángulo se construye partiendo de un triángulo simple. Después, se unen los puntos centrales de cada arista de modo que quede dividido en cuatro triángulos iguales. Con esto, a cada uno de los tres triángulos que quedan en la posición de los vértices del triángulo original se les aplica esta misma transformación sucesivamente). (b) Conjunto de Cantor, fractal creado por George Cantor, es un destacado subconjunto fractal del intervalo real $[0, 1]$, que admite dos definiciones equivalentes: la definición numérica: es el conjunto de todos los puntos del intervalo real $[0,1]$ que admiten una expresión en base 3 que no utilice el dígito 1. La definición geométrica, de carácter recursivo, que elimina en cada paso el segmento abierto correspondiente al tercio central de cada intervalo. (c) El Copo de Nieve de von Koch ó Snowflake, creado por Niels Fabian Helge von Koch, es un fractal cerrado cuyo perímetro es infinito y su área es finita. 13

Figura 3. Fractales lineales (a) Conjunto de Cantor. (b) Curva de Von Koch. (c) Triángulo de Sierpinski. 15

Figura 4. Fractales no lineales (a) Conjunto de Mandelbrot. (b) Conjunto de Julia. 16

Figura 5. Malla reticular plegable con modulación y adaptación en forma de X. (a) Vista superior. (b) Vista 17

Figura 6. Malla recticular plegable: Adaptación de la estructura en el espacio. 18

Figura 7. Modelo cartón industrial cortado a láser (Overvelde, Weaver, Hoberman, & Bertoldi, 2017).	18
Figura 8. Techos retráctiles planares (a) Modelo físico de la estructura de las placas (b) Segundo modelo físico de la estructura de las placas.	19
Figura 9. Fases del copo de nieve Koch desde su fase 0 a su fase 3, en rojo fase máxima a trabajar.	21
Figura 10. La geometría del fractal copo de nieve Koch se da de manera radial partiendo desde un centro.	23
Figura 11. Tijeras (a) Estructura de agrupación lineal de tijeras rectas. (Villate, 2008) (b) Movimiento de la estructura.	23
Figura 12. Estructura de tijeras rectas excéntricas	24
Figura 13. Estructuras de agrupaciones sobre un plano.	24
Figura 14. Estructura de tijeras anguladas.	25
Figura 15. Bocetos exploratorios en donde se dibujaba la morfología del copo de nieve Koch y sobre este dibujo se colocaba un trozo de papel mantequilla para dibujar posibles mecanismos de tijera que se pudieran adecuar a la morfología del fractal.	26
Figura 16. Primer modelo experimental realizado en papel bond. (a) Modelo armado. (b) Acercamiento del mecanismo de tijera angulado que se unía por medio de chinchas. (c) Mecanismo de tijera angulado con 3 puntos de articulación.	27
Figura 17. Mecanismo de tijera angulada de 1 articulación desde el centro.	27
Figura 18. Estructura copo de nieve koch en cartulina plana, material más rígido. (a) Estructura abierta y unida por chinchas. (Estructura cerrada, muestra una forma irregular.	28
Figura 19. Mecanismo de tijera angulada de ángulo agudo.	28

Figura 20. Maqueta de exploración con mecanismo de tijera angulada de ángulos cerrados, (a) se muestra estructura cerrada. (b) Se muestra la estructura abierta. (c) Estructura en el interior dando soporte, en cartulina plana de color amarillo. 29

Figura 21. (Modelo experimental con una base soporte con la morfología del copo de nieve Koch en su fase 1. (b) Mecanismo de tijera articulado cerrado. (c) Mecanismo de tijera articulado abierto. 30

Figura 22. Mecanismo de diafragma angulado. (a) Diafragma cerrado. (b) Diafragma abierto. (c) Dos triángulos equiláteros unidos por el centro (d) Movimiento de los triángulos. 30

Figura 23. Resultado y ensamble de modelo experimental con mecanismo dependientes. (a) Muestra la estructura base con la morfología del copo de nieve hasta su fase 1, posee de a dos orificios en cada una de sus puntas y en la parte del centro 6 orificios alargados ubicados de manera radial, (b) mecanismo de diafragmas angulados. (c) Ubicación del mecanismo de diafragmas angulados en el centro de la estructura ensamblado sobre los orificios ubicados de manera radial, adicional se muestra el ensamble de mecanismos rectos en las puntas de la estructura. (d) Mecanismos de tijeras articulados que generarán la morfología del copo de nieve hasta su fase 2. (e) Ubicación de las tijeras de la fase 2 sobre el mecanismo de diafragma angulado del centro. 31

Figura 24. Mecanismos de tijeras que generarían la fase 2 del copo de nieve Koch. (a) Mecanismo de tijera angulado con tres puntos de articulaciones y (b) mecanismo de tijera recto. 32

Figura 25. Modelo experimental realizado en MDF 3mm. (a) Modelo con ángulos de tijeras abierto. (b) Modelo en MDF 3mm con ángulos de tijeras cerrado. 32

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación

La siguiente investigación en la Línea de Morfología Experimental parte de la idea de generar una estructura dinámica bidimensional, a partir de la morfología que tiene el fractal copo de nieve Koch, con el propósito de ampliar el campo de información en el campo científico, acerca de dos temáticas que no se habían relacionado anteriormente.

Para esto se empezó con una previa investigación acerca de las estructuras dinámicas enfocándose en las estructuras plegables de mecanismos de tijeras, simultáneo a eso, se investigó acerca de los fractales, centrándose en las características y propiedades del copo de nieve Koch, para lo cual se realizan diferentes modelos de estudio con los que se estudia, clasifica y valida el mecanismo propuesto por la investigación.

1.2. Resumen

En esta investigación se propone la unión de un fractal, el copo de nieve Koch identificado por Niels Fabian Helge von Koch, con una estructura dinámica, para así configurar un fractal con movimiento dinámico. Para esto se realizó un estudio de las propiedades geométricas y morfológicas del fractal, logrando así comprender en su totalidad este fractal; también se estudió a fondo las estructuras dinámicas y sus características, movimiento de tijera, diafragmas y grados de libertad. Con esto se pudo generar un nuevo tipo de tijeras que ayudaron a encontrar la estructura más idónea para generar el fractal dinámico.

1.3. Palabras clave

Estructuras dinámicas, fractal copo de nieve Koch, tipologías de pliegue.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Tema general del proyecto

En todos los niveles que ocurren en la naturaleza, desde las estructuras galácticas hasta las moleculares, existen incontables ejemplos de cómo una forma básica se repite diferentes escalas (árbol, truenos, espacio) y ello demuestra en algunos casos que la parte contiene al todo.

Se identifica poca información existente con la aplicación de los principios del fractal para el desarrollo de una estructura dinámica por esto se propone la utilización de un análisis geométrico del Copo de Nieve Koch y la identificación de las características geométricas estructurales de este fractal, para el desarrollo de un sistema estructural dinámico, que pueda tener aplicaciones en el Diseño Industrial.

2.2. Características generales del proyecto de investigación

Este proyecto se desarrollará bajo el esquema de investigación descriptiva, la cual tiene como objetivo llegar a conocer situaciones a través de una descripción y análisis exacto de actividades y procesos cuya finalidad no es solo la recolección de datos, sino también la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables.

2.3. Problema de investigación identificado

Un objeto fractal es una figura, que puede ser espacial o plana, formada por componentes infinitos, esta es la definición matemática de un fractal cuya principal característica es que su forma y la manera en que se distribuye en el plano no varía, aun cuando se modifique la escala empleada. Los fractales son, por lo tanto, elementos

calificados como semigeométricos (por su irregularidad no pertenecen a la geometría tradicional) que disponen de una estructura esencial que se reitera a distintas escalas.

En los hallazgos previos en 1904 se identificó por Niels Fabian Helge Von Koch el Copo de Nieve Koch, el cual es el fractal que tiene unas características geométricas y morfológicas muy particulares, pues este tiene un área finita pero su perímetro se puede expandir infinitamente dependiendo de las iteraciones que se desplieguen.. Este fractal ha sido poco explorado por el Diseño Industrial, lo que hace que no haya mucha información para desarrollar objetos que utilicen estos principios, para esto se tendrían que introducir unos objetos dinámicos.

Las estructuras dinámicas son aquellas que presentan movimiento y permiten la transformación de los espacios, adaptarse a condiciones del medio ambiente como climática, de iluminación natural y de acústica o permitir adaptabilidad arquitectónica a cambio de uso. En este sentido se identifica que hay poca información existente con la aplicación de los principios del fractal para el desarrollo de una estructura dinámica.

Esta investigación propone encontrar una tipología de tijera adecuada en términos de movimiento uniforme, que logre replicar la bidimensionalidad morfológica del fractal copo de nieve Koch para el desarrollo de un sistema estructural dinámico, que pueda tener aplicaciones en el Diseño Industrial tales como sistemas de cubrimiento, cubiertas para interiores, delimitador de espacios, entre otros.

Pregunta de investigación.

¿Cuál de las tipologías de pliegue de tijera logra replicar de manera más adecuada, en términos de movimiento uniforme, la bidimensionalidad morfológica del fractal copo de nieve Koch para realizar una estructura dinámica?

2.4. Elementos del problema de investigación

Fractal, estructuras dinámicas, copo de nieve Koch, mecanismos de tijeras, grados de libertad de movimiento.

2.5. Limitaciones de la investigación

En esta investigación se espera indagar, comprender y analizar a fondo sobre las estructuras dinámicas y las tipologías de pliegue que las componen junto con las características morfológicas del fractal copo de nieve Koch hasta su segunda iteración, para así determinar por medio de un modelo experimental bidimensional a escala los pasos necesarios para la creación de una estructura plegable basada en la morfología del fractal copo de nieve Koch.

3. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto busca trabajar con el estudio de dos componentes, los fractales y las estructuras dinámicas, por sus características y cualidades, la morfología de los fractales remonta a la naturaleza y de cómo esta está en constante movimiento nunca es inconsciente con su desplazamiento. El Copo de Nieve Koch tiene unas características morfológicas interesantes para la realización de estructuras plegables, puesto que es un fractal estructurado que tiene unos requerimientos y restricciones específicas tales como un perímetro infinito en un área finita, autosimilitud, o sea resulta idéntico a cualquier escala, se divide a cada lado en tres partes iguales, y en el segmento central de cada lado se levanta un nuevo triángulo equilátero. El método para dinamizar la estructura en este caso del fractal Copo de Nieve Koch, es la utilización de unas tipologías de tijeras. En esta investigación se estudian aquellas que presentan un sólo grado de libertad, pues en ellas el movimiento es uniforme y se transmite a todo el sistema de forma simultánea. Se realizó una revisión del estado del arte en la que se pudo evidenciar que, aunque hay mucha información relacionada con los fractales y las estructuras dinámicas no hay ninguna fuente en la que se unan los dos conceptos.

El estudio de este tipo de principios para el desarrollo de modelos de estudio y la identificación de patrones y estructuras de transformación a partir de geometrías fractales, permitirán potenciar el uso de este tipo de modelos para el desarrollo de nuevas oportunidades objetuales en el campo del Diseño Industrial en iluminación y espacialidad.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. Antecedentes

4.1.1 Estructuras dinámicas.

Las estructuras dinámicas son aquellas que presentan movimiento ya sea manteniendo la forma y cambiando la ubicación, o cambiando la configuración. (Villate, 2002). En la Figura 1 se muestran algunos de los sistemas mecánicos básicos empleados para las estructuras dinámicas en donde se observan estructuras de un grado de libertad: a partir de polígonos como el triángulo y el cuadrado (ver figura 1 (a)), donde a partir del triángulo se muestran vértices articulados y deslizables, y del cuadrado vértices articulados. Dichas estructuras pueden ser trabajadas con tijeras que pueden ser lineales y estar unidas desde su centro (ver figura 1 (b)), o tijeras anguladas con agrupaciones circulares (ver Figura 1(c)).

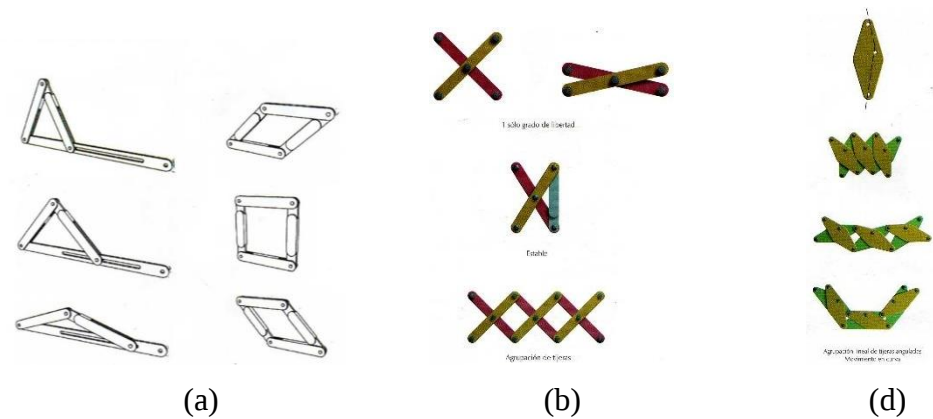


Figura 1. Imágenes tomadas de Villate 2012. Sistemas mecánicos básicos de las estructuras dinámicas (a) triángulo con unión deslizante y cuadrado con uniones articuladas, (b) tijeras rectas unidas desde el centro en X, y agrupaciones de tijeras y (c) agrupaciones de tijeras anguladas

4.1.2 Fractales.

Son considerados objetos matemáticos que constituyen la Geometría de la Teoría del Caos, descubierta por Jules Henri Poincaré en 1890, la cual plantea que una pequeña variación en el sistema o en un punto del mismo puede provocar una variación radical en éste, y similar a esto, Benoit Mandelbrot, un matemático Polaco reconocido por sus trabajos sobre fractales y a quien se le conoce por el descubrimiento de estos, considera fractal a aquellos objetos con tamaño y orientación variables y que en cada instante tiene un aspecto similar al anterior (Barcellos and Barnsley 1990)

La palabra fractal, viene del latín fractus, que significa fracturado, roto, irregular. A finales de la década de los setenta y principios de los ochenta (1977 y 1982) aparece el término en el Centro de Investigación Thomas.J. Anteriormente trabajaron en ellos Koch, Cantor y Peano principalmente definiendo objetos catalogables dentro de esta categoría, pero no reconocidos como tales. ¿Por qué los fractales apenas aparecieron a principios de los años 80? la respuesta es porque no se habían desarrollado las computadoras, sin ellas los fractales no existirían, iterar y hacer estos cálculos con lápiz y papel resultaría en una complejidad que nadie podría resolver.

En un curso dictado en el año 2003 en la Universidad Nacional “Introducción a la Geometría Fractal”, se encontró que los objetos fractales fueron creados mucho antes de haberse desarrollado formalmente la geometría fractal o la teoría del caos, de hecho, se pueden encontrar y reconocer figuras con características fractales como la del triángulo de Sierpinski (ver Figura 2(a)) en grabados de tela de hace varias décadas atrás, hasta en los años de 1400 se hallaron grabados japoneses con estas estructuras.

Los primeros que comenzaron a demostrar teóricamente esta problemática fueron Cantor, con su conjunto de Cantor (ver Figura 2(b)). Cantor fue el inventor de la teoría de conjuntos, que es la base de las matemáticas modernas junto con Peano, matemático, lógico y filósofo italiano, conocido por sus contribuciones a la lógico matemática y la teoría de números. Hasta llegar a los años de 1880 con Poincaré que fue un prestigioso polímata: matemático, físico, científico teórico y filósofo de la ciencia. . Otra estructura matemática que hace parte de los fractales más reconocidos es el de Koch “Snowflake” Curve, o la curva de “Copo de nieve” de Helge von Koch (ver Figura 2(c)) que poseen unas características interesantes de poseer perímetro infinito sobre un área determinada y que abordaremos más a fondo a lo largo de esta investigación..

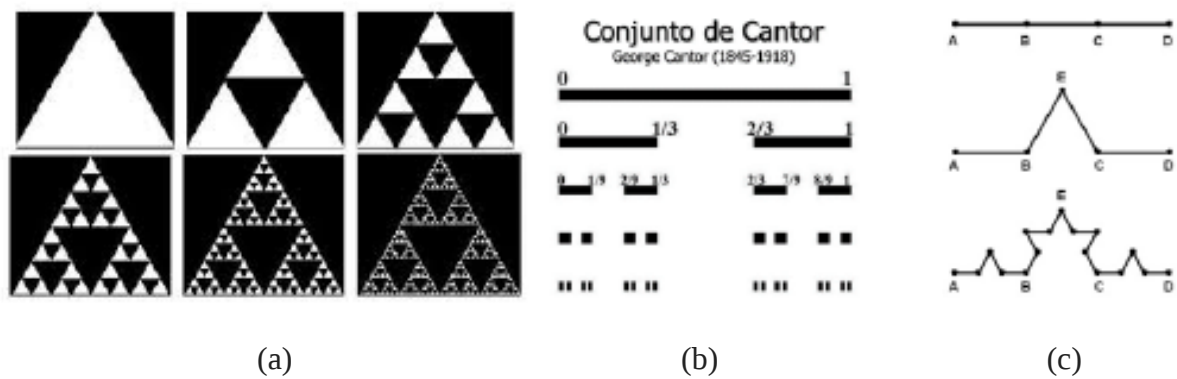


Figura 2. Teorías matemáticas fractales (a) El triángulo de Sierpinski, fractal creado por Waclaw Sierpinski. (b) Conjunto de Cantor, fractal creado por George Cantor (c) El Copo de Nieve de von Koch ó Snowflake, creado por Niels Fabian Helge von Koch, es un fractal cerrado cuyo perímetro es infinito y su área es finita.

4.1.3 Propiedades de los fractales.

La palabra fractal, enunciada por Mandelbrot, proviene del latín y significa roto, quebrado, los fractales son objetos matemáticos que conforman la geometría de la teoría del caos y que están compuestos por un nuevo lenguaje donde los puntos, rectas, esferas, elipses y demás objetos de la geometría tradicional son reemplazados por algoritmos

iterativos computacionales que permiten descubrir sistemas naturales caóticos y dinámicos. Un fractal tiene una estructura fina; esto es, mayor detalle en escalas arbitrariamente pequeñas, hay que tener en cuenta que es demasiado irregular para ser descrito con la geometría euclidiana tradicional, tanto local como global.

Un objeto fractal es aquél que tiene las siguientes dos características:

- a) Autosimilitud:** Según Mandelbrot (1980), autosimilar o autosemejante es cuando las partes de algo tienen la misma forma o estructura que el todo, aunque puedan presentarse a diferente escala y hasta estar ligeramente deformada. Existen tres tipos de autosimilitud:

Autosimilitud exacta: Este tipo exige que el fractal parezca idéntico a diferentes escalas.

Cuasiautosimilitud: Exige que el fractal parezca aproximadamente idéntico a diferentes escalas. Los fractales de este tipo contienen copias menores y distorsionadas de sí mismos.

Autosimilitud estadística: Es el tipo más débil de autosimilitud: se exige que el fractal tenga medidas numéricas o estadísticas que se preserven con el cambio de escala. Los fractales aleatorios son ejemplos de fractales de este tipo.

- b) Dimensión Fractal:** Dado que un fractal está constituido por elementos cada vez más pequeños, el concepto de longitud no está claramente definido: Cuando se quiere medir una línea fractal con una unidad, o con un instrumento de medida determinado, siempre habrá objetos más finos que escaparan a la sensibilidad de la regla o el instrumento utilizado, y también a medida que aumenta la sensibilidad del instrumento aumenta la longitud de la línea por lo que la longitud de la línea fractal depende de la

longitud de instrumento, o de la unidad de medida que tomemos, así la noción de longitud en estos casos, carece de sentido. Para ello se ha ideado otro concepto: el de dimensión fractal. Que en el caso de las líneas fractales indica de qué forma o en qué medida una línea fractal llena una porción de plano.

4.1.4 Tipos de fractales: lineales y no lineales.

Los fractales lineales son aquellos que se construyen con un simple cambio en la variación de sus escalas y son exactamente idénticos en todas sus escalas hasta el infinito. El conjunto de Cantor (ver Figura 3(a)), la curva de Koch (ver Figura 3(b)) y el triángulo de Sierpinski (ver Figura 3 (c)) son ejemplos de fractales lineales.

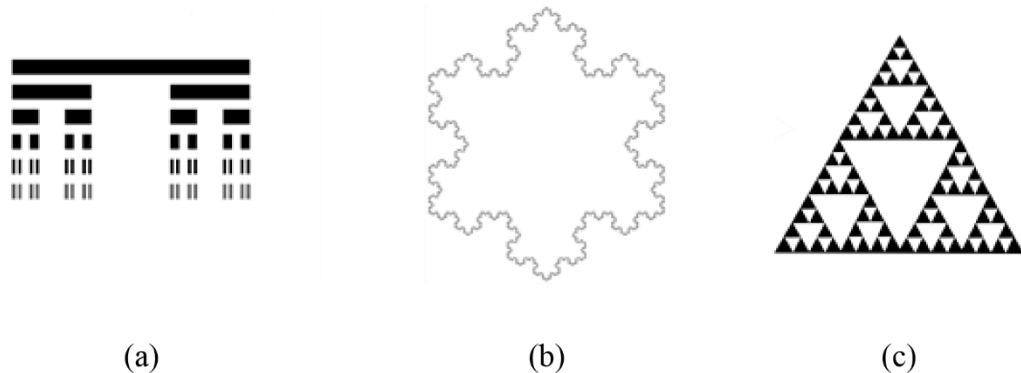
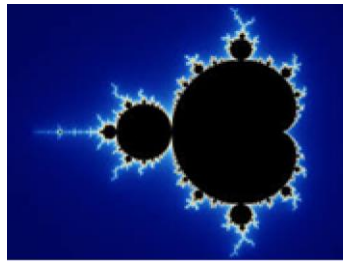


Figura 3. Fractales lineales (a) Conjunto de Cantor. (b) Curva de Von Koch. (c) Triángulo de Sierpinski.

En cualquiera de las tres partes de la figura anterior cuando se comienza a “insertar” dentro de esos objetos siempre va a encontrar exactamente la misma estructura, sin distorsiones, sólo cambiará su escala. En la Figura 3 (a), por ejemplo, siempre se encuentra una línea recta, en la Figura 3 (b) y (c) siempre un triángulo a diferentes escalas.

Los fractales no lineales se generan a través de algoritmos conocidos por la matemática euclídea, el Conjunto de Mandelbrot (ver Figura 4(a)) descubierto por Benoit Mandelbrot, son todos aquellos números complejos que cumplen una propiedad: que el valor de una sucesión determinada, para un determinado número, es convergente, es decir, no tiende a infinito. La mayoría de los objetos fractales puramente matemáticos y naturales son no lineales. Ejemplos de ellos son: El conjunto de Mandelbrot o el conjunto de Julia (ver Figura 4 (b)).



(a)

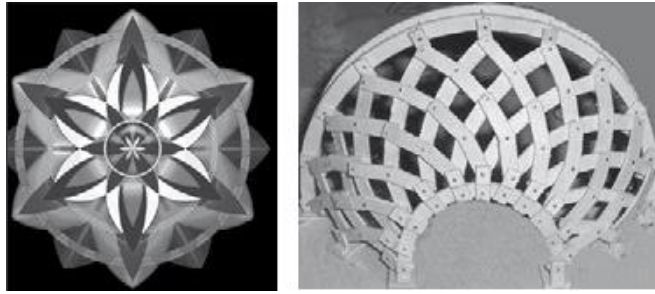


(b)

Figura 4. Fractales no lineales (a) Conjunto de Mandelbrot. (b) Conjunto de Julia.

4.2. Estado del arte

Morales Guzmán, C. C. (2013) en su trabajo con la revista de arquitectura de la Universidad Veracruz de Mexico, presenta de manera descriptiva cómo se desarrollarán los modelos a escala de una investigación sobre las cubiertas plegables, en donde se encontrarán las pautas necesarias para el desarrollo de dicho sistema estructural flexible. Para comprender como se verá la experimentación, se realiza en primer lugar una geometría celular fractal, concepto que se toma es la modulación y la adaptación de la estructura en el espacio como se puede ver en la Figura 5.



(a)

(b)

Figura 5. Malla reticular plegable con modulación y adaptación en forma de X. (a) Vista superior. (b) Vista frontal.

Al observar esta retícula modular se puede implementar una geometría que sea posible reproducir varias veces e integrar su estructura geométrica en el espacio; para generar esta retícula es necesario dirigirse a los principios fractales, que consisten en la segmentación de una figura varias veces, en este caso se construyó una malla reticular plegable con una figura en forma de “X” (ver Figura 6).

Fuente: Morales (2010).

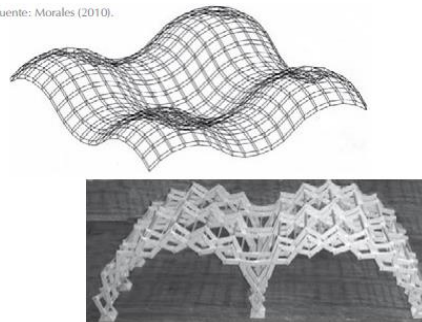


Figura 6. Malla reticular plegable: Adaptación de la estructura en el espacio.

Overvelde y equipo de diseño 2016 presentó una estrategia de diseño basada en mosaicos que llenan el espacio de unos poliedros creando así tres dimensiones de materiales reconfigurables que comprenden un conjunto periódico de placas rígidas y

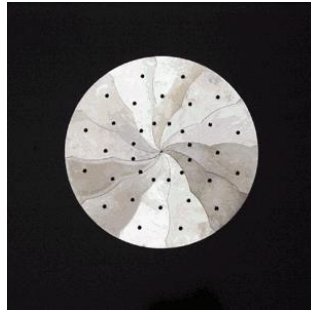
bisagras elásticas, los cuales luego de su análisis numérico y la realización de prototipos físicos permitieron explorar sistemáticamente la movilidad de las estructuras diseñadas identificando una amplia gama de deformaciones y de reordenamientos internos. El equipo interdisciplinario encontró que los conjuntos de poliedros se pueden utilizar como una plantilla para diseñar estructuras de paredes delgadas reconfigurables extruidas (ver Figura 7), lo que simplifica considerablemente el proceso de diseño.



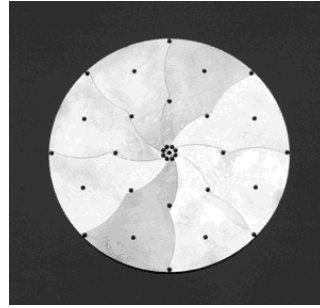
Figura 7. Modelo cartón industrial cortado a láser (Overvelde, Weaver, Hoberman, & Bertoldi, 2017).

Estudiando investigaciones que son relacionadas, se halló una sobre *Deployable Structures Laboratory* de Techos retráctiles planares, el trabajo presentado a continuación se basa en un tipo existente de estructura de barra circular que forma una serie de rombos interconectados y que es capaz de retraerse hacia el límite exterior de la estructura. El siguiente texto sólo considera estructuras circulares, aunque se puede construir cualquier forma de plano.

Se han construido dos modelos físicos para demostrar las estructuras de placa descritas anteriormente (ver Figura 8 (a) y (b)). Ambos han sido diseñados usando límites periódicos con arcos de un radio predeterminado. Realizados con una placa de aleación de Aluminio del calibre 16. Las articulaciones fueron hechas de remaches de plástico.



(a)



(b)

Figura 8. Techos retráctiles planares (a) Modelo físico de la estructura de las placas (b) Segundo modelo físico de la estructura de las placas.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Determinar los aspectos morfológicos de las tipologías de pliegue de tijera, que permitan la generación de estructuras plegables bidimensionales a partir del fractal copo de nieve Koch.

5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la morfología del fractal copo de nieve Koch.
- Seleccionar las tipologías de pliegue de las estructuras plegables.
- Relacionar las iteraciones con las tipologías de pliegue.
- Validar las relaciones entre la morfología del copo de nieve koch y la estructura plegable seleccionada.

6. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se realizó la caracterización del fractal copo de nieve Koch identificado a partir de una investigación documental mediante la cual se definen características geométricas y morfológicas tales como el área, las fases y números de iteraciones que componen al fractal. Partiendo de esto, se determinó el área del fractal con base a unos ítems de transportabilidad, manejabilidad y manipulación para la hora de realizar los modelos de estudio, en este caso el área establecida fue de 1752 mm^2 definiendo un modelo de trabajo a escala. El número de fases definido para trabajar en este caso fue hasta la fase 2 (ver Figura 9) la cual corresponde a 2 iteraciones, las iteraciones son el número de veces en que se replica un elemento.

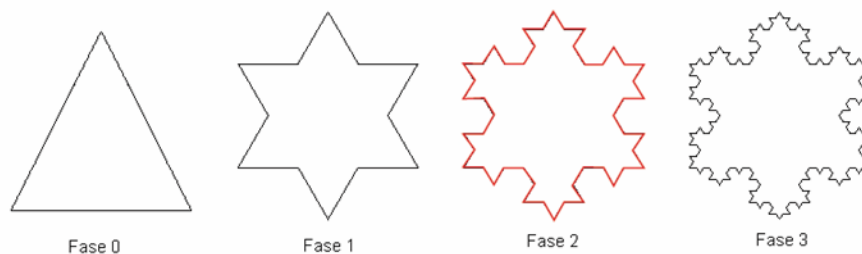


Figura 9. Fases del copo de nieve Koch desde su fase 0 a su fase 3, en rojo fase máxima a trabajar.

Luego de esto, se seleccionaron las tipologías de pliegue de las estructuras plegables donde, de acuerdo con el estudio bibliográfico realizado se observó que el tipo de plegabilidad más apto para desarrollarse es un mecanismo de 1 grado de libertad compuesto por tijeras articuladas y algunos deslizables ya que estos permiten un movimiento uniforme y simultáneo.

Una vez realizados los dos pasos anteriores se procedió con la comparación y relación de la morfología del fractal copo de nieve Koch junto con las características de un mecanismo de tijera, en donde mediante bocetos exploratorios se comenzó a analizar la

morfología y la geometría del copo de nieve Koch con las tipologías y mecanismos de tijeras, esto con el fin de adecuar un mecanismo de tijera que se acople a la morfología del copo de nieve Koch en relación a las articulaciones, grados de ángulos y longitudes que posee la geometría del copo de nieve Koch. Finalmente, se prosiguió al paso de la relación de las maquetas y los modelos experimentales en base a los bocetos exploratorios. En este paso se consideró necesario realizar la identificación y el análisis de las características y propiedades que deben poseer los materiales utilizados para la maquetación, esto considerando aspectos de estabilidad, fricción, rigidez, necesarios para el buen funcionamiento de la estructura plegable del copo de nieve Koch.

Para la elaboración de los modelos se utilizaron materiales como cartulina plana, cartón industrial 2mm, acetato 0.1 mm, MDF de 3 mm de espesor y acero calibre 0.22. En el proceso de elaboración de maquetas se analizaron factores de adecuación de los mecanismos de tijeras la cantidad de iteraciones que poseía el copo de nieve Koch hasta su fase 2 teniendo en cuenta los grados de los ángulos de las articulaciones, los movimientos de pliegue y despliegue.

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Identificación tipologías de pliegue.

Se identificaron estructuras de mecanismos de tijera articulados y no deslizables dada la morfología del copo de nieve koch que posee 48 intersecciones articuladas y que deben presentar movilidad; la morfología del copo de nieve Koch no se da de manera lineal, por el contrario, tiene un centro, y sus interacciones y articulaciones se dan alrededor de éste como se puede ver en la Figura 10.

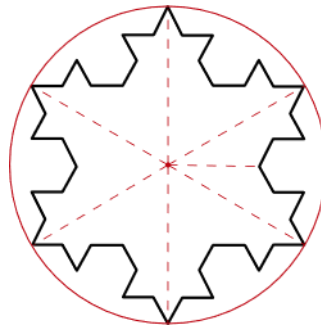


Figura 10. La geometría del fractal copo de nieve Koch se da de manera radial partiendo desde un centro.

La utilización de agrupaciones lineales de tijeras rectas (ver Figura 11) no se adecuaba a la geometría de dicho fractal, debido a que el movimiento se da entre los ejes perpendiculares entre sí, (X y Y) logrando agrupaciones lineales, no radiales como lo exige la morfología del fractal Koch.



Figura 11. Estructura de agrupación lineal de tijeras rectas. (Villate, 2008)

Basados en el libro “Estructuras no convencionales para arquitectura” de Claudia Villate se sacaron unos mecanismos que se adecuaron a esta morfología radial del copo

de nieve Koch, los mecanismos de tijeras rectas excéntricas (Villate, 2008) se forman por dos brazos iguales, cuya articulación se encuentra desplazada en el centro (ver Figura 12), cuando se da la unión de varias estructuras como estas se da lo que se conoce como estructuras de agrupaciones sobre un plano (ver Figura 13) estas se encuentran inscritas en un arco de circunferencia dado por la unión de varias tijeras excéntricas iguales, y estas a medida que se despliegan se acercan más al plano.

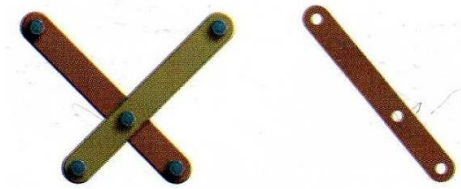


Figura 12. Estructura de tijeras rectas excéntricas

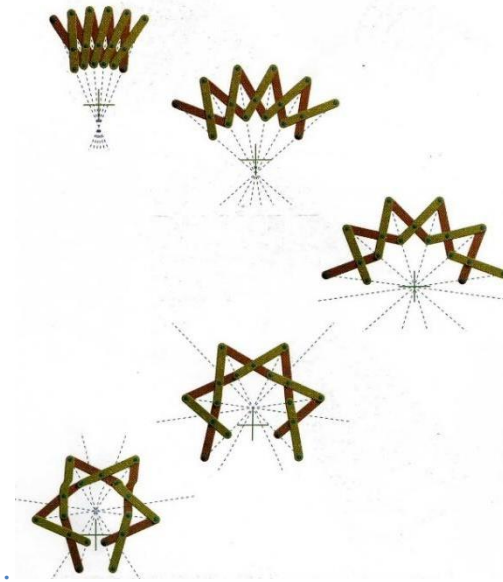


Figura 13. Estructuras de agrupaciones sobre un plano.

Otro tipo de estructuras halladas pertinentes dada la morfología del fractal Koch son las de tijeras anguladas donde sus articulaciones no se encuentran alineadas (ver Figura 14) las tijeras anguladas mantiene el centro permitiendo el movimiento de polígonos, a diferencia de las agrupaciones de tijeras rectas excéntricas que conforman arcos en los cuales el centro va cambiando, por lo que estas tijeras cumplen completamente con el

requerimiento de la morfología del copo de nieve Koch que se observó anteriormente en la Figura 12.

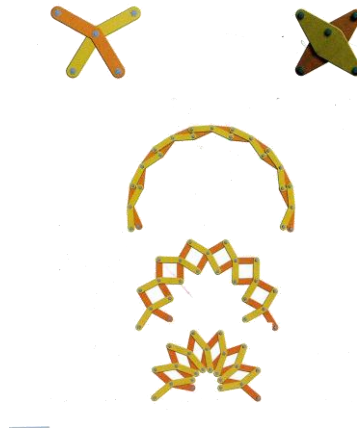


Figura 14. Estructura de tijeras anguladas(Villate, 2012)

7.2 Relación de las tipologías de pliegue con la morfología del fractal copo de nieve Koch.

Luego de tener las tipologías de pliegue se dio paso a la identificación de la relación de estas adecuándolas a la morfología y geometría del copo de nieve Koch, esto se dio mediante bocetos exploratorios (ver Figura 15), en donde se estudiaba la geometría del copo de nieve Koch y encima de estos se estudiaba la geometría de los mecanismos de tijera mostrando así una aproximación de uniones. En este paso pese a la cantidad de dibujos que se realizaron siempre se llegaba a un punto en que era necesario dejar de dibujar y proceder a ensayar por medio de maquetas para lograr entender cómo sería el funcionamiento de ser posible la unión de los mecanismos articulados, para explicar estos dibujos exploratorios se procedió directamente a hablar de la exploración en maquetas.

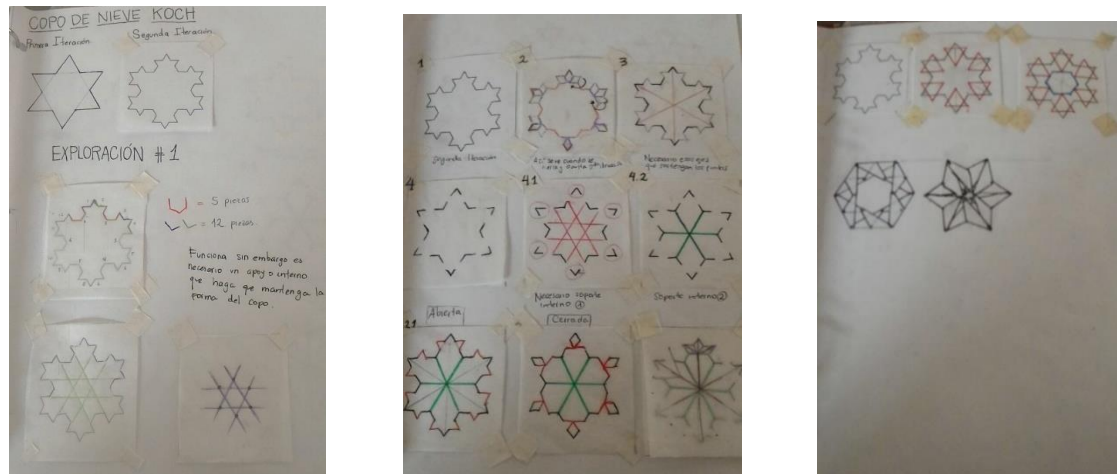


Figura 15. Bocetos exploratorios en donde se dibujaba la morfología del copo de nieve Koch y sobre este dibujo se colocaba un trozo de papel mantequilla para dibujar posibles mecanismos de tijera que se pudieran adecuar a la morfología del fractal.

7.2 Realización de maquetas exploratorias.

Con base en los bocetos exploratorios se comenzó a construir maquetas utilizando diferentes materiales. La primera realizada en papel bond, como se observa en la Figura 16, este modelo se encontraba compuesto por unos mecanismos de tijera angulada donde sus articulaciones no se encuentran alineadas y que además poseían 3 puntos de articulaciones como se evidencia en la Figura 16 (c). Este modelo no mantenía su forma por sí sólo, por el contrario, se le debía dar, esto demostrado en que era necesario la utilización de un material más rígido para la elaboración de las tijeras para que la estructura no fuera endeble y además se pudiera plegar.

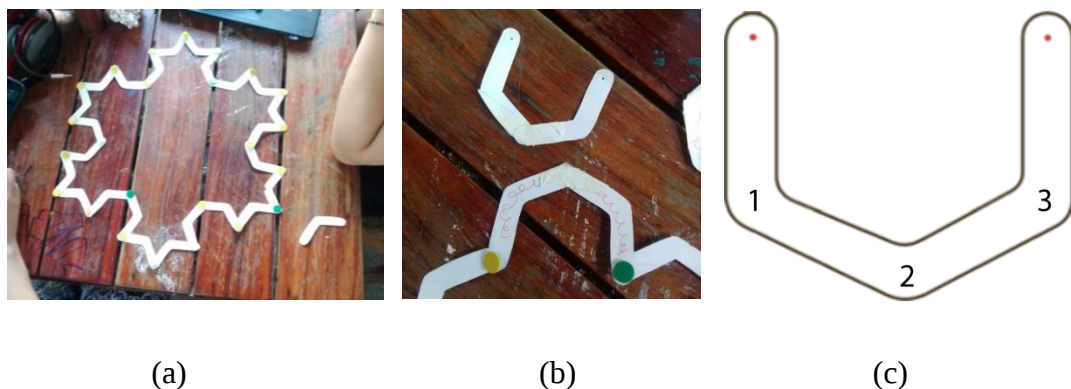


Figura 16. Primer modelo experimental realizado en papel bond. (a) Modelo armado. (b) Acercamiento del mecanismo de tijer angulado que se unía por medio de chinchas. (c) Mecanismo de tijera angulado con 3 puntos de articulación.

Para el segundo modelo de estudio se utilizaron dos tipos de tijeras anguladas, una fue la que se vio anteriormente en la Figura 16 y otro mecanismo hallado desde el boceto exploratorio de tijera angula de sólo una articulación no lineal como se muestra en la Figura 17, este modelo se realizó con cartulina plana, al ser el material más rígido mostró que el mecanismo de tijera no era el adecuado ya que formaba la geometría del copo de nieve koch de manera irregular.

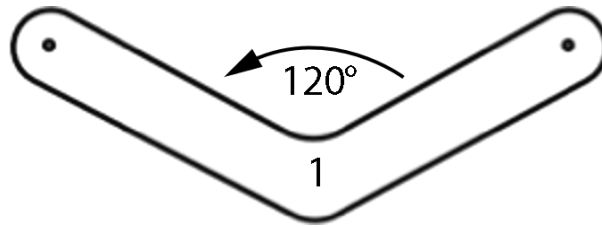
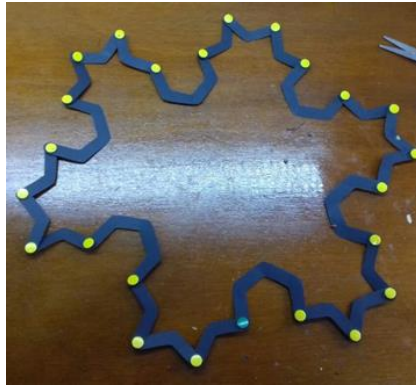


Figura 17. Mecanismo de tijera angulada de 1 articulación desde el centro.

En esta maqueta exploratoria se utilizó cartulina plana siendo esta un material más rígido al anterior, en el momento de unir cada uno de las articulaciones esta maqueta presentó más inestabilidad que la anterior, no por el material, sino por los mecanismos que la componían, como se ve en la Figura 18 la estructura del fractal Koch mostraba una aparente similitud a la morfología del fractal copo de nieve, pero esto se daba de manera forzada puesto que por sí sola tomaba formas irregulares y no se aproximaba a la morfología del copo de nieve Koch. En esta maqueta, aunque ya se permitía mejor movilidad por parte de los mecanismos articulados, no tomó la forma que era requerida, por lo que se optó por cambiar los tipos de mecanismos.



(a)



(b)

Figura 18. Estructura copo de nieve koch en cartulina plana, material más rígido. (a) Estructura abierta y unida por chinchas. (Estructura cerrada, muestra una forma irregular.

Para la siguiente maqueta de exploración se tomaron los siguientes mecanismos articulados, uno fue dejar el mecanismo de tijera que resultó para la maqueta anterior (ver Figura 18) y resultó un nuevo mecanismo de tijera en la que la articulación tomaba un ángulo más agudo (ver Figura 19)

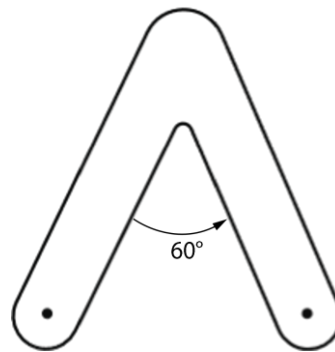


Figura 19. Mecanismo de tijera angulada de ángulo agudo.

Esta maqueta de exploración se elaboró nuevamente en cartulina plana para volver a valorar el material (ver Figura 20); en esta, se pudo encontrar que el nuevo mecanismo le dio un poco más de estabilidad a la estructura del copo de nieve Koch formando ya una figura no irregular, sin embargo fue necesario la colocación de una estructura que le diera estabilidad al fractal Koch desde su interior y su centro, ver Figura 20 (c).

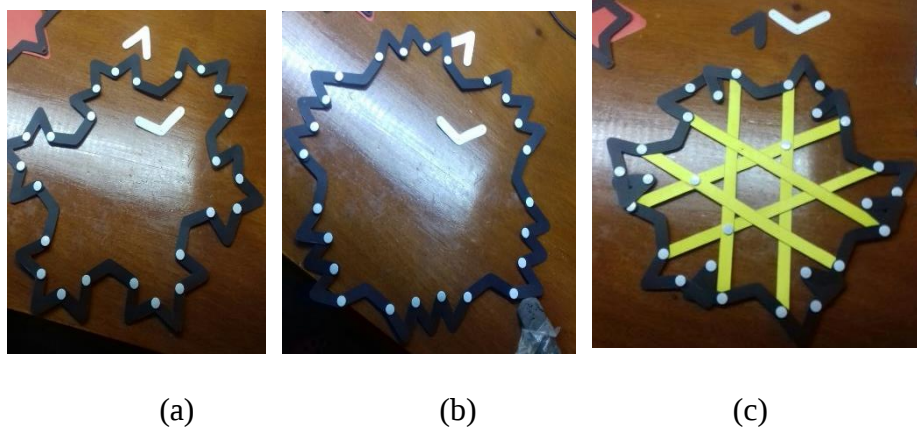


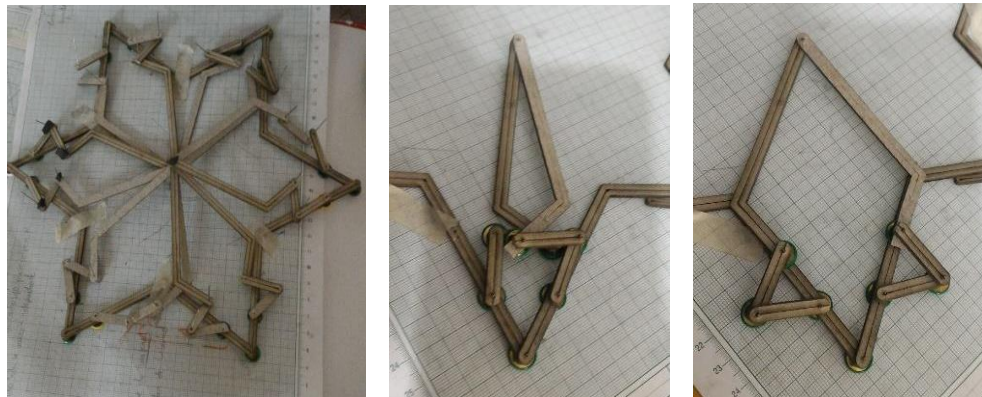
Figura 20. Maqueta de exploración con mecanismo de tijera angulada de ángulos cerrados, (a) se muestra estructura cerrada. (b) Se muestra la estructura abierta. (c) Estructura en el interior dando soporte, en cartulina plana de color amarillo.

Para esta maqueta, la morfología del copo de nieve Koch ya se mantenía por sí sola, es decir en su estado natural mostraba la aparente morfología del copo de nieve Koch, sin embargo no era posible ser plegada pues los mecanismos en su interior impedían generar movimiento.

Debido a las constantes formas irregulares que se daban, se identificó que era necesario la realización de una estructura base que le diera soporte al modelo para mantener así la morfología del copo de nieve Koch y que este fuera regular, y que además permitiera plegar la figura, por lo que a partir de este momento se comenzó a trabajar con la fase 1 del copo de nieve Koch (ver Metodología).

En el siguiente modelo elaborado se trazó un croquis en una hoja milimetrada con la morfología del copo de nieve Koch en su fase 1. Lo que se buscó con esto es que por medio de mecanismos de tijera se plegara y desplegara mostrando la fase 2 (ver Figura 21 (a)), para esto se elaboraron unos mecanismos de tijera rectos en un material más rígido (cartón industrial 3mm) que fue cortado a láser (ver Figura 21 b y c), los cuales partían desde el centro de la figura hasta generar la fase 2. En este modelo se identificó que estas

tijeras al salir cada una del centro se convertían en mecanismos independientes, es decir es necesario mover tijera por tijera para generar el pliegue, y este no era el objetivo, por lo que se vio necesario realizar un mecanismo que se uniera desde el centro permitiendo accionar de manera simultánea los mecanismos de tijera para generar la fase 2 (Figura 21(c)).



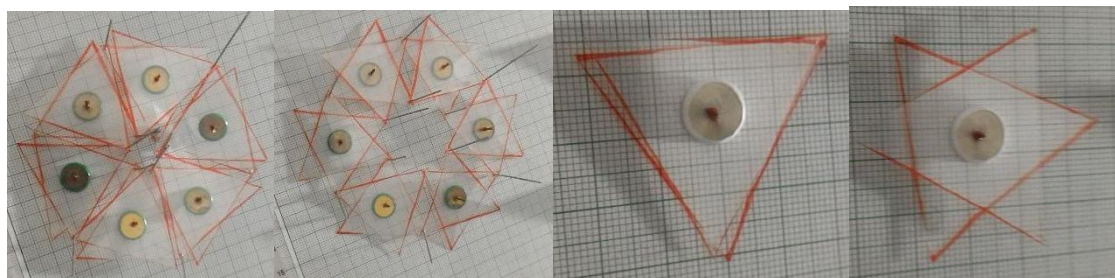
(a)

(b)

(c)

Figura 21. (Modelo experimental con una base soporte con la morfología del copo de nieve Koch en su fase 1. (b) Mecanismo de tijera articulado cerrado. (c) Mecanismo de tijera articulado abierto.

Para la realización de este mecanismo nuevo, se tomó como referencia un mecanismo de diafragmas angulado (Villate, 2008), basándose en esto se realizó un mecanismo de diafragmas que consta de 12 triángulos equiláteros como se puede ver en la Figura 22, unidos de a dos desde el centro por un chinchete (ver Figura 22 (c) y (b)).



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 22. Mecanismo de diafragma angulado. (a) Diafragma cerrado. (b) Diafragma abierto. (c) Dos triángulos equiláteros unidos por el centro (d) Movimiento de los triángulos.

Posteriormente se cambió a un material más rígido (MDF 3mm) para realizar los mecanismos de diafragmas y las nuevas tijeras que se unirían a este.

Para anexar los mecanismos de diafragmas en el centro de la base del copo de nieve Koch se le realizaron unos agujeros de manera radial como se puede ver en la Figura 23(a) y en estos se ubicaba el mecanismos de diafragma, ver Figura 23(b) y (c) el movimiento de este mecanismo se daba de manera deslizable sobre los agujeros anteriormente hechos. Una vez puesto, se diseñaron sobre él, de manera digital los nuevos mecanismos de tijeras (ver Figura 23 (d) y (e)) los cuales se ubicaron de manera radial sobre los mecanismos de diafragmas. Estos pasaron a ser dos mecanismos de tijeras, uno angulado con 3 puntos de articulación como se ve en la Figura 24(a) y a este se le anexaba un mecanismo recto por medio de chinchas como se ve en la Figura 24 (b).

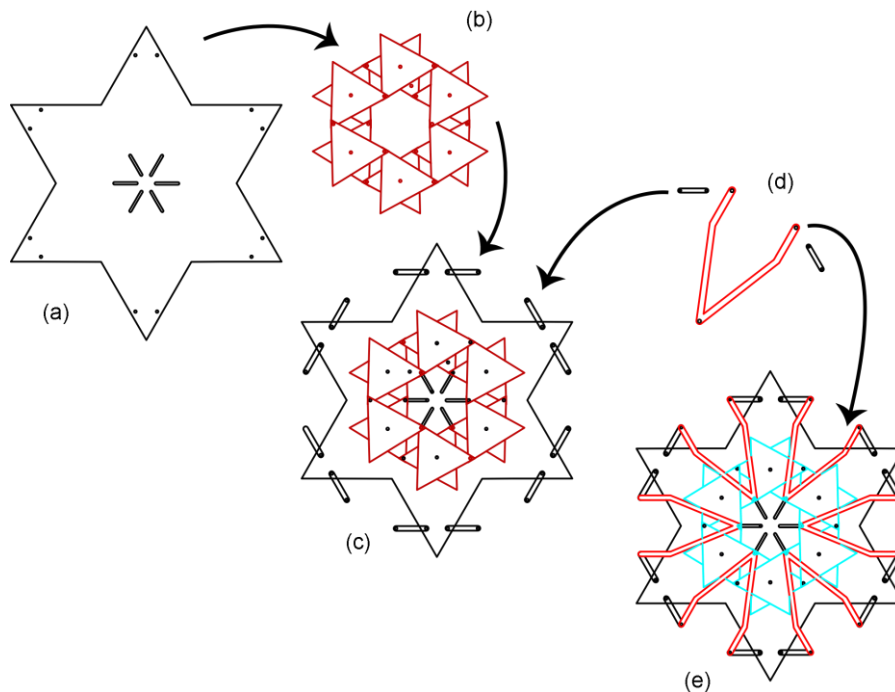


Figura 23. Resultado y ensamblaje de modelo experimental con mecanismos dependientes. (a) Muestra la estructura base con la morfología del copo de nieve hasta su fase 1, posee de a dos orificios en cada una de sus puntas y en la parte del centro 6 orificios alargados ubicados de manera radial, (b) mecanismo de diafragmas angulados. (c) Ubicación del mecanismo de diafragmas angulados en el centro de la estructura ensamblado sobre los orificios ubicados de manera

radial, adicional se muestra el ensamble de mecanismos rectos en las puntas de la estructura. (d) Mecanismos de tijeras articulados que generarán la morfología del copo de nieve hasta su fase 2. (e) Ubicación de las tijeras de la fase 2 sobre el mecanismo de diafragma angulado del centro.

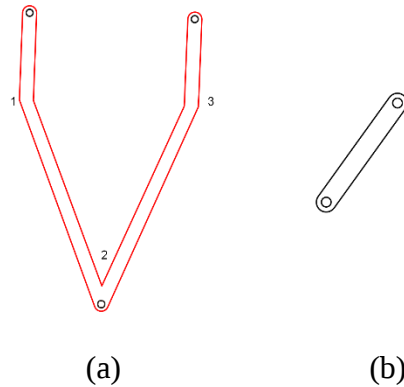


Figura 24. Mecanismos de tijeras que generarían la fase 2 del copo de nieve Koch. (a) Mecanismo de tijera angulado con tres puntos de articulaciones y (b) mecanismo de tijera recto.

Se realizaron los planos en un software con el prototipo anterior, se mandó a cortar a laser en MDF de 3 mm como se puede ver en la Figura 25 (a) y (b) y se ensambló, se encontró que el material presentaba resistencia a la hora de realizar el movimiento de pliegue esto dado por el calibre del material y su propiedad de fricción cuando las piezas se movían una sobre otras, sin embargo, el modelo desplegaba muy bien la morfología de la fase 2 del copo de nieve Koch.

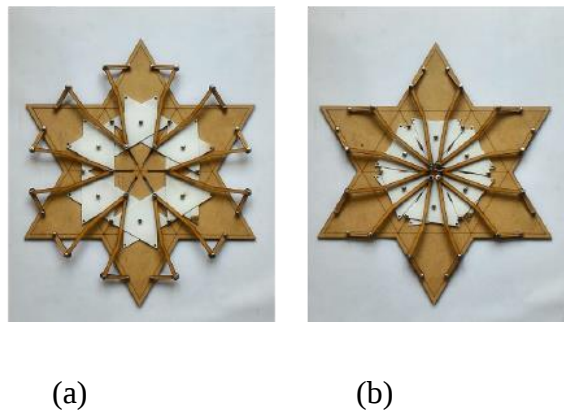


Figura 25. Modelo experimental realizado en MDF 3mm. (a) Modelo con ángulos de tijeras abierto. (b) Modelo en MDF 3mm con ángulos de tijeras cerrado.

Al concluir el modelo experimental realizado en MFD, se encontró que los diafragmas al cerrarse y al abrirse creaban el fractal de la fase 0 a la fase 1, este modelo muestra tres fases del fractal copo de nieve Koch.

8. CONCLUSIONES

Durante el transcurso de la realización de esta investigación se puede concluir que fue un punto determinante el definir que se trabajaría sólo hasta la fase 2 del copo de nieve Koch, pero para generar ésta fue indispensable tener claro la morfología del fractal en su fase 1 y considerar la estructura base que daría soporte a toda la estructura en general y de donde se irían ensamblar todos los mecanismos que la componen.

Para la realización de todo el proyecto se tuvo que tener en cuenta la relación de tercios con el que se construye este fractal para que no hubiera desfases en el movimiento de la estructura, ni en la creación de la fase número 2.

Fue indispensable hallar un mecanismo de diafragmas, compuesto por 12 triángulos equiláteros que desde el centro de la estructura plegable pudiera generar movimiento y que a este se encontraran unidos los mecanismos articulados que generaban la fase 2 del fractal copo de nieve Koch, ya que esta unión a este mecanismo central obligaba a los mecanismos articulados a ser dependientes de todo el sistema, generando así movimientos simultáneos.

Fue primordial diseñar una tijera angulada con 3 puntos de articulación que cumpliera con los requisitos que se necesitaban para que el movimiento del mecanismo fuera uniforme y este unirlo a un mecanismo recto.

La longitud de los mecanismos articulados que generaban la fase 2 del fractal copo de nieve Koch deben ser de manera precisa y exacta, para que al momento de la figura generar el movimiento de plegado para cerrar la estructura y convertirla a la fase 1 del copo de nieve Koch, estos vértices de los mecanismos articulados encajaran perfectamente sin generar un desfase.

El material es un factor determinante en la elaboración y funcionamiento de la estructura plegable del fractal copo de nieve Koch ya que esto debía responder a unas propiedades de rigidez y poseer un grosor mínimo que permitiera el movimiento sin interrupciones de la estructura plegable.

9. REFERENCIAS

- Chanona , J., Alamilla, L., & Gutierrez, G. F. (s.f.). *Caos y geometría de fractales, herramientas auxiliares para evaluar la complejidad del entorno biológico*. Obtenido de http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2000_3/caos%20y%20geometria.pdf
- Fuenzalida, C. (s.f.). *Soporte de lo transitorio ModulEasy: Estructura plegable*. Obtenido de <http://www.revistaidea.usach.cl/ojs/index.php/arteficio/article/viewFile/901/853>
- Guzmán, C. C. (Diciembre de 2013). *Prototipo de diseño de una estructura retráctil tensada*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4722734>
- Guzmán, C. C. (2013). *Revista de arquitectura vol.15*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4722734>
- Mandelbrot, B. &. (2006). *Fractales y finanzas*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Mandelbrot, B. B. (s.f.). *Fractals and the geometry of nature*. Obtenido de http://users.math.yale.edu/~bbm3/web_pdfs/encyclopediaBritannica.pdf
- Miranda, R. R. (1995). *La teoría de fractales: Aplicación experimental e implicaciones en la metodología de la ciencia*. Cd.Universitaria. .
- Overvelde, J. T. (11 de Marzo de 2016). *A three-dimensional actuated origami-inspired transformable metamaterial with multiple degrees of freedom*. Obtenido de <http://www.nature.com/articles/ncomms10929>
- Pedrosa, T. (s.f.). *Beautiful People Live Art*. Obtenido de <http://beautifulpeopleliveart.com/jewellery-designer-philip-sajet/>

Pellegrino, F. J. (s.f.). *Investigación de Techos plegables*. Obtenido de <http://www-civ.eng.cam.ac.uk/dsl/roof/planar/planar.html>

Villate, M. C. (2008). *Estructuras no convencionales en arquitectura*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Artes.

Barnsley, M. F., and M. F. Barnsley. *The Desktop Fractal Design System*. Academic Press, 1990.

Morales Guzmán, C. C. (2013). *Prototipo de diseño de una cubierta retráctil tensada*. [*Prototype of a tensioned retractable roof design*]. *Revista de Arquitectura*, 15, 102-110.

Desarrollo bidimensional de un fractal dinámico a partir de tipologías de pliegue de tijera utilizando como modelo el fractal copo de nieve Koch

Maria Andrea Ruiz B, Aura Cristina López J, Pablo Mejía S*
Facultad de Diseño Industrial, UPB. Medellín, Colombia

[*mariaa.ruiz@upb.edu.co](mailto:mariaa.ruiz@upb.edu.co)

Resumen

En la siguiente investigación se desarrolló una estructura dinámica bidimensional a partir de la morfología que posee el fractal copo de nieve Koch. Para esto se realizó una investigación documental acerca de las estructuras dinámicas, enfocándose en las estructuras plegables de mecanismos de tijeras. Paralelamente se investigó acerca de los fractales, centrándose en las características y propiedades del copo de nieve Koch, se tuvieron que establecer varios parámetros para que el sistema funcionara adecuadamente, uno de ellos fue la determinación de las caracterizaciones geométricas del fractal, cuánto iba a medir y hasta qué punto podía crecer. Para esta caracterización se realizaron diferentes modelos de estudio con los que se clasificó y validó el mecanismo propuesto por la investigación con el propósito de ampliar el campo de información en el ámbito científico, acerca de dos temáticas que no se habían relacionado anteriormente. Se encontró que es indispensable que el mecanismo de diafragmas angulados estuviera en el centro conectado a los demás sistemas de tijera y así permitir un movimiento uniforme en todo el sistema.

Abstract

In the following investigation a two-dimensional dynamic structure was developed based on the morphology of Koch snowflake fractal. For this, a documentary research about the dynamic structures was carried out, focusing on the folding structures of scissors mechanisms. In parallel we investigate about fractals, focusing on the characteristics and properties of Koch snowflake, several parameters had to be established for the system to work properly, one of them was the determination of the fractal's geometric characterizations, how much it was going to be measured and how much it would grow. For this characterization, different study models were used to classify and validate the mechanism proposed by the research with the purpose of expanding the information in the scientific field. On two topics that had not been previously related, it was found that it is essential that the mechanism of angled diaphragms be in the center connected to the other scissor systems and thus allow a uniform movement throughout the system.

Palabras Clave: Estructuras dinámicas - Fractal - Copo de nieve Koch - Tipologías de pliegue.

1 INTRODUCCIÓN

Esta investigación partió de un proyecto visto con anterioridad acerca de las estructuras dinámicas, lo cual abrió paso a una investigación a profundidad sobre las estructuras dinámicas bidimensionales y las tipologías de pliegue arrojando que éstas se encuentran bajo unos parámetros de forma, de mecanismos de tijeras articulados y grados de movimiento.

Por otro lado, los fractales poseen características geométricas cuya estructura básica se repite a diferentes escalas, creando así una alusión de movimiento que puede ser infinito. El fractal copo de nieve Koch descubierto y descrito por el matemático sueco Niels Fabian Helge von Koch en 1904 tiene unas características geométricas y morfológicas muy particulares, pues este posee un área finita pero su perímetro se puede expandir infinitamente dependiendo de las iteraciones que se despliegan, pero su área se mantiene constante y que se explicará más a fondo a lo largo de este artículo. Este fractal ha sido poco explorado por el Diseño Industrial, lo que hace que no haya mucha información para desarrollar objetos que utilicen estos principios, para esto se tendrían que introducir unos objetos dinámicos; por lo que en este trabajo se buscó desarrollar una estructura dinámica bidimensional a partir de la morfología que posee el fractal copo de nieve Koch.

El objetivo de este trabajo es estudiar las propiedades geométricas y morfológicas del fractal, logrando así comprender en su totalidad este fractal, también se estudió a fondo las estructuras dinámicas y sus características, movimiento de tijera, diafragmas y grados de libertad, con esto se pudo generar un nuevo tipo de tijeras que ayudaron a encontrar la estructura más idónea para generar el fractal dinámico para lo cual se realizaron diferentes modelos de estudio con los que se estudia, clasifica y valida el mecanismo propuesto por la investigación.

2 METODOLOGÍA

2.1 Caracterización del copo de nieve Koch

Se realizó la caracterización del fractal copo de nieve Koch mediante una investigación documental en la cual se definieron características geométricas y morfológicas, tales como área, fases y número de iteraciones que componen al fractal. Se determinó el área del fractal con base en criterios de transportabilidad, manejabilidad y manipulación a la hora de realizar los modelos de estudio. El área establecida fue de 1752 mm² para el modelo de trabajo a escala. Se decidió trabajar hasta la fase 2 (ver Figura 1), la cual corresponde a 2 iteraciones, siendo las iteraciones el número de veces en que se replica un elemento.

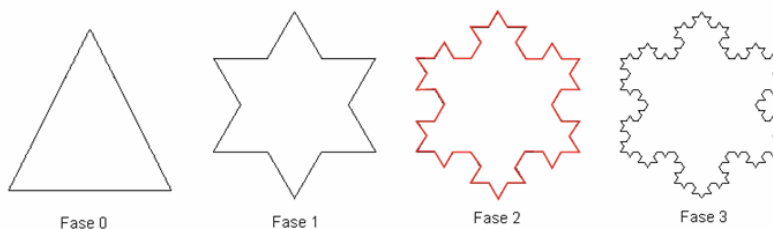


Figura 1. Fases del copo de nieve Koch, en color rojo Fase 2 hasta la cual se va a trabajar.

2.2 Tipologías de pliegue

Se seleccionaron las tipologías de pliegue de las estructuras plegables de acuerdo con el estudio bibliográfico realizado y se observó que el tipo de plegabilidad más idóneo para la elaboración de un modelo móvil era un mecanismo de tijeras articuladas y algunos deslizables con un grado de movimiento. Posteriormente se procedió con la comparación y relación de la morfología del fractal copo de nieve Koch junto con las características de un mecanismo de tijera, utilizando bocetos exploratorios para intentar adecuar un mecanismo de tijeras que se acople a la geometría del copo de nieve Koch en lo relativo a articulaciones, grados de movimiento y proporciones de la estructura.

2.3 Construcción de modelos

Se construyeron modelos experimentales con base a los bocetos exploratorios. En este paso se consideró necesario realizar la identificación y el análisis de las características y propiedades que deben poseer los materiales utilizados para la construcción del modelo, considerando aspectos de estabilidad, fricción y rigidez.

2.4 Materiales

Para la elaboración de los modelos se utilizó cartulina plana (boceto exploratorio), cartón industrial 2mm, acetato 0.1 mm, MDF de 3 mm de espesor y acero calibre 0.22 (fase #). En el proceso de elaboración de maquetas se analizaron factores de adecuación de los mecanismos de tijeras la cantidad de iteraciones que poseía el copo de nieve Koch hasta su fase 2 teniendo en cuenta los grados de los ángulos de las articulaciones, los movimientos de pliegue y despliegue de la fase 1 a la fase 2.

2.5 Software

Para la realización de planos se utilizó el software Rhinoceros versión 5.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelo 1

En la Figura 2 se observan los primeros modelos, en los cuales se partió de la fase 2 del copo de nieve Koch. Este primer modelo se encontraba compuesto por 18 mecanismos articulados de tijeras anguladas, donde 6 de estos mecanismos correspondían a tijeras anguladas de tres articulaciones (ver Figura 2 (c)) y 12 mecanismos de tijera angulada con sólo una articulación (ver Figura 2 (d)), estos mecanismos se unieron por medio de chinchas. Se encontró que el material no fue óptimo en cuanto a la rigidez y que además el mecanismo de tres articulaciones no permitió el movimiento del modelo por lo que este no se plegaba, sino que generaba una figura muy irregular (ver Figura 2 (b)).

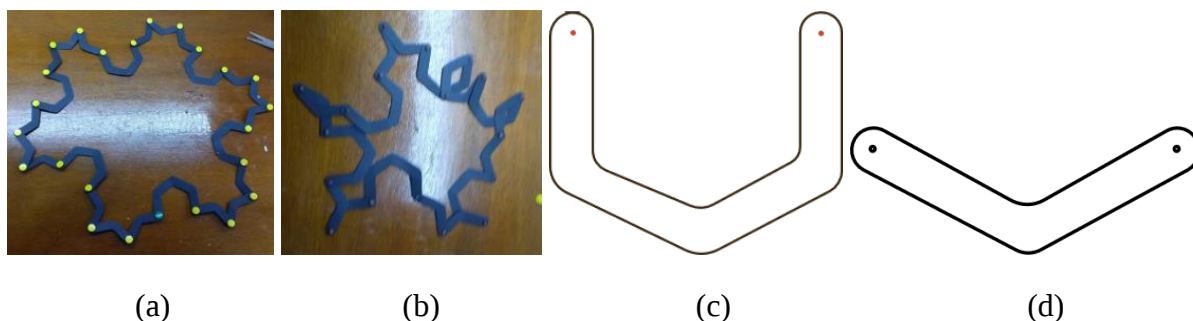


Figura 2. Modelo experimental con dos tipos de mecanismo de tijeras angulados. (a) Modelo experimental en cartulina plana abierto. (b) Modelo cerrado muestra una forma irregular. (c) Mecanismo aguado de tres articulaciones. (d) Mecanismo angulado de una articulación.

3.2 Modelo 2

En el siguiente modelo, basado en la experimentación anterior (ver Figura 3 (a)), se optó por eliminar el mecanismo de tres articulaciones y cambiarlo por el mecanismo de una articulación, elaborándose un mecanismo de tijera angulado de sólo una articulación pero con un ángulo era mucho más prominente (ver Figura 3 (c)). Se encontró que, aunque permitía más movilidad, la morfología del copo de nieve Koch era muy irregular y la estructura no se plegaba ni mantenía su forma (ver Figura 3 (b)).

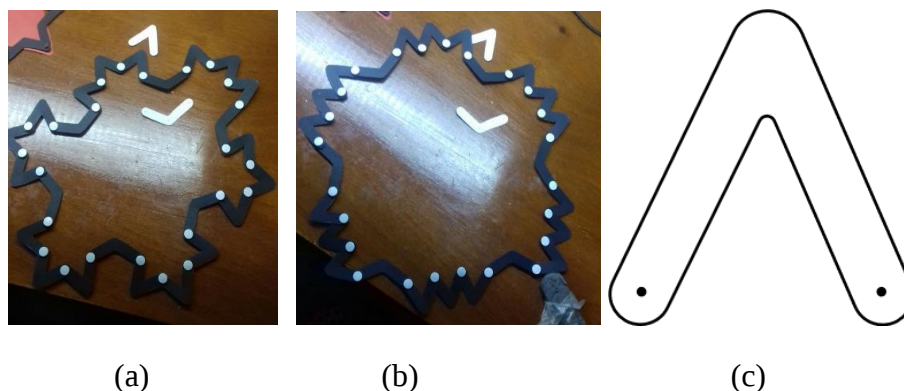


Figura 3. (a) Modelo experimental en cartulina plana. (b) Modelo experimental abierto. (c) Mecanismo de tijera de ángulo más prominente.

3.3 Modelo 3

Debido a las constantes formas irregulares que se presentaron, se identificó que era necesario la realización de una estructura base que le diera soporte al modelo para mantener así la morfología del copo de nieve Koch y que este fuera regular, por lo que a partir de este momento se comenzó a trabajar con la fase 1 del copo de nieve.

En el siguiente modelo elaborado se trazó un croquis en una hoja milimetrada con la morfología del copo de nieve Koch en su fase 1. Lo que se buscó con esto es que por medio de mecanismos de tijera se plegara y desplegara mostrando la fase 2 (ver Figura 4 (a)), para lo cual se elaboraron unos mecanismos de tijera rectos en un material más rígido (cartón industrial 3 mm) que fue

cortado a láser (ver Figura 4 b y c), los cuales partían desde el centro de la figura hasta generar la fase 2. En este modelo se identificó que estas tijeras al salir cada una del centro se convertían en mecanismos independientes, es decir es necesario mover tijera por tijera para generar el pliegue, y este no era el objetivo, por lo que se vio necesario realizar un mecanismo que se uniera desde el centro, permitiendo accionar de manera simultánea los mecanismos de tijera para generar la fase 2 (Figura 4 (c)).

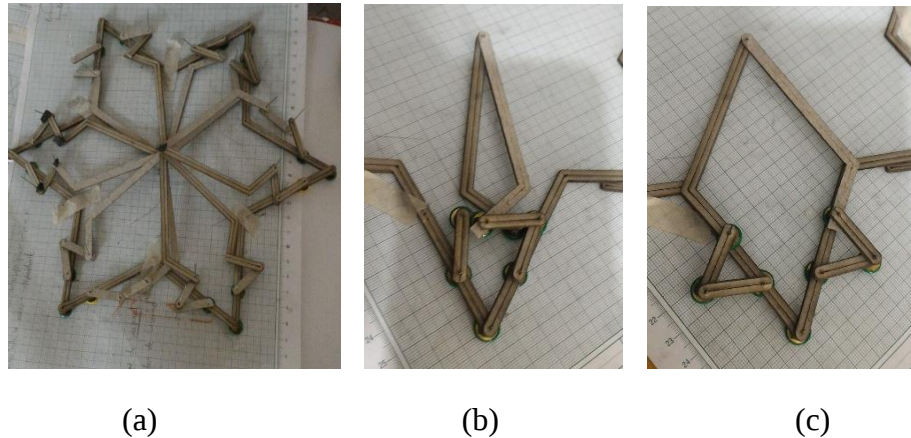


Figura 4. (Modelo experimental con una base soporte con la morfología del copo de nieve Koch en su fase 1. (b) Mecanismo de tijera articulado cerrado. (c) Mecanismo de tijera articulado abierto.

3.4 Modelo 4

Para la realización de este mecanismo nuevo se tomó como referencia un mecanismo de diafragmas angulado (Villate, 2008) y se elaboró un mecanismo de diafragmas que consta de 12 triángulos equiláteros, como se puede ver en la Figura 5, unidos de a dos desde el centro por un chinche (ver Figura 5 (c) y (b)).

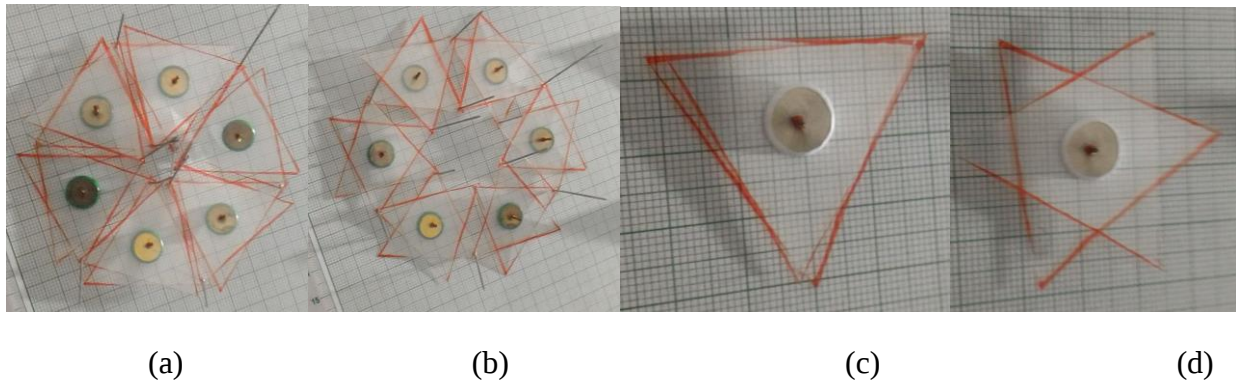


Figura 5. Mecanismo de diafragma angulado. (a) Diafragma cerrado. (b) Diafragma abierto. (c) Dos triángulos equiláteros unidos por el centro (d) Movimiento de los triángulos.

3.5 Modelo 5

Posteriormente se cambió a un material más rígido (MDF 3mm) para realizar los mecanismos de diafragmas y las nuevas tijeras que se unirían a este.

Para anexar los mecanismos de diafragmas en el centro de la base del copo de nieve Koch se le realizaron unos agujeros de manera radial como se puede ver en la Figura 6 (a) y en estos se ubicaba el mecanismos de diafragma (ver Figura 6 (b) y (c) el movimiento de este mecanismo se daba de manera deslizable sobre los agujeros anterior mente hechos. Una vez puesto, se diseñaron sobre él de manera digital los nuevos mecanismos de tijeras (ver Figura 6 (d) y (e)) los cuales se ubicaron de manera radial sobre los mecanismos de diafragmas. Estos pasaron a ser dos mecanismos de tijeras, uno angulado con 3 puntos de articulación como se ve en la Figura 7 (a) y a este se le anexaba un mecanismo recto por medio de chinchas.

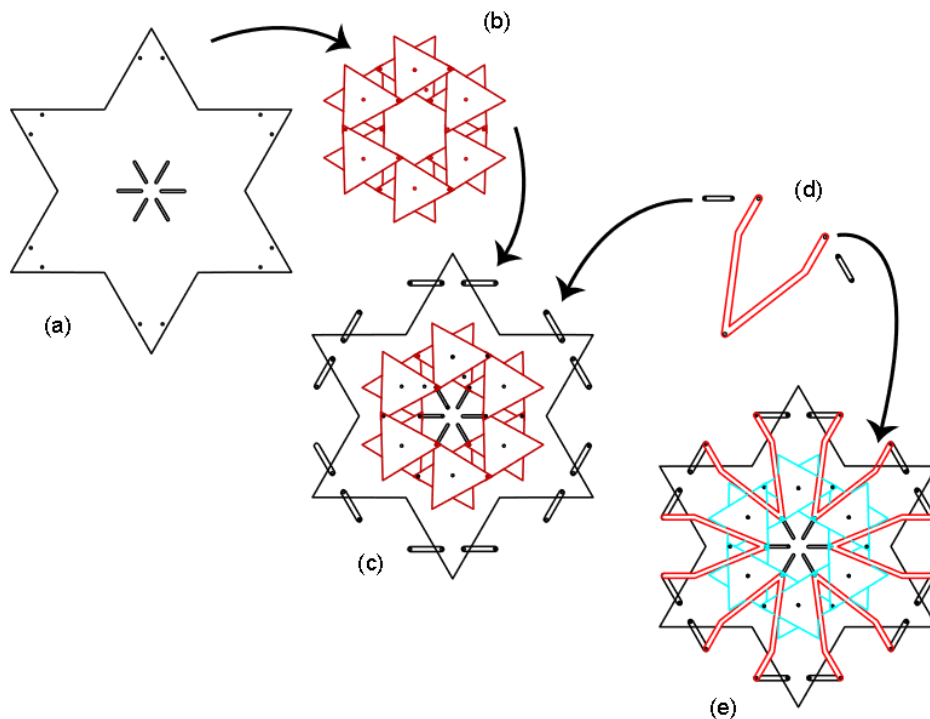


Figura 6. Resultado y ensamble de modelo experimental con mecanismo dependientes. (a) Muestra la estructura base con la morfología del copo de nieve hasta su fase 1, posee de a dos orificios en cada una de sus puntas y en la parte del centro 6 orificios alargados ubicados de manera radial, (b) mecanismo de diafragmas angulados. (c) Ubicación del mecanismo de diafragmas angulados en el centro de la estructura ensamblado sobre los orificios ubicados de manera radial, adicional se muestra el ensamble de mecanismos rectos en las puntas de la estructura. (d) Mecanismos de tijeras articulados que generarán la morfología del copo de nieve hasta su fase 2. (e) Ubicación de las tijeras de la fase 2 sobre el mecanismo de diafragma angulado del centro.

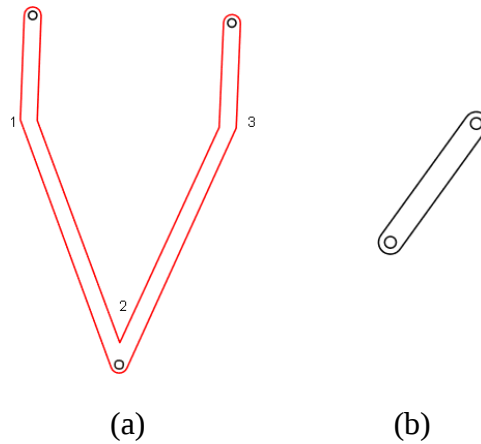


Figura 7. Mecanismos de tijeras que generarían la fase 2 del copo de nieve Koch. (a) Mecanismo de tijera angulado con tres puntos de articulaciones y (b) mecanismo de tijera recto.

Se realizaron los planos en un software con el prototipo anterior, se mandó a cortar a laser en MDF de 3 mm como se puede ver en la Figura 8 (a) y (b) y se ensambló, se encontró que el material presentaba resistencia a la hora de realizar el movimiento de pliegue esto dado por el calibre del material y su propiedad de fricción cuando las piezas se movían una sobre otras, sin embargo, el modelo desplegaba muy bien la morfología de la fase 2 del copo de nieve Koch.

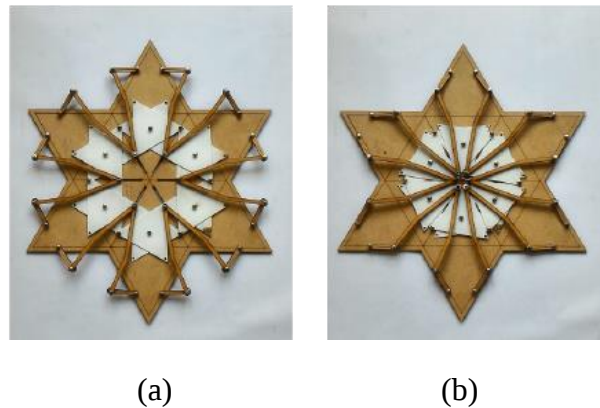


Figura 8. Modelo experimental realizado en MDF 3mm. (a) Modelo con ángulos de tijeras abierto. (b) Modelo en MDF 3mm con ángulos de tijeras cerrado.

4 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores Alejandro Zuleta y Diana Urdinola por el acompañamiento en este proyecto de investigación.

5 CONCLUSIONES

- Durante el transcurso de la realización de esta investigación se puede concluir que fue un punto determinante el definir que se trabajaría sólo hasta la fase 2 del copo de nieve Koch, pero para generar ésta fue indispensable tener claro la morfología del fractal en su fase 1 y considerar la estructura base que daría soporte a toda la estructura en general y de donde se irían ensamblar todos los mecanismos que la componen.
- Fue indispensable hallar un mecanismo que desde el centro de la estructura plegable pudiera generar movimiento y que a este se encontraran unidos los mecanismos articulados que generaban la fase 2 del fractal copo de nieve Koch, ya que esta unión a este mecanismo central obligaba a los mecanismos articulados a ser dependientes de todo el sistema, generando así movimientos simultáneos.
- La longitud de los mecanismos articulados que generaban la fase 2 del fractal copo de nieve Koch deben ser de manera precisa y exacta, para que al momento de la figura generar el movimiento de plegado para cerrar la estructura y convertirla a la fase 1 del copo de nieve Koch, estos vértices de los mecanismos articulados encajaran perfectamente sin generar un desfase.
- El material es un factor determinante en la elaboración y funcionamiento de la estructura plegable del fractal copo de nieve Koch ya que esto debía responder a unas propiedades de rigidez y poseer un grosor mínimo que permitiera el movimiento sin interrupciones de la estructura plegable.

6 Referencias

- Chanona , J., Alamilla, L., & Gutierrez, G. F. (s.f.). *Caos y geometría de fractales, herramientas auxiliares para evaluar la complejidad del entorno biológico*. Obtenido de http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2000_3/caos%20y%20geometria.pdf
- Fuenzalida, C. (s.f.). *Soporte de lo transitorio ModulEasy: Estructura plegable*. Obtenido de <http://www.revistaidea.usach.cl/ojs/index.php/arteficio/article/viewFile/901/853>
- Guzmán, C. C. (Diciembre de 2013). *Prototipo de diseño de una estructura retráctil tensada*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4722734>
- Guzmán, C. C. (2013). *Revista de arquitectura vol.15*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4722734>
- Mandelbrot, B. &. (2006). *Fractales y finanzas*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Mandelbrot, B. B. (s.f.). *Fractals and the geometry of nature*. Obtenido de http://users.math.yale.edu/~bbm3/web_pdfs/encyclopediaBritannica.pdf

Miranda, R. R. (1995). *La teoría de fractales: Aplicación experimental e implicaciones en la metodología de la ciencia*. Cd.Universitaria. .

Overvelde, J. T. (11 de Marzo de 2016). *A three-dimensional actuated origami-inspired transformable metamaterial with multiple degrees of freedom*. Obtenido de <http://www.nature.com/articles/ncomms10929>

Pellegrino, F. J. (s.f.). *Investigación de Techos plegables*. Obtenido de <http://www-civ.eng.cam.ac.uk/dsl/roof/planar/planar.html>

Spinadel, V. M. (s.f.). *Fractales*. Obtenido de <http://www2.caminos.upm.es/Departamentos/matematicas/Fdistancia/MAIC/CONGRESOS/SEGUNDO/008%20Fractales.pdf>

T.B. Overvelde, J., C. Weaver, J., Hoberman, C., & Bertoldi, K. (18 de Junio de 2017). *Rational design of reconfigurable prismatic architected materials*. Obtenido de Paulson School of Engineering and Applied Sciences: <http://www.nature.com/nature/journal/v541/n7637/full/nature20824.html>

UNAL. (2003). *Docentes UNAL*. Obtenido de <http://www.docentes.unal.edu.co/cibermudezs/docs/CursoGeometriaFractal.pdf>

Villate, M. C. (2008). *Estructuras no convencionales en arquitectura*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Artes.