

**CERRAMIENTOS PARA ESTRUCTURAS DINÁMICAS TIPO TIJERA:
PROPUESTA DE UN SISTEMA DE CERRAMIENTO QUE RESPONDE A MÓDULOS QUE CAMBIAN DE
FORMA.**

Oscar Antonio Mariño Granada



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Arquitectura, Facultad de Arquitectura

Universidad la Gran Colombia

Bogotá

2023

Cerramientos para estructuras dinámicas tipo tijera:

Propuesta de un sistema de cerramiento que responde a módulos que cambian de forma.

Oscar Antonio Mariño Granada

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Arquitecto

Director Arq. Mg. Manuel Fernando Martínez Forero



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Arquitectura, Facultad de Arquitectura

Universidad la Gran Colombia

Bogotá

2023

Dedicatoria

Dedico la realización de este trabajo a mi familia, mi madre Luz Edilma quien siempre me ha brindado su apoyo incondicional, mi padre Jesús Antonio quien siempre fue un ejemplo e inspiración. Finalmente, a Andrea Rincón y mis amigos quienes siempre me motivaron a seguir adelante y cumplir mis sueños.

Agradecimientos

Agradezco al Arq. Mg. Manuel Fernando Martínez por su guía y apoyo para la realización de este trabajo; también a los profesores de la Universidad la Gran Colombia por sus enseñanzas y motivación, así como mis compañeros con los que aprendí y nos apoyamos en nuestro progreso académico.

Agradezco especialmente a la Arq. María Claudia Villate por introducirme al tema de las estructuras no convencionales en arquitectura, lo cual fue la base para la realización de este proyecto.

Tabla de contenido

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS.....	17
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
<i>Dificultad y Falta de Desarrollo de Cerramientos, Mecanismos de Fijación, Unión y Motricidad</i>	<i>18</i>
<i>Falta de Coordinación Arquitectónica</i>	<i>19</i>
<i>Escala.....</i>	<i>20</i>
ÁRBOL DE PROBLEMAS	21
PREGUNTA PROBLEMA	22
JUSTIFICACIÓN	22
HIPÓTESIS.....	25
OBJETIVOS	26
OBJETIVO GENERAL	26
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
METODOLOGÍA.....	27
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	29
ESTRUCTURAS NO CONVENCIONALES	29
<i>Laminares</i>	<i>29</i>
<i>Barras</i>	<i>30</i>
<i>Tracción</i>	<i>31</i>
<i>Arboriformes.....</i>	<i>32</i>
<i>Recíprocas.....</i>	<i>33</i>
<i>Dinámicas</i>	<i>34</i>

ESTRUCTURAS DINÁMICAS	34
<i>Deslizable</i>	35
<i>Plegadura</i>	35
<i>Recíproca</i>	36
<i>Arboriforme</i>	37
<i>Tenségrity Desplegable</i>	38
<i>Tijera</i>	39
ESTRUCTURAS TIPO TIJERA	39
<i>Clasificación de las Tijeras</i>	40
Tijeras Rectas	40
Tijeras Anguladas	41
<i>Agrupaciones de Tijeras</i>	41
Agrupación Lineal	41
Agrupación en un Plano	43
Agrupación en Paralelo	43
Agrupación en Red	44
Agrupación Prismática	45
Agrupación en Domo	45
SISTEMAS DE CERRAMIENTO APLICABLES	46
<i>Páneles Rígidos</i>	47
<i>Plegaduras</i>	47
<i>Membranas</i>	48
<i>Neumáticas</i>	49
CAPÍTULO II: PROPUESTA	50
ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO	50
<i>Páneles Rígidos</i>	50
<i>Plegaduras</i>	51

<i>Membranas</i>	51
<i>Neumáticas</i>	52
<i>Comparativo y Elección de Sistema a Emplear</i>	53
<i>Principios Funcionales</i>	54
DESARROLLO DE MODELOS	55
<i>Modelos de Tijeras</i>	55
Agrupaciones de Tijeras en Paralelo.....	56
Agrupaciones de Tijeras en Red.....	56
Tijeras Agrupadas en un Plano.	57
<i>Modelos de Plegaduras Dinámicas</i>	58
Pirámides.....	58
Origami.....	60
Modificaciones Geométricas.	61
<i>Agrupaciones</i>	64
Plegaduras en Agrupaciones en Paralelo.....	64
Plegaduras en Agrupaciones en Red.	64
Plegaduras en Agrupaciones en Plano.....	66
<i>Modelos Constructivos</i>	68
Solución de Vértices.	70
Solución de Aristas.	71
Páneles de Plegadura	73
Solución de Juntas.	74
Modelo Final de Plegadura.....	76
<i>Aplicación de la Propuesta de Cerramiento Sobre las Estructuras de Tijeras</i>	76
Cerramiento en Agrupación Lineal en Paralelo	76
Cerramiento en Agrupación en Red	77
Cerramiento en Agrupación en Plano.....	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81

CERRAMIENTOS PARA ESTRUCTURAS DINÁMICAS TIPO TIJERA	8
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS.....	87

Lista de Figuras

Figura 1 Uso de tijeras en la industria aeroespacial	17
Figura 2 Diseño de uniones para plegaduras dinámicas	19
Figura 3 Aplicación de estructuras de tijera a pequeña escala	21
Figura 4 Árbol de problemas	21
Figura 5 Aplicación de tijeras en la industria del juguete.....	23
Figura 6 Cubierta dinámica con elementos rígidos	24
Figura 7 Estructuras laminares	30
Figura 8 Reticulados espaciales	31
Figura 9 Redes de cables.....	32
Figura 10 Estructuras arboriformes.....	33
Figura 11 Estructuras recíprocas	34
Figura 12 Estructura dinámica deslizable	35
Figura 13 Plegadura dinámica	36
Figura 14 Estructuras recíprocas dinámicas	37
Figura 15 Estructura arboriforme dinámica	38
Figura 16 Tenségrity desplegable	38
Figura 17 Estructura de tijeras.....	39
Figura 18 Tijeras rectas.....	40
Figura 19 Tijeras anguladas	41
Figura 20 Agrupación lineal	42
Figura 21 Agrupación lineal de tijeras anguladas	42
Figura 22 Agrupación en un plano de tijeras rectas	43
Figura 23 Agrupación en paralelo de tijeras anguladas.....	44

Figura 24 Agrupación en red de tijeras rectas.....	44
Figura 25 Agrupación prismática de tijeras rectas	45
Figura 26 Agrupación en domo de tijeras anguladas	46
Figura 27 Cerramiento con paneles rígidos.....	47
Figura 28 Cerramiento con plegaduras dinámicas	48
Figura 29 Cerramientos con membranas	49
Figura 30 Cerramiento con neumáticas.....	49
Figura 31 Agrupación lineal de tijeras	56
Figura 32 Agrupación de tijeras en red.....	57
Figura 33 Agrupaciones de tijeras en un plano	58
Figura 34 Módulo piramidal	59
Figura 35 Agrupación con módulo piramidal	59
Figura 36 Patrones de origami.....	60
Figura 37 Plegadura piramidal.....	61
Figura 38 Modificaciones geométricas de las plegaduras.....	62
Figura 39 Plegadura piramidal de pliegue centralizado	63
Figura 40 Cambio de dirección de plegado	63
Figura 41 Plegaduras en agrupaciones en paralelo	64
Figura 42 Plegaduras en agrupaciones en red.....	65
Figura 43 Plegaduras en red para elementos puntuales	66
Figura 44 Plegaduras en red, elementos aislados	66
Figura 45 Plegaduras en agrupaciones en plano	67
Figura 46 Plegaduras en agrupaciones en plano	67
Figura 47 Elementos constitutivos.....	68

Figura 48 Análisis de movimiento de la estructura de tijera y la plegadura dinámica.....	69
Figura 49 Modelo de plegadura dinámica con bisagras aisladas	70
Figura 50 Vértice de unión tijera-plegadura.....	71
Figura 51 Articulaciones	72
Figura 52 Bisagras unión vértice superior	73
Figura 53 Páneles.....	74
Figura 54 Bisagras impermeables.....	75
Figura 55 Modelo de junta impermeable	75
Figura 56 Modelo constructivo de plegadura dinámica	76
Figura 57 Modelo de cerramiento perpendicular a la estructura de tijera.....	77
Figura 58 Modelo de cerramiento en agrupación en paralelo.....	77
Figura 59 Modelo de cerramiento en módulo de agrupación en red	78
Figura 60 Modelo de cerramiento en agrupación en red (segunda propuesta)	79
Figura 61 Modelo de cerramiento en módulo de tijera en un plano	79
Figura 62 Modelo de cerramiento en agrupación en plano	80

Lista de Tablas

Tabla 1 Matriz comparativa de sistemas de cerramiento aplicables 53

Resumen

El siguiente es un trabajo investigativo, el cual pretende ahondar en el conocimiento de las estructuras dinámicas tipo tijera, llegando a una propuesta de un sistema de cerramiento adecuado para las mismas. Se inició con un proceso de contextualización del estado del arte, analizándolo en diferentes clasificaciones dentro de la morfología estructural (estructuras no convencionales, estructuras dinámicas, estructuras tipo tijera).

En el desarrollo de la investigación se hace un diagnóstico de los posibles sistemas de cerramiento aplicables, haciendo un comparativo entre los mismos para elegir el más adecuado, determinando usar el sistema de plegaduras dinámicas como cerramiento para las estructuras desplegables tipo tijera. Se desarrollaron diferentes modelos para determinar la forma, materialidad y tipos de agrupación posibles, llegando hasta el detalle de los elementos constructivos del sistema de cerramiento, facilitando la aplicación en proyectos a gran escala, permitiendo usar sistemas de tijeras para proyectos de grandes luces.

Palabras clave: estructuras no convencionales, estructuras dinámicas, estructuras plegables, estructuras tipo tijera, plegaduras dinámicas, cerramientos dinámicos.

Abstract

This is a research project, that intends to contribute to the knowledge of scissor deployable structures, with the objective of proposing an efficient enclosure system for them. Starting with a contextualization of the state of the art, analyzing different classifications within structural morphology (unconventional structures, kinetic structures, scissor deployable structures).

Comparing different enclosure systems that apply to deployable scissors, the dynamic folds were selected as the most pertinent. Several models were built to define the shape, materials, and grouping types, finally detailing the constructive elements for the enclosure system, making it possible to use deployable scissor structures in large-range solutions.

Keywords: unconventional structures, kinetic structures, deployable structures, scissor deployable structures, architectural dynamic folds, dynamic architectural enclosures.

Introducción

El tema de las estructuras dinámicas aplicadas al campo de la arquitectura, ha interesado durante décadas a diversos profesionales, quienes han identificado el enorme potencial de estos sistemas como solución a las necesidades de flexibilidad, transportabilidad y adaptabilidad de la arquitectura.

Sin embargo, diferentes factores han hecho que el uso de este tipo de estructuras no sea tan común; primero, la construcción se ha visto limitada por cuestiones culturales, normativas y económicas que hacen que la mayoría de edificaciones se realicen con métodos constructivos tradicionales, priorizando estandarización y economía por encima de las posibilidades de innovación, tal como comenta Torres (2021):

La imagen de la arquitectura que comúnmente vemos, es por lo general una imagen basada en estructuras rígidas y estáticas que no contemplan la transformación del espacio para lograr fines adaptativos o beneficios constructivos como la facilidad de montaje, modulación de los elementos y la capacidad de ser portable (p. 24).

El avance en el desarrollo de estos sistemas dinámicos, y en particular para este estudio de las estructuras desplegadas tipo tijera, ha sido en su mayoría a nivel académico, por lo que falta la materialización de elementos que permitan la aplicación práctica de estas estructuras a escala real, solucionando todos los requerimientos de funcionalidad, habitabilidad y confort necesarios para el correcto funcionamiento de una edificación.

Hasta el momento las aplicaciones reales de las estructuras dinámicas se han dado desde la arquitectura, con elementos de bajo grado de complejidad en cuanto a las posibilidades de movimiento, viéndose su uso en sistemas de fachadas o en cubiertas móviles. Estructuras con mayor grado de complejidad como los sistemas tipo tijera se pueden ver en aplicaciones arquitectónicas a pequeña escala (propuestas de refugios temporales, arquitectura efímera y espacios de exposición), además se

ha visto en mayor parte su uso en otras ramas del conocimiento como la escultura, ingeniería industrial y la industria aeroespacial.

El propósito de este trabajo es generar un avance en el conocimiento de este tipo específico de estructura no convencional, al generar una propuesta de un sistema de cerramiento adecuado para estructuras desplegables tipo tijera, generando mayor viabilidad para el uso de estas a mayor escala, y aprovechar el potencial que se tiene para construir edificaciones adaptables a las condiciones climáticas, cambios de uso o transformabilidad de la construcción.

Formulación del Problema e Hipótesis

Planteamiento del Problema

El uso, diseño, construcción y desarrollo de estructuras dinámicas tipo tijera (dentro de la rama de las estructuras no convencionales), es un tema que no se ha materializado en proyectos a gran escala; en palabras de Villate (2008) “estructuras no convencionales, denominadas así en este documento por su escasa y casi inexistente aplicación en proyectos arquitectónicos” (p. 7); algunos arquitectos a nivel internacional han realizado aplicaciones prácticas a pequeña escala y otros especialistas en otras ramas del conocimiento (ver Figura 1).

Figura 1

Uso de tijeras en la industria aeroespacial



Nota. La imagen muestra al profesor Sergio Pellegrino de la Universidad Caltech usando estructuras desplegables con tijeras como soporte a una superficie de MYLAR enrollada para uso en aplicaciones espaciales. Tomado de “A Neat Package” University of Cambridge. s.f. (<http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/now/deployable.html>)

En el caso colombiano, debido a lo arraigado en el medio de la construcción de sistemas estructurales y constructivos tradicionales, no se ha avanzado en el desarrollo de nuevas tecnologías (salvo un aumento en la construcción de estructuras metálicas aporticadas o el uso de membranas arquitectónicas como cubierta); además, en nuestro medio los materiales para realizar este tipo de

estructuras (cables, uniones, mecanismos) son de escasa distribución y de costos elevados en ocasiones, por lo que fuera del campo académico son pocas las aplicaciones prácticas.

Dentro de este contexto se presentan tres ejes problemáticos:

Dificultad y Falta de Desarrollo de Cerramientos, Mecanismos de Fijación, Unión y Motricidad

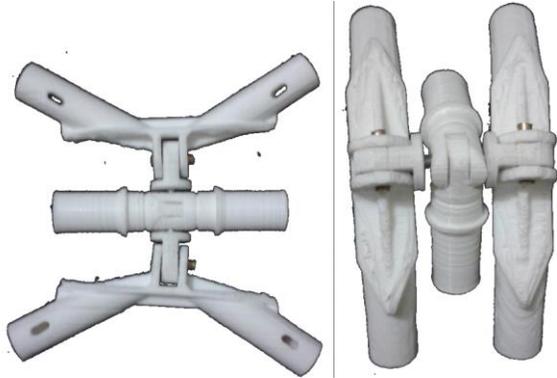
Hasta ahora, la mayoría de ejemplos realizados usando estructuras dinámicas han empleado los sistemas más elementales para generar el movimiento de las estructuras (desplazamiento sobre rieles o medios de apoyo deslizables), pero hay falencia en elementos constitutivos de sistemas más complejos donde hay deslizamiento y/o rotación en varias direcciones (tijeras, plegaduras dinámicas, tenségrity desplegable).

Existen planteamientos teóricos con la posibilidad de realizar proyectos a gran escala donde se pueden cubrir grandes luces con estructuras desplegadas tipo tijera (modelos conceptuales), sin embargo, no se han solucionado los elementos de cerramiento, por lo que, aunque se materializaran estas propuestas, no estarían solucionados temas de habitabilidad al interior de las edificaciones donde se usen.

Al ser planteamientos innovadores, los elementos constitutivos no se consiguen a nivel comercial, son prototipos y/o piezas a medida hechas específicamente para cada propuesta, lo que presenta una dificultad, ya que aún está en proceso de experimentación los materiales idóneos y la fabricación es en principio costosa o se deben hacer adaptaciones de cosas diseñadas con otros propósitos (motores, bisagras, uniones, apoyos, etcétera). Esto es explicado por Torres (2021) cuando dice que se necesita “implementar soluciones técnicas especiales para evitar incompatibilidades en los procesos de despliegue, lo que conlleva a proponer barras telescópicas, barras de diferentes tamaños y nodos con un diseño específico” (p. 26) Como se ve en la Figura 2.

Figura 2

Diseño de uniones para plegaduras dinámicas



Nota. Prototipo de unión para plegaduras dinámicas, es un desarrollo y diseño específico, el cual para una propuesta requiere una fabricación sobre medida de los elementos. Tomado de “Planteamiento de uniones dinámicas para elementos tubulares con base en la morfología de sistemas de superficie activa (plegaduras)” S. Coca. 2014.

(<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59292>)

Falta de Coordinación Arquitectónica

En muchos casos, al plantear el uso de estructuras dinámicas en la solución de cubiertas o fachadas, estas no hacen parte integral del diseño del proyecto arquitectónico, es más, en la actualidad se han cubierto edificios preexistentes con cubiertas móviles, por lo que, a pesar de haber planteamientos interesantes y bien solucionados estructural y constructivamente, estas cubiertas móviles se convierten en “añadidos” puestos encima del edificio, por lo que prácticamente podrían ser remplazadas por otro sistema sin afectar el resto del proyecto. En otros casos, en proyectos nuevos, se contrata la cubierta de los edificios por separado del resto del proyecto, dando autonomía a los diseñadores de la estructura de la cubierta, enfatizando este hecho de falta de coordinación, ya que la estructura no se plantea como parte del proyecto, si no como algo que diseñe alguien más.

Escala

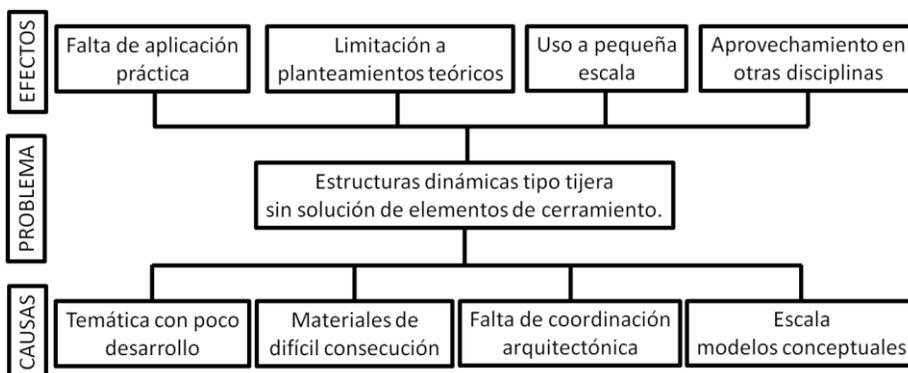
En muchos casos no se estudia la aplicabilidad arquitectónica, pensada a escala real, quedándose en planteamientos y modelos teóricos, generando que en las propuestas de este tipo de estructuras haya falencias en aspectos como detalles constructivos y de montaje, los mecanismos y puntos generadores de movimiento y los cerramientos, los cuales deben adaptarse según la estructura a cambios de forma (convirtiéndose también en objetos dinámicos que no se han estudiado tanto).

La escala comprende la dimensión de los espacios dependiendo de la forma en que el ser humano los usa, los entiende y los habita; en palabras de Rodríguez (2000), “De acuerdo a las características de cada actividad, se ha hecho una apropiación del espacio a diferentes escalas” (p. 192).

Las aplicaciones arquitectónicas reales hechas a la fecha empleando estructuras desplegadas tipo tijera se han hecho a pequeña escala de habitar (arquitectura efímera, espacios comerciales, zonas de exposición o albergue temporal como se ve en la Figura 3) o a nivel mobiliario según la clasificación hecha por Rodríguez (2000). En estos casos, las exigencias estructurales no son muy grandes, las cargas son pequeñas (peso propio) y no se vencen grandes luces; por otro lado, los cerramientos, al ser instalaciones temporales, no requieren condiciones de habitabilidad muy elaboradas, tal vez brindar un poco de protección a los elementos ambientales (sol, lluvia y tal vez viento), por lo que en estas intervenciones la solución de cerramiento son elementos livianos (páneles o membranas) fáciles de montar y desmontar manualmente, pero que no dan posibilidades de recrear este tipo de planteamientos a mayor escala y en objetos arquitectónicos más permanentes.

Figura 3*Aplicación de estructuras de tijera a pequeña escala*

Nota. La imagen muestra el pabellón Xuê, estructura realizada por el Departamento de Arquitectura y Urbanismo de la Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, el Laboratorio de Fabricación Digital LEFAD y la participación de estudiantes durante un workshop en 2017, es un ejemplo de la aplicabilidad de las tijeras a pequeña escala, donde lo principal es demostrar el funcionamiento de la estructura, pero no hay una solución práctica de cerramientos. Tomado de “Estructuras desplegables: sistemas tipo tijera” N. Torres, H. De Matos. 2018. (<http://hdl.handle.net/2117/120005>)

Árbol de Problemas**Figura 4***Árbol de problemas*

Nota. La figura muestra el esquema de árbol de problemas específico para el desarrollo de este trabajo de grado, identificando causas y efectos generados por el problema principal. Elaboración propia.

Pregunta Problema

¿Cuál es el sistema que solucione la falencia de elementos de cerramiento adaptables a estructuras dinámicas desplegadas tipo tijera?

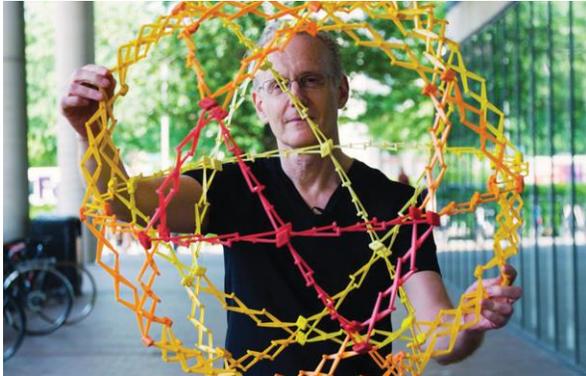
Justificación

Las estructuras desplegadas tipo tijera hacen parte del grupo de sistemas estructurales dinámicos que producen adaptabilidad y posibilidad de transformación en los espacios donde se emplean, dando respuesta a los requerimientos del mundo actual (cambios de uso, variaciones climáticas, modificaciones en el entorno) como indicó Villate (2008), ya que las dinámicas sociales han cambiado, las familias y sus interacciones son diferentes, así como el resto de actividades humanas, y con ellas la apropiación del espacio.

Hasta el momento, solo se han desarrollado en la práctica sistemas dinámicos con bajo grado de complejidad, y los más avanzados se han desarrollado a nivel teórico, a pequeña escala o en otras áreas del conocimiento (arte, industria aeroespacial, juguetes, ingeniería industrial, como se ve en la Figura 5). Esto hace necesario que se siga estudiando y se hagan avances para aumentar la aplicabilidad en el uso de este tipo de estructuras.

Figura 5

Aplicación de tijeras en la industria del juguete



Nota. Chuck Hoberman, artista, ingeniero, arquitecto e inventor, quien inició su trabajo comercial en la industria del juguete por medio de sus esferas desplegadas desde 1995. Tomado de “Hoberman Sphere Toy” Hoberman Associates. s.f.

(<https://www.hoberman.com/portfolio/hoberman-sphere-toy/>)

Estos sistemas aportan la posibilidad de emplear estructuras livianas, estables y adaptables, que permiten experimentar con el desarrollo de tecnología de materiales, generando innovación en el área.

Al momento de hablar de cerramientos, en la aplicación práctica de la construcción de estructuras dinámicas en el campo de la arquitectura, la mayoría de los ejemplos construidos utilizan elementos rígidos y estáticos respecto a sus puntos de apoyo, con sistemas elementales de movimiento, lo cual limita las posibles aplicaciones de este tipo de estructuras y tienen requerimientos de áreas adicionales en los edificios donde se construyen, ya que al no ser plegables, necesitan un área igual al elemento que se mueve para darle cabida (desperdiciando espacio en el que se pueden aprovechar las ventajas de la estructura desplegable, como se ve en la Figura 6). Por esto es necesario plantear elementos de cerramiento que tengan compatibilidad con las características de movilidad y adaptabilidad de la estructura, o el uso de materiales que den respuesta a estas necesidades.

Figura 6

Cubierta dinámica con elementos rígidos



Nota. Mercedes Benz Stadium, localizado en la ciudad de Atlanta, Georgia, inaugurado en el año 2017, con una cubierta dinámica en la que paneles rígidos se deslizan en línea recta para cerrar y abrir la cubierta, se requiere un área de cubierta fija mayor al área que se puede abrir, para soportar las partes móviles. Tomado de "Atlanta stadium by HOK hosts American football games under retractable "petals"" D. Howarth. 2018. (<https://www.dezeen.com/2018/01/31/mercedes-benz-stadium-atlanta-georgia-hok-american-football-nfl-retractable-roof-super-bowl-liiii/>)

El generar este tipo de propuestas debe brindar al interior de las edificaciones condiciones de confort y habitabilidad necesarias para su correcto funcionamiento (protección del clima, iluminación natural, ventilación y protección acústica), como afirman Vergauwen y De Temmerman (2012) la cobertura del edificio, que actúa como transición entre afuera y adentro, está evolucionando hacia una estructura dinámica, capaz de modificar su forma en respuesta a los cambios en el ambiente.

Estos sistemas así como muchas de las últimas innovaciones tecnológicas, implican el uso de materiales de alto costo o difícil consecución, por lo que puede abrirse un campo de investigación con el uso de materiales más "convencionales" dando soluciones adecuadas a las estructuras planteadas.

Hipótesis

Los resultados de este trabajo brindarán bases para el desarrollo de proyectos a gran escala usando estructuras desplegables tipo tijera con un sistema de cerramiento adecuado, generando soluciones viables a planteamientos existentes que hasta la fecha han sido teóricos.

Objetivos

Objetivo General

Plantear un sistema de cerramiento aplicable a estructuras dinámicas desplegadas tipo tijera, el cual se adapte a las características de cambio de forma de los elementos de soporte.

Objetivos Específicos

Identificar las características de los sistemas estructurales tipo tijera y las posibilidades de elementos de cerramiento para los mismos.

Evaluar las ventajas y desventajas de los posibles sistemas de cerramiento y la viabilidad de aplicación dentro del alcance del trabajo.

Proponer modelos de cerramiento que se adapten al cambio de forma de módulos estructurales generados a partir de tijeras.

Resolver los requerimientos funcionales y formales inherentes al modelo, pensando en su aplicación real, planteando elementos constitutivos, materiales y detalles.

Metodología

Se define la siguiente estrategia metodológica para lograr cumplir los objetivos propuestos:

La primera etapa del trabajo es meramente investigativa y corresponde a la recopilación de información de bases teóricas y antecedentes que ayuden a conformar el estado del arte en torno al tema del trabajo. Esto se hará a través de revisión de fuentes bibliográficas de diferente tipo (consulta en biblioteca, internet, repositorios) tanto a nivel nacional e internacional que estén relacionados con el tema.

Para los conceptos teóricos se tendrán en cuenta fuentes de cualquier época que ayuden a dar a entender la temática, para los antecedentes y el estado del arte, se tendrán en cuenta proyectos o planteamientos realizados durante los últimos 20 años, para determinar hasta donde se ha llegado en el tema y así poder determinar en qué se puede avanzar.

De aquí viene una etapa de análisis de la información y diagnóstico en la cual se determinarán las ventajas, desventajas y oportunidades de mejora de las estructuras analizadas y sus sistemas de cerramiento, demostrando por un lado la importancia y relevancia del tema, y en segundo lugar para delimitar el alcance de la propuesta. Esto se hará a través de un trabajo de disertación personal, evaluando diferentes aspectos y determinando conclusiones respecto a la información recopilada.

La tercera etapa es la de propuesta, donde se definirá el modelo a realizar y se hará el trabajo práctico proyectual de este trabajo. A través del desarrollo de modelos digitales y físicos se plantearán propuestas encaminadas a solucionar el problema planteado, generando conclusiones sobre cada uno de estos modelos, determinando cual o cuales son las propuestas que dan mejor respuesta a las necesidades planteadas. Como recursos para el desarrollo de esta etapa se utilizará software de modelado 3D para la realización de modelos digitales y los diferentes materiales para la realización de modelos físicos (cartón, madera, metal, tela).

Con la propuesta final definida se hará un proceso de generación de detalles de la propuesta y sus elementos constitutivos, para poder mostrar con detenimiento la propuesta y su aplicación como elemento arquitectónico.

CAPÍTULO I: Marco Teórico

Para contextualizar el tema de las estructuras dinámicas tipo tijera y sus sistemas de cerramiento es necesario definir el marco teórico desde dos puntos de vista:

- La clasificación de las estructuras desde diferentes escalas, la macro (estructuras no convencionales), meso (estructuras dinámicas) y micro (estructuras tipo tijera y sistemas de cerramiento aplicables), relacionando los antecedentes respectivos a cada caso.
- Las bases teóricas que fundamentan estos sistemas estructurales.

Estructuras No Convencionales

Son estructuras las cuales se salen de los convencionalismos y sistemas constructivos tradicionales, dando posibilidad a variaciones formales, un trabajo estructural diferente de sus elementos constitutivos (potencialmente pueden optimizar sus características portantes, reducir el peso de los elementos e innovar en el uso de materiales) y posibilidades de transformación, portabilidad y cambio de forma.

A continuación se describen desde esta escala macro, los tipos de estructuras no convencionales, clasificadas según el trabajo estructural de sus elementos.

Laminares

Estructuras que transmiten sus cargas a través de la superficie que las conforma, gracias a su geometría, optimizando el trabajo estructural de los materiales y minimizando las cantidades (ver Figura 7). Existen dos tipos de estructuras laminares según su forma:

- Las cáscaras transmiten su carga a través de una superficie curva, estas a su vez pueden estar clasificadas en cáscaras de simple curvatura (bóvedas cilíndricas y cónicas) y doble curvatura (de revolución o regladas).

- Las plegaduras están hechas por superficies planas y obtienen su estabilidad estructural por la relación entre la superficie y la geometría de los pliegues.

Figura 7

Estructuras laminares



Nota. Restaurante Los Manantiales, Xochimilco, Ciudad de México, 1958, Arquitecto Félix Candela. Estructura en cáscaras de concreto a partir de una geometría de paraboloides hiperbólicos, permitiendo espesores mínimos de hasta 5cm. Tomado de “Clásicos de Arquitectura: Restaurante Los Manantiales / Félix Candela” K. Duque. 2011. (<https://www.archdaily.co/co/02-95859/clasicos-de-arquitectura-restaurante-los-manantiales-felix-candela>)

Barras

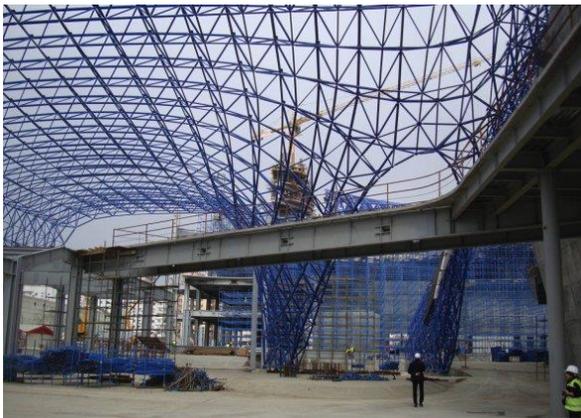
En este tipo de estructuras están diferenciados los elementos constitutivos según el esfuerzo al que están sometidos, cada uno trabaja principalmente a tracción o compresión. Se clasifican acorde a la rigidez de los elementos:

- En los reticulados tanto los elementos a tracción como a compresión son rígidos, y se genera estabilidad estructural a través de la triangulación de los mismos. Según su conformación pueden ser planos o espaciales organizados en redes de doble pared o de simple pared con curvatura (ver Figura 8).

- Los tenségritys tienen elementos rígidos a compresión soportados por elementos flexibles a tracción, clasificándose en abiertos (requieren elementos externos de anclaje) y cerrados (los elementos a tracción forman una unidad autoportante).

Figura 8

Reticulados espaciales



Nota. Proyecto Centro Cultural Heydar Aliyev en Azerbaiyán, año 2013, arquitecta Zaha Hadid. Estructura a partir de reticulados espaciales para lograr cubrir superficies de grandes luces con superficies curvadas. Tomado de “El homenaje construido de Zaha Hadid” Buscador de Arquitectura. 2013. (<https://noticias.arq.com.mx/Detalles/15551.html>)

Tracción

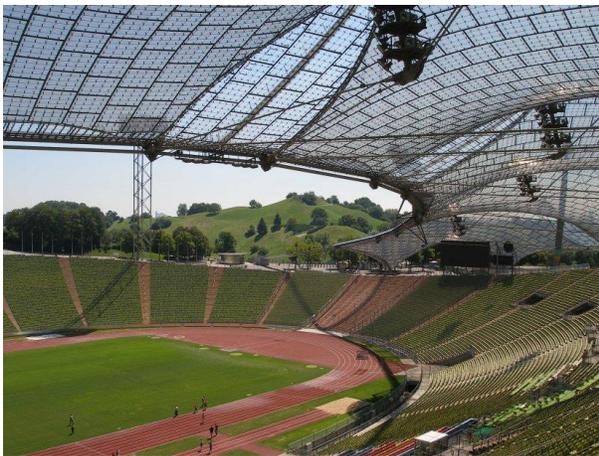
Este tipo de sistema estructural está conformado por elementos a tracción que funcionan gracias a su geometría. Según su materialidad y la forma en que se relacionan los elementos se clasifican de la siguiente manera:

- En las redes de cables cada elemento individual genera esfuerzos de tracción sobre los otros, repartiendo equilibradamente las fuerzas a los elementos de apoyo que pueden ser puntuales en los extremos o elementos rígidos que contienen toda la red (ver Figura 9).

- Las membranas son estructuras creadas a partir de materiales textiles, funcionan de la misma forma que las redes de cables, transmitiendo esfuerzos de tracción a los elementos de soporte y trabajan por su forma, requiriendo de una doble curvatura.
- Las estructuras neumáticas trabajan a tracción generada transversalmente a la superficie del material textil a través de presión de aire, pueden ser elementos cerrados independientes autoportantes (alta presión de aire) o abiertos con sistemas de regulación que mantengan la presión al interior del espacio habitable (baja presión de aire).

Figura 9

Redes de cables



Nota. Estadio Olímpico de Munich, 1972, arquitecto Frei Otto. Estructura de cubierta a partir de redes de cables que trabajan a tracción generando superficies de doble curvatura. Tomado de “Estadio Olímpico de Múnich” WikiArquitectura. s.f.

(<https://es.wikiarquitectura.com/edificio/estadio-olimpico-de-munich/>)

Arboriformes

Un sistema inspirado en los árboles como su nombre lo indica y utiliza la geometría fractal en la que “cualquiera de sus partes es similar al todo, esta propiedad se conoce como auto similaridad”

(Villate, 2008, p. 49), se basa en las relaciones entre los elementos de la naturaleza. Consiste en tener

una mayor cantidad de apoyos en la parte superior (recibe las cargas), los cuales van repartiendo las cargas verticalmente a una menor cantidad de elementos con mayor capacidad de soporte, reduciendo la cantidad de puntos de apoyo en la base (ver Figura 10).

Figura 10

Estructuras arboriformes



Nota. Aeropuerto de Stuttgart, 2004, arquitecto Meinhard von Gerkan. Estructura de cubierta del terminal con geometría arboriforme. Tomado de "Stuttgart Airport" gmp. s.f. (<https://www.gmp.de/en/projects/548/stuttgart-airport>)

Recíprocas

Están conformadas por elementos estructurales independientes que se soportan los unos a los otros de forma recíproca, repartiendo los esfuerzos de manera uniforme, los elementos son rígidos y soportan esfuerzos de flexión (ver Figura 11).

Figura 11*Estructuras recíprocas*

Nota. Casa de Fardos de Paja en la ciudad de Guijón, Asturias, 2015. Construcción ecológica con estructura de cubierta recíproca en madera. Tomado de “CUBIERTA RECÍPROCA” M. Fresno. 2015.

(<https://arquitectutecnica.com/2015/06/08/cubierta-reciproca/>)

Dinámicas

Estructuras en las que se presenta movimiento en los elementos constitutivos, los cuales a nivel de transmisión de cargas pueden trabajar como cualquiera de los sistemas descritos anteriormente.

Estructuras Dinámicas

En este tipo de sistemas estructurales sus elementos constitutivos se desplazan cambiando su posición, o cambian de forma con el objeto de transformar el espacio o permitir su transporte, montaje y desmontaje; en palabras de Villate (2008), “permiten la transformación de los espacios arquitectónicos que pueden adaptarse a condiciones del medio ambiente como climáticas, de iluminación natural y de acústica o permitir adaptabilidad arquitectónica a cambios de uso” (p. 7).

Deslizable

Sistema en el cual, por medio de rieles y apoyos deslizables, los paneles o elementos rígidos que componen la estructura se mueven linealmente, radialmente o rotando en torno a un punto (ver Figura 12).

Figura 12

Estructura dinámica deslizable



Nota. Estadio Mary Terán de Weiss, Buenos Aires, 2018. Estadio con cubierta corrediza dentro del contexto latinoamericano, en el que una sección de la cubierta rígida, se desliza a través de unos rieles en forma de arco. Tomado de “Avanza la obra para el primer estadio con techo corredizo en el país” N. Sánchez. 2014. (https://www.clarin.com/ciudades/estadio-techado-parque-roca-primero-pais_0_B1JUZFvqPmx.html)

Plegadura

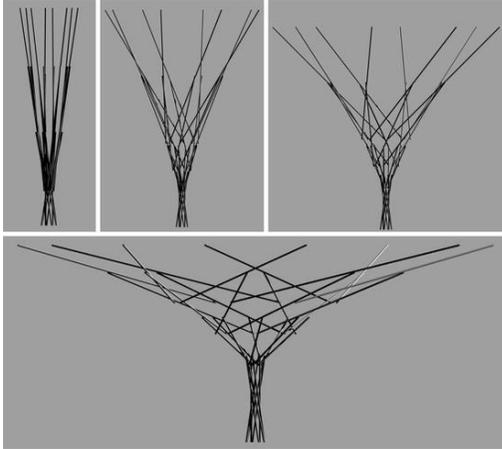
Los elementos estructurales trabajan repartiendo las cargas desde las superficies hacia las aristas, y se mueven por articulación en las mismas (ver Figura 13). El trabajo portante es diferente a las laminares, ya que toda la estructura no funciona de manera uniforme y se genera una plegadura dinámica como explica Parajó (2020).

Figura 13*Plegadura dinámica*

Nota. Pabellón de exposición en la plaza Escuelas Trevijano, ciudad de Logroño en España, arquitectos Manuel Bouzas Cavada, Manuel Bouzas Barcala y Clara Álvarez García, basado en la geometría del origami con la estabilidad de la triangulación, pero generando aristas articuladas a través de bisagras entre cada sección rígida, a una pequeña escala con la resistencia suficiente para soportar su propio peso. Tomado de “ORIGAMI interviene Logroño con una estructura que se auto sostiene para Concéntrico 03” ArchDaily. 2017. (<https://www.archdaily.co/co/873269/origami-interviene-logrono-con-una-estructura-que-se-autosostiene-para-concentrico-03>)

Recíproca

Elementos estructurales que se soportan entre si recíprocamente, pero con articulaciones en dichos puntos de soporte para generar movimiento (ver Figura 14).

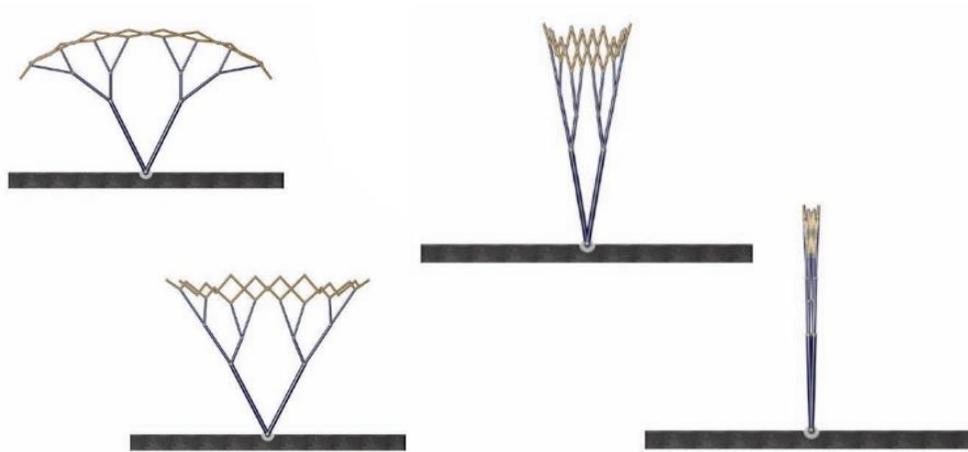
Figura 14*Estructuras recíprocas dinámicas*

Nota. Modelo de estructura recíproca desplegable, arquitecto Felix Escrig, 2013. Dentro del desarrollo de la propuesta para el Centro de Interpretación Natural Melilla generaron propuestas a partir de una estructura recíproca desplegable. Tomado de "Reciprocal Tree-Like Fractal Structures" J. Sánchez, F. Escrig, M. Rodríguez. 2014.

(<https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-014-0182-z>)

Arboriforme

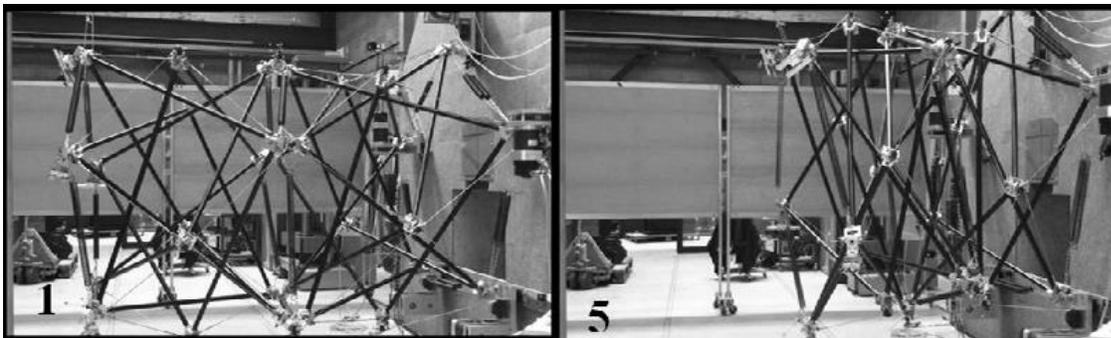
Los elementos estructurales van aumentando desde el apoyo inicial, reduciendo las cargas en cada punto de apoyo en los diferentes niveles de la estructura, pero en cada punto donde cambia la cantidad de apoyos la unión es articulada, permitiendo que la estructura tenga movimiento, deben tener un sistema complementario que controle el movimiento (ver Figura 15).

Figura 15*Estructura arboriforme dinámica*

Nota. Esquema de estructura arboriforme combinada con tijeras (ayudan a dar control al movimiento) para un conjunto desplegable. Tomado de “Estructuras no convencionales en arquitectura” M. Villate. 2008.

Tenségrity Desplegable

Elementos a compresión soportados por elementos a tracción, los cuales se desplazan por articulaciones y poleas para desplegar la estructura (ver Figura 16).

Figura 16*Tenségrity desplegable*

Nota. Modelo para propuesta de puente desplegable, proyecto de Tesis Doctoral. Tomado de “An Active Deployable Tensegrity Structure” L. Rhode-Barbarigos. 2012. (https://www.academia.edu/15994241/An_Active_Deployable_Tensegrity_Structure)

Tijera

Sistema por medio de barras o superficies que se articulan entre ellas sin separarse para generar movimiento y cambio de forma (ver Figura 17).

Figura 17

Estructura de tijeras



Nota. Estructura de tijeras aplicadas a un refugio para atención de desastres naturales, ingeniero Aushim Koumar, investigación para doctorado 2016. Tomado de "Deployable Scissor Structures for Disaster Relief: Multi-Criteria Optimisation and Design for Adaptability" A. Koumar. 2016. (<https://www.vub.be/arch/people/aushim-koumar>)

Estructuras Tipo Tijera

Son un sistema estructural compuesto por uno o varios módulos que al estar articulados y unidos se mueven en conjunto transformando su configuración formal y espacial. Un módulo básico de una tijera está conformado por dos elementos rígidos unidos a través de una articulación cumpliendo con que sea:

La articulación de dos barras o planos en un punto central o descentrado posicionado sobre el eje longitudinal de los elementos a articular.

El sistema tipo tijera permite el giro de un elemento con respecto al otro sin que puedan separarse (Torres, 2021, p. 118).

Estas estructuras se mueven bajo el concepto de un grado de libertad partiendo del triángulo o el cuadrado y pueden estabilizarse añadiendo un elemento rígido que limite el desplazamiento, sin importar que se maneje como un objeto independiente o como parte de una red de tijeras que forme un sistema más complejo que se mueve como una unidad, como explica Villate (2008).

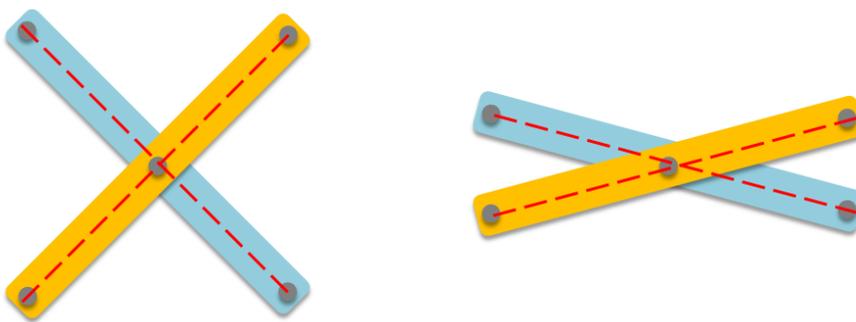
Clasificación de las Tijeras

Las tijeras se clasifican según la localización de las articulaciones respecto a los elementos rígidos que las constituyen, generando diferentes tipos de movimiento y ocupación del espacio. Se tuvo como base para la clasificación y las agrupaciones los tipos de tijeras descritos por Villate (2008).

Tijeras Rectas. En este tipo, las articulaciones están en línea recta, conformando un ángulo de 180° (ver Figura 18), siendo simétricas cuando los elementos son iguales y la articulación se encuentra en el centro de los elementos, o excéntricas en caso que la articulación esté desplazada del centro de los elementos.

Figura 18

Tijeras rectas

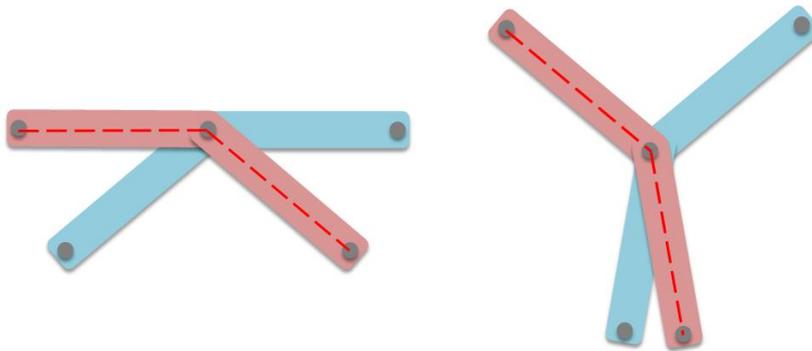


Nota. Los ejes indican el ángulo de 180° entre el punto central de giro y las articulaciones en los extremos de los elementos de una tijera recta simétrica. Elaboración propia.

Tijeras Anguladas. El otro tipo son las tijeras anguladas, en estas las articulaciones, a diferencia de las anteriores no se encuentran en línea recta, conformando un ángulo diferente a 180° (como se ve en la Figura 19).

Figura 19

Tijeras anguladas

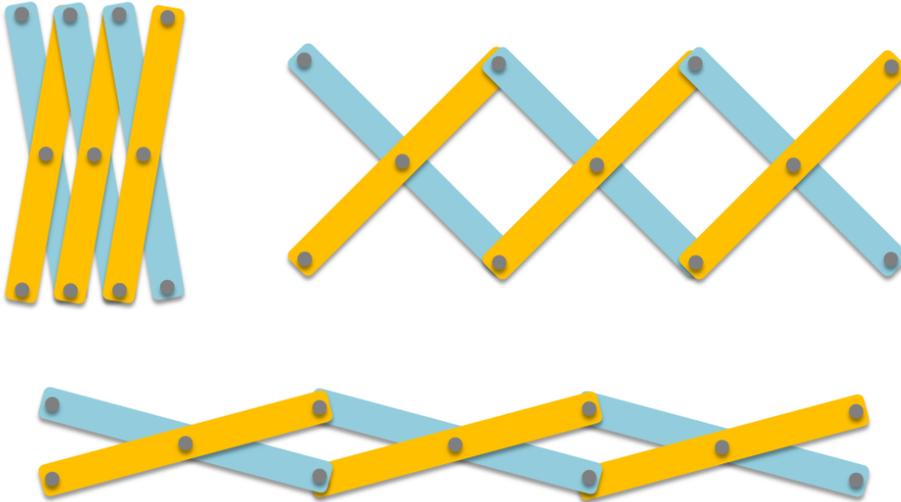


Nota. En las tijeras anguladas los ejes indican un ángulo diferente a 180° entre el punto central de giro y las articulaciones en los extremos de los elementos generando una configuración formal y cambio de forma diferente. Elaboración propia.

Cada uno de estos tipos permite agrupaciones de tijeras, dando la posibilidad de diferentes configuraciones formales y espaciales a partir del mismo principio de movimiento, la articulación de elementos que no se separan.

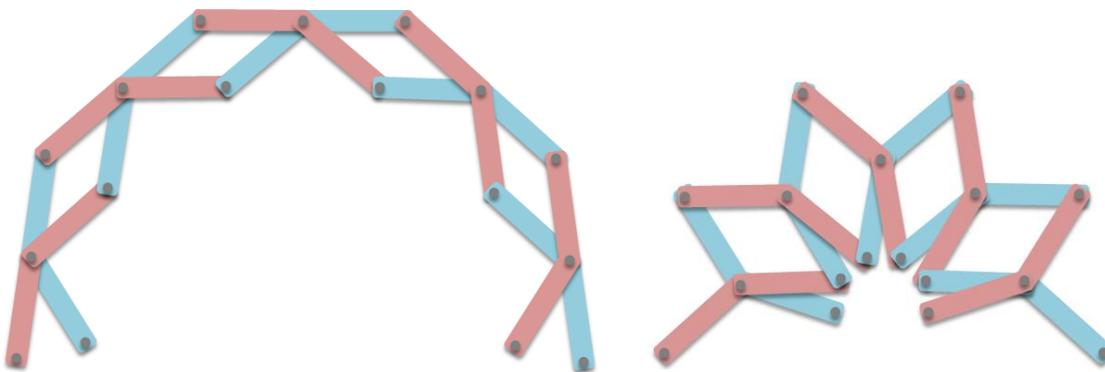
Agrupaciones de Tijeras

Agrupación Lineal. Las tijeras se organizan en línea, una tras otra, siendo aplicable este tipo de agrupación para tijeras tanto rectas como anguladas. Cuando las tijeras son rectas, el resultado es una agrupación que se pliega y repliega en el sentido del eje de la agrupación (ver Figura 20), sea en línea recta (simétricas) o generando un desarrollo curvo que va variando según el ángulo que se va generando entre las tijeras (excéntricas).

Figura 20*Agrupación lineal*

Nota. Modelo de agrupación lineal de tijeras rectas simétricas, pueden verse las etapas de plegado de la agrupación en sentido longitudinal. Elaboración propia.

En el caso de las tijeras anguladas (ver Figura 21) este tipo de agrupaciones conforma polígonos que se mueven en torno a un centro constante.

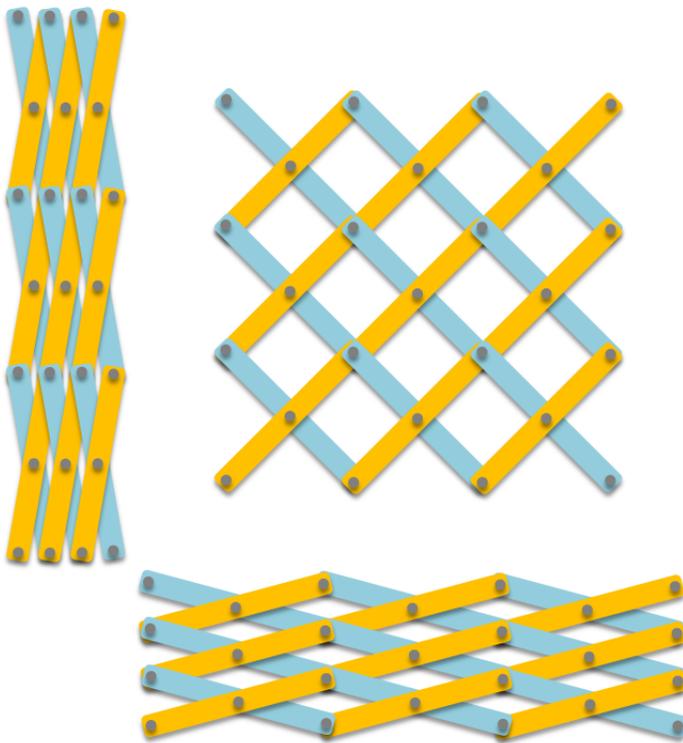
Figura 21*Agrupación lineal de tijeras anguladas*

Nota. Debido al cambio en la configuración formal de las tijeras anguladas, las agrupaciones lineales se desarrollan poligonalmente en torno a un punto central. Elaboración propia.

Agrupación en un Plano. Se genera una red de tijeras en los dos sentidos de los ejes de cada tijera. Estas redes, a partir de tijeras simétricas conforman una retícula que varía su dimensión en cada sentido de manera inversamente proporcional (ver Figura 22), en las excéntricas y anguladas son curvas o polígonos que abarcan una superficie concéntrica.

Figura 22

Agrupación en un plano de tijeras rectas

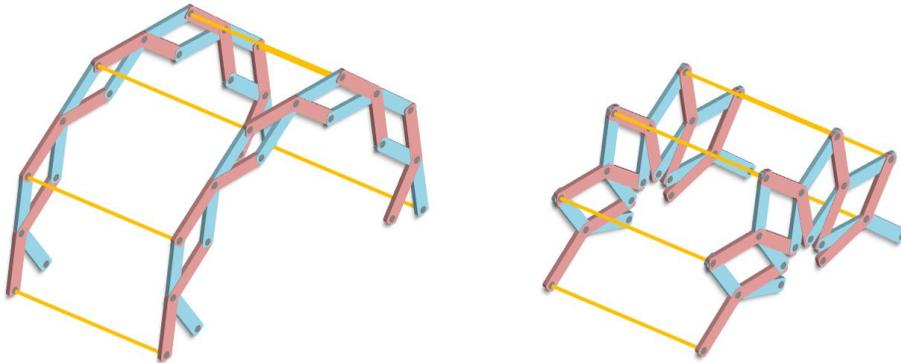


Nota. En redes de tijeras rectas simétricas la red se puede plegar en ambos sentidos, se pueden lograr límites de movimiento variando el tamaño de los elementos o con elementos adicionales de rigidización. Elaboración propia.

Agrupación en Paralelo. Las agrupaciones lineales pueden a su vez combinarse en paralelo, generando un nuevo tipo de agrupación espacial, que cambia de forma en el sentido de las plegaduras y mantiene su dimensión en el otro sentido, según el tipo de tijera genera una configuración que puede cubrir superficies planas, poliédricas o cilíndricas (ver Figura 23).

Figura 23

Agrupación en paralelo de tijeras anguladas

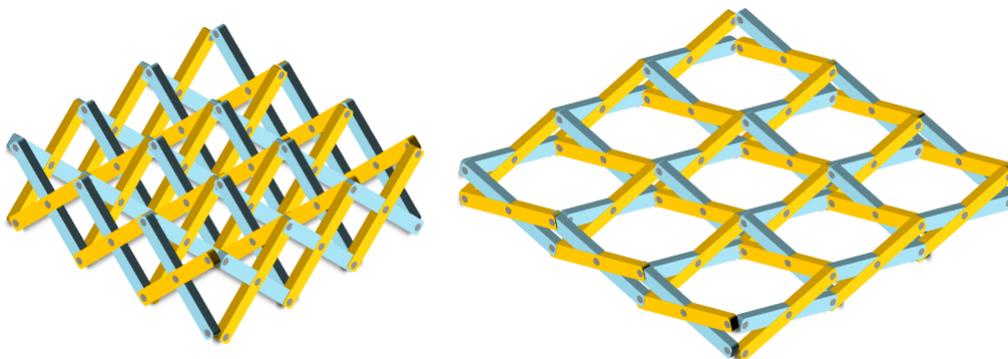


Nota. Dos agrupaciones de tijeras anguladas en paralelo se configuran espacialmente en un fragmento de cilindro que aumenta o cambia de tamaño en torno a un punto central. Elaboración propia.

Agrupación en Red. Las agrupaciones lineales de tijeras rectas también pueden agruparse formando redes espaciales de base poligonal (ver Figura 24), generando una configuración espacial que puede cubrir superficies planas o curvas de simple o doble curvatura (clásticas y sinclásticas). Estas redes de tijeras se pliegan y despliegan en todas direcciones de forma proporcional.

Figura 24

Agrupación en red de tijeras rectas

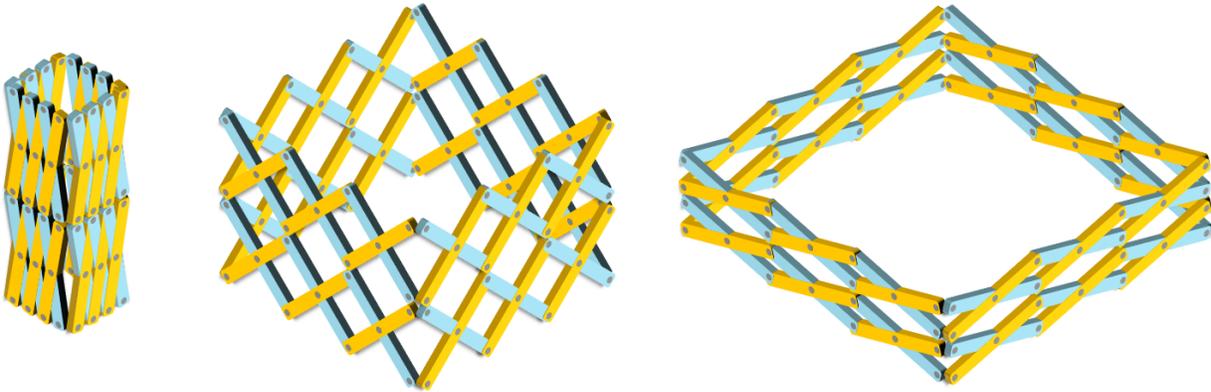


Nota. Agrupación en red de tijeras rectas simétricas de planta cuadrada, la cual crece o se reduce proporcionalmente en ambas direcciones. Elaboración propia.

Agrupación Prismática. Pueden acoplarse varias agrupaciones lineales a manera de las caras de otros volúmenes (ver Figura 25), generando una configuración prismática o poliédrica.

Figura 25

Agrupación prismática de tijeras rectas

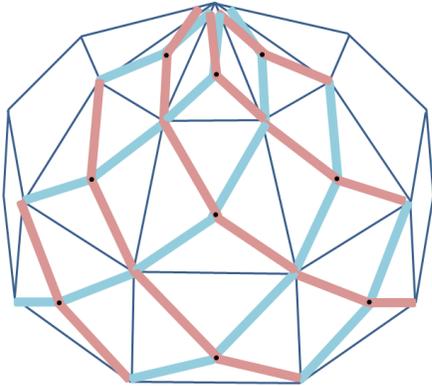


Nota. Agrupación prismática de tijeras rectas simétricas; varias agrupaciones lineales forman un prisma desplegable de base cuadrada. Elaboración propia.

Agrupación en Domo. Las agrupaciones concéntricas de tijeras anguladas pueden configurarse, ajustando los ángulos, para desarrollar secciones cónicas, que a su vez pueden organizarse para hacer domos (denominados tipo Iris) como se ve en la Figura 26, estos generan una espacialidad que se pliega y repliega concéntricamente, aumentando o disminuyendo la abertura interior.

Figura 26

Agrupación en domo de tijeras anguladas



Nota. Agrupación de tijeras anguladas a manera de domo iris, las dimensiones y ángulos de cada módulo se van ajustando para reducir la dimensión de la agrupación en torno a un punto central. Elaboración propia.

Sistemas de Cerramiento Aplicables

Debido a la complejidad de este tipo de estructuras, y las dificultades que se han evidenciado que no han hecho posible la materialización de proyectos a gran escala como se ha descrito y teniendo en cuenta las características de las estructuras desplegadas tipo tijera, se definen cuatro sistemas que se van a analizar, para evaluar sus ventajas y desventajas y así poder determinar el tipo de cerramiento sobre el cual se van a realizar los modelos para la propuesta, teniendo en cuenta que se puedan combinar y sean adaptables a las características de cambio de forma de la estructura.

Se tuvo en cuenta otro parámetro que es el uso de materiales inteligentes, los cuales pueden modificar las características del cerramiento para responder a características cambiantes, sintiendo e interpretando los eventos ambientales, procesando la información y actuando, logrando efectos como cambio de color, volumen, distribución de cargas, etcétera. Sin embargo, este tipo de materiales de alta tecnología apenas están en desarrollo por lo que plantear una propuesta con estos implicaría un trabajo que excedería el alcance de este trabajo.

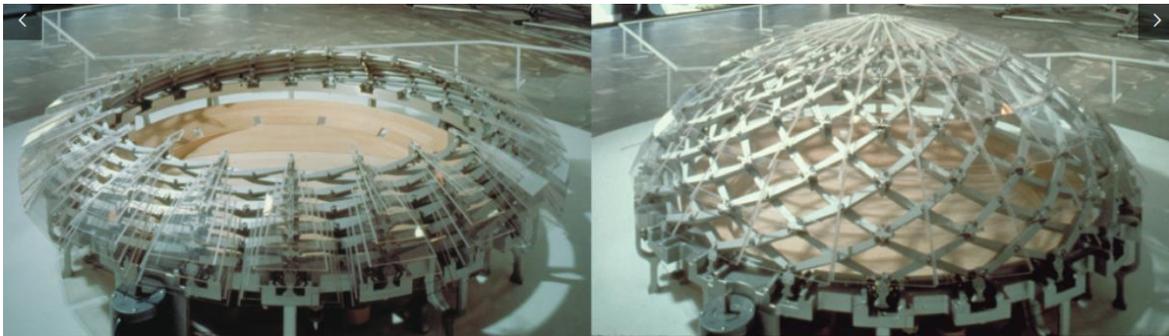
Páneles Rígidos

Es probable implementar cerramientos por medio de elementos rígidos, los cuales estén unidos aparte de la estructura y puedan moverse en su totalidad y guardarse en conjunto con el repliegue de los elementos de soporte.

Existe una propuesta que hasta el momento se ha hecho a nivel de modelo conceptual, realizada por la firma Hoberman Associates (ver Figura 27), cerrando un modelo con tijeras llamado Domo Iris con páneles rígidos fijados a cada módulo de la estructura y se repliegan en conjunto.

Figura 27

Cerramiento con páneles rígidos

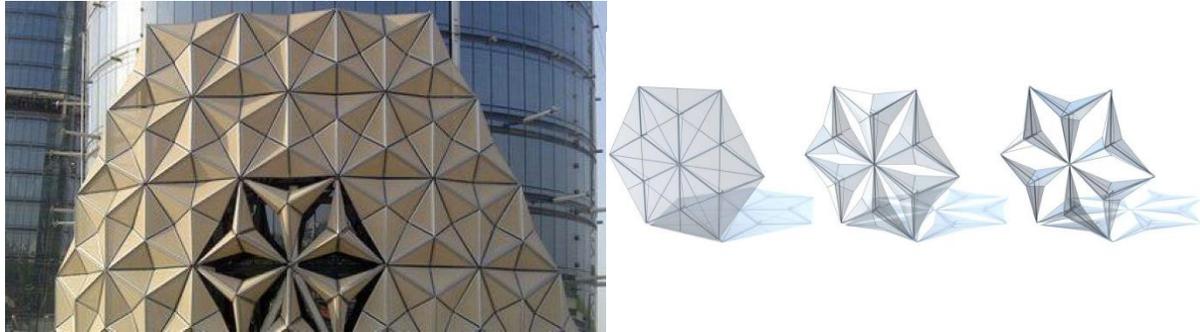


Nota. Propuesta de cerramiento para un domo iris, usando módulos individuales que se superponen para cerrar la estructura de tijeras, arquitecto Chuck Hoberman 1994, modelo localizado en el Museo de Arte Moderno de la ciudad de Nueva York.

Tomado de “Iris Dome at MOMA” Hoberman Associates. s.f. (<https://www.hoberman.com/portfolio/iris-dome-at-moma/>)

Plegaduras

Los sistemas de plegaduras dinámicas funcionan a nivel estructural por la transmisión de cargas de las superficies a las aristas articuladas que unifican todo (ver Figura 28), desde hace tiempo se estudia el uso de plegaduras para estructuras desplegables con aplicaciones prácticas en la industria aeroespacial (en estos casos se usan plegaduras con elementos flexibles) en su mayoría.

Figura 28*Cerramiento con plegaduras dinámicas*

Nota. Torres Al Bahr, localizadas en la ciudad de Abu Dhabi en los Emiratos Árabes Unidos, arquitectos Aedas, 2013. Sistema de cerramiento dinámico sobre una estructura fija, usando el principio de la plegadura para generar una fachada que se abre o cierra a la luz. Tomado de “Al Bahr Towers | Aedas” Arch2o. s.f. (<https://www.arch2o.com/al-bahr-towers-aedas/>)

Esta capacidad de cambio de las plegaduras hace posible que se contemple el uso de estas como una posibilidad de integración con las estructuras tipo tijera, logrando un nivel de plegabilidad acorde al cambio de forma de las tijeras.

Membranas

El uso de elementos textiles que se puedan retraer por medio de mecanismos se ha utilizado en diferentes oportunidades con otros sistemas estructurales (ver Figura 29). Logrando solucionar aspectos de detalle en cuanto al trabajo estructural, movilidad y el repliegue de la membrana (la forma de guardar el textil cuando no trabaja a tracción es muy importante), se ve potencialmente viable el uso de este tipo de estructura.

Figura 29*Cerramientos con membranas*

Nota. Al Janoub Stadium, Qatar, Zaha Hadid Architects, 2022. Uso de membranas arquitectónicas desplegadas para cubrir grandes luces. Tomado de “Al Janoub Stadium” Schlaich Bergermann Partner. 2022. (<https://www.sbp.de/en/project/al-janoub-stadium/>)

Neumáticas

Las neumáticas son elementos que se pueden recoger (igual que las membranas) al eliminar el aire que les da la rigidez estructural (ver Figura 30). Solucionando sistemas de inflado y la forma de recoger la membrana del elemento estructural, se podría adaptar al sistema estructural.

Figura 30*Cerramiento con neumáticas*

Nota. Propuesta de neumáticas desplegables basadas en plegaduras y origami, demostrando capacidad de plegabilidad y transportabilidad. Tomado de “Multistable inflatable origami structures at the metre scale” D. Melancon et al. 2021. (<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03407-4>)

CAPÍTULO II: Propuesta

Análisis y Diagnóstico

Teniendo en cuenta las opciones elegidas como posibles soluciones a los cerramientos de las estructuras desplegadas tipo tijera, se procede a realizar un análisis uno a uno de cada alternativa, encontrando ventajas y desventajas al momento de usarlos como sistema de cerramiento, para después generar una matriz donde se puedan comparar diferentes aspectos y determinar un criterio de evaluación para poder escoger el sistema más adecuado para desarrollar la propuesta específica.

Páneles Rígidos

Ventajas

- Los componentes rígidos son resistentes al embate de los fenómenos naturales.
- Solo generan cargas muertas por gravedad en puntos de apoyo.

Desventajas

- El desplazamiento de los páneles debe contemplarse en varios ejes para acomodarse al movimiento de la estructura, lo que genera mayor complejidad en los mecanismos de sujeción.
- Muchos elementos se mueven individualmente, generando una separación entre ellos, se requiere solucionar muchas juntas de elementos individuales, que son puntos débiles cuando se quiere tener un ambiente controlado.
- Los páneles no se adaptan al cambio de forma de la estructura.
- Mayor peso de elementos rígidos.

Plegaduras

Ventajas

- El desplazamiento de la plegadura puede ajustarse para que coincida con el movimiento de la estructura de soporte.
- Los componentes rígidos son resistentes al embate de los elementos naturales.
- Formalmente las plegaduras se ajustan al cambio de forma de la estructura.
- Solo genera cargas muertas por gravedad en puntos de apoyo, el movimiento es generado por la estructura de soporte.

Desventajas

- Si se desarrollan como módulos independientes pueden requerir solución de múltiples juntas que dificultan el control ambiental al interior (como un conjunto único, los elementos de unión pueden solucionar las juntas).
- Mayor peso de los elementos.

Membranas

Ventajas

- El desplazamiento puede ajustarse ya sea a la totalidad de la estructura en caso de una red, o a módulos individuales.
- Se puede modular uniendo varias secciones, reduciendo la cantidad de juntas requeridas.
- Cerramiento con materiales livianos.

Desventajas

- Las superficies de membrana son susceptibles al punzonamiento, haciéndolas relativamente más débiles contra el embate de fenómenos naturales en comparación a otros materiales.
- La adaptabilidad formal al recoger la membrana está sujeta a la forma del módulo del que esté soportada, se pueden requerir mecanismos adicionales para el despliegue o guardado de la membrana.
- Genera esfuerzos transversales adicionales a la estructura de soporte, ya que se requiere tensionar la membrana para que logre estabilidad.

Neumáticas

Ventajas

- El desplazamiento puede ajustarse ya sea a la totalidad de la estructura en caso de una red, o a módulos individuales.
- Formalmente las neumáticas se pueden ajustar al cambio de forma de la estructura.
- Cerramiento con materiales livianos.

Desventajas

- Las superficies de membrana son susceptibles al punzonamiento, haciéndolas relativamente más débiles contra el embate de fenómenos naturales en comparación a otros materiales.
- Si se desarrollan como módulos independientes pueden requerir solución de múltiples juntas, lo que es una desventaja respecto a la búsqueda del control ambiental al interior de la edificación.
- Requiere mecanismos adicionales para el inflado y desinflado de la neumática, es una estructura que al ser auto-portante no justifica tener una estructura de soporte adicional,

con elementos de guía para controlar el movimiento durante el proceso de inflado y desinflado se puede controlar el movimiento sin estructura adicional.

Comparativo y Elección de Sistema a Emplear

Tras haber tenido en cuenta los mismos aspectos para cada sistema de cerramiento, se puede llegar al esquema comparativo observado en la Tabla 1, con el objeto de evidenciar cuales tienen más ventajas al momento de emplearlos como complemento a las estructuras desplegables tipo tijera:

Tabla 1

Matriz comparativa de sistemas de cerramiento aplicables

SISTEMA DE CERRAMIENTO	COMPLEJIDAD DE MOVIMIENTO	RESISTENCIA A CARGAS VIVAS POR FENÓMENOS NATURALES	SOLUCIÓN DE JUNTAS	ADAPTABILIDAD FORMAL	PESO DEL CERRAMIENTO	ESFUERZOS ADICIONALES GENERADOS POR EL CERRAMIENTO
PÁNELES RÍGIDOS	✗	✓	✗	✗	✗	✓
PLEGADURAS	✓	✓	✗	✓	✗	✓
MEMBRANAS	✓	✗	✓	✗	✓	✗
NEUMÁTICAS	✓	✗	✗	✓	✓	✗

Nota: La tabla indica los sistemas de cerramiento aplicables para estructuras dinámicas desplegables tipo tijera identificando los diferentes aspectos analizados identificados como ventajas o desventajas para cada uno. Elaboración propia.

Luego de realizar esta comparación, se elige como sistema a desarrollar las plegaduras dinámicas, aprovechando las ventajas descritas, la compatibilidad que se puede lograr en el movimiento entre estructura y cerramiento, su adaptabilidad a los cambios de forma a los que se verá sometido y la capacidad de resistir a fenómenos naturales. Aunque estos sistemas no generan esfuerzos adicionales a la estructura portante, salvo la carga específica por gravedad que es mayor a las membranas o

neumáticas, se tendrá en cuenta la posibilidad de utilizar materiales que, aunque sean rígidos, no sean tan pesados para que las cargas del cerramiento no sean significativas para la estructura de tijeras. También se puede aprovechar la adaptabilidad formal de las plegaduras y la posibilidad de agruparlas y modularlas para, a través de la geometría que se plantee, poder reducir la cantidad de juntas entre elementos individuales, las cuales generan mayor dificultad en su solución y una potencial deficiencia para el control ambiental al interior.

Principios Funcionales

La propuesta a ejecutar debe cumplir con una serie de requisitos a nivel funcional para que el sistema de cerramiento sea viable al utilizarse con la estructura dinámica:

- **Plegabilidad:** El cerramiento debe poder desplegarse y guardarse, ajustándose a los cambios de forma y la función que la estructura dinámica cumpla dentro del edificio (cubierta desplegable, fachada dinámica, etc.).
- **Juntas herméticas:** Dentro de los detalles de la propuesta, deben plantearse elementos de unión de los elementos que se mueven por separado, para que al momento de unirse garanticen que al interior del edificio se controle el flujo del viento, no entre el agua lluvia y en general que el ambiente esté controlado.
- **Pendiente positiva:** La propuesta a nivel formal, cuando el cerramiento esté en funcionamiento, debe tener pendientes positivas, para que el agua lluvia fluya y se eviten apozamientos en algún punto.
- **Materialidad:** El material de cerramiento para la propuesta debe ser rígido, con la suficiente resistencia para soportar su propio peso y las cargas vivas generadas por los fenómenos naturales a los que se vea sometido. Según el uso específico, deben poderse elegir

materiales con características acústicas, térmicas y de iluminación que cumplan con las necesidades del edificio.

- **Apoyos, uniones y articulaciones:** Estos elementos deben cumplir con los requerimientos funcionales de facilitar el movimiento de las plegaduras, y la rotación de ejes con los puntos de soporte sobre la estructura de tijeras. A su vez, deben solucionar prácticamente las juntas como se mencionó anteriormente, para que las uniones controlen la hermeticidad requerida ante los fenómenos naturales.

Desarrollo de Modelos

Teniendo en cuenta las características específicas del sistema de cerramiento elegido, así como los requerimientos funcionales que debe cumplir la propuesta, inicia la etapa de exploración, a través de la realización de modelos. En una primera aproximación se experimenta con el sistema de movimiento, la geometría y las posibilidades de agrupación que puedan generar. La idea es mostrar cómo, a partir de la propuesta de plegaduras dinámicas se pueden solucionar diferentes configuraciones formales generadas por las tijeras.

En la segunda etapa de modelado, correspondiente a los elementos constitutivos (uniones, articulaciones, juntas), pensándolos a escala real, se pretende comprobar que se pueden dar solución a los cerramientos en las diferentes configuraciones de tijeras, a partir de los mismos elementos, generando una solución constructiva, un principio de estandarización y solución a escala real. Además de esto, se pretende utilizar en su mayoría materiales de fácil consecución a nivel comercial.

Modelos de Tijeras

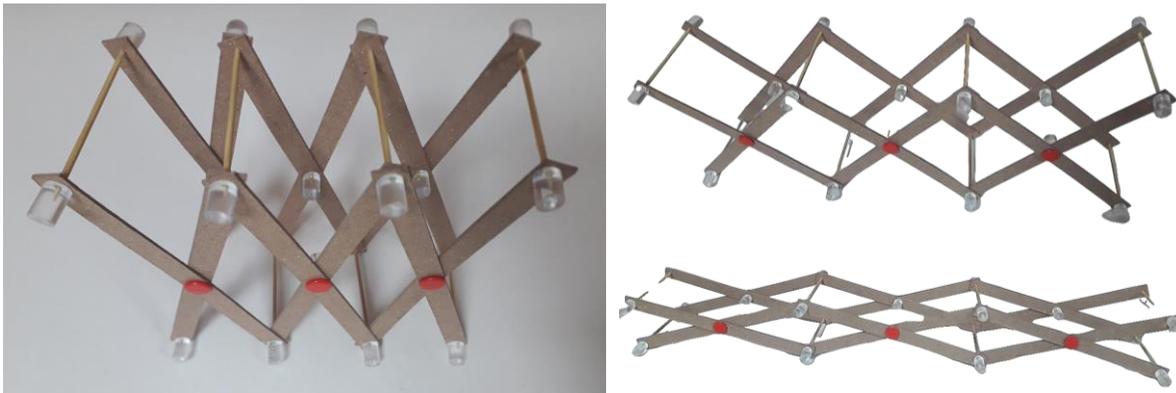
Estos primeros modelos tienen como objeto repasar los tipos funcionales estudiados hasta el momento de las estructuras de tijera, no con el objeto de generar una propuesta nueva, ya que estos

sistemas tienen bastante estudio previo, pero como repaso de las diferentes configuraciones formales a las que se debe dar respuesta con la propuesta de cerramiento.

Agrupaciones de Tijeras en Paralelo. Independiente de que las tijeras sean rectas o anguladas, estas pueden agruparse linealmente, dando como resultado un despliegue en línea recta o curva dentro de un solo plano. Cuando se juntan varias de estas agrupaciones en paralelo, manteniendo la distancia entre cada una, da como resultado un conjunto que cambia de dimensión en un sentido, pero se mantiene en el otro (ver Figura 31), así que los módulos que cambian de forma son rectángulos que conservan uno de sus lados.

Figura 31

Agrupación lineal de tijeras

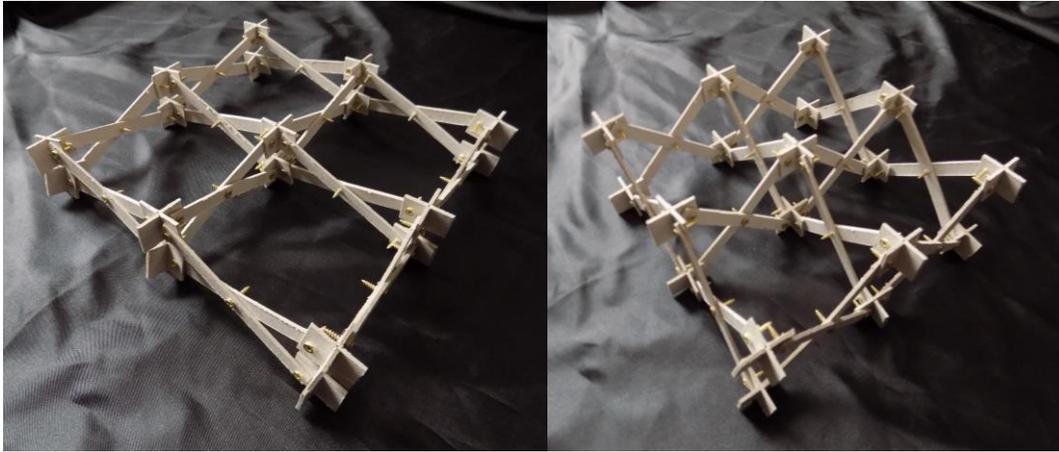


Nota. Modelo de agrupaciones lineales de tijeras en paralelo, la agrupación cambia de dimensión en un solo sentido de la agrupación. Elaboración propia.

Agrupaciones de Tijeras en Red. Cuando las agrupaciones lineales descritas anteriormente se cruzan en varias direcciones, generando diferentes tipos de redes (cada elemento de la red es una tijera), se genera un sistema que crece o se reduce de tamaño proporcionalmente en cada dirección (ver Figura 32), en este caso los módulos que cambian de forma tienen la forma base de la red y crecen y decrecen en la dimensión de cada arista.

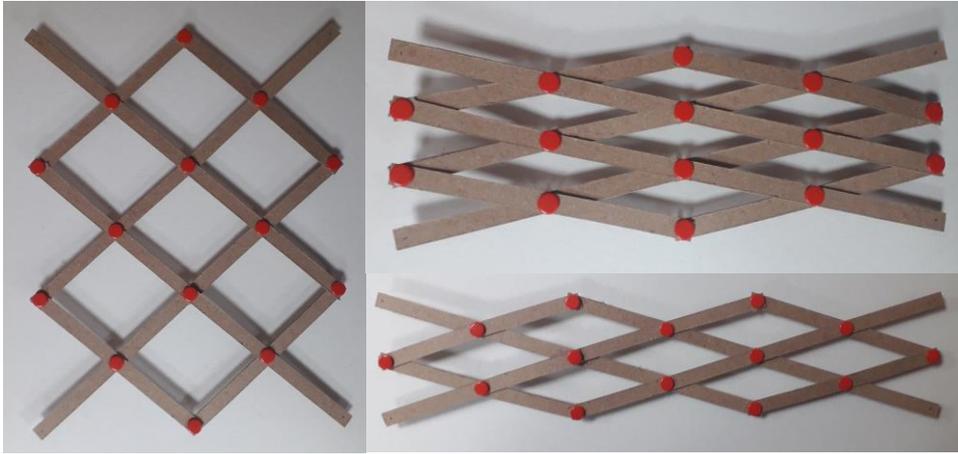
Figura 32

Agrupación de tijeras en red



Nota. Modelo de agrupación en red de tijeras de base cuadrada, la agrupación cambia de dimensión en los dos ejes de la agrupación proporcionalmente. Elaboración propia.

Tijeras Agrupadas en un Plano. En las redes de tijeras planas o anguladas, estas se agrupan en red en el otro sentido, dando forma a redes que crecen en un sentido y decrecen en el otro (ver Figura 33), o generan polígonos desplegados que también crecen o decrecen en los sentidos opuestos a partir de la plegabilidad de rombos como explica Villate (2008). Al plegarse un rombo, en un sentido la dimensión aumenta, mientras que en el otro disminuye su tamaño.

Figura 33*Agrupaciones de tijeras en un plano*

Nota. En este modelo la red de tijeras se hace en el sentido de la plegabilidad de las mismas; estas redes crecen en un sentido mientras se reducen en el otro, este tipo de configuración genera redes desplegadas, y en el caso de las tijeras anguladas es el principio para los domos desplegados. Elaboración propia.

Modelos de Plegaduras Dinámicas.

Los primeros modelos pretenden mostrar cómo cambian de forma las plegaduras a la par que se mueven las tijeras. Estas primeras aproximaciones formales tienen como base la geometría espacial, teniendo en cuenta los sólidos platónicos como figuras elementales de la configuración espacial.

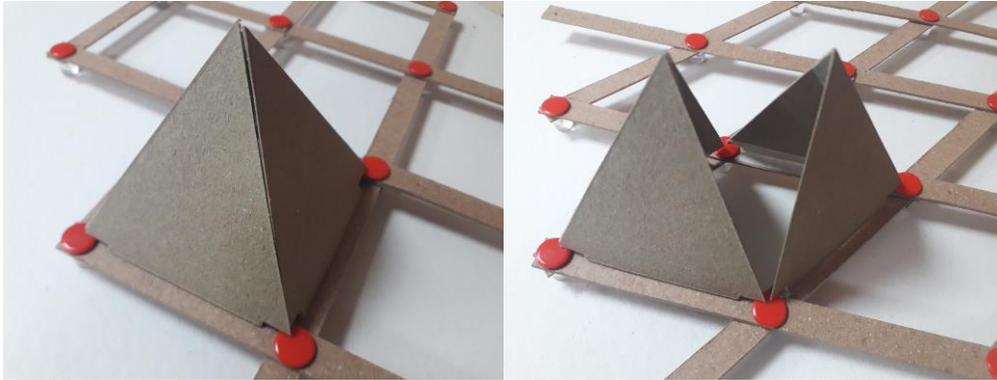
Luego se tiene en cuenta el origami, ya que es un arte basado en el plegado de superficies planas para generar configuraciones espaciales, y a partir de este punto se hacen alteraciones de la geometría para lograr los requerimientos de plegabilidad dentro del sistema estructural analizado.

Pirámides. En los primeros modelos se usó una pirámide ocupando el espacio de cada módulo trapecoidal entre tijeras (ver Figura 34). En estas primeras aproximaciones se puede ver que efectivamente los módulos piramidales se mueven a la par con las tijeras, sin embargo la forma base requiere separación de alguna de las caras de la pirámide, lo que genera un incumplimiento de uno de

los principios funcionales que es reducir la cantidad de elementos independientes que al momento de unir generen complicaciones para el control ambiental al interior de la edificación (ver Figura 35).

Figura 34

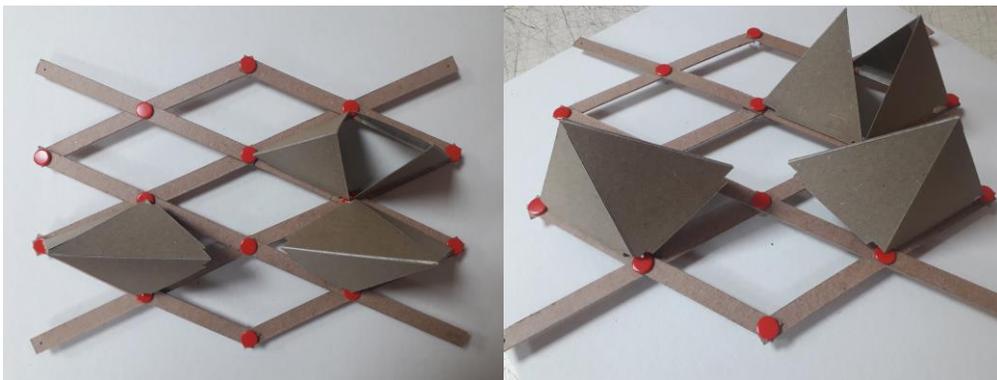
Módulo piramidal



Nota. Se cubre un módulo de tijeras con el volumen más básico que sería una pirámide desde cada arista, al cerrarse las tijeras, el cerramiento no coincide en las dimensiones por lo que debe separarse en partes o girarse sin corresponder a la estructura de soporte. Elaboración propia.

Figura 35

Agrupación con módulo piramidal

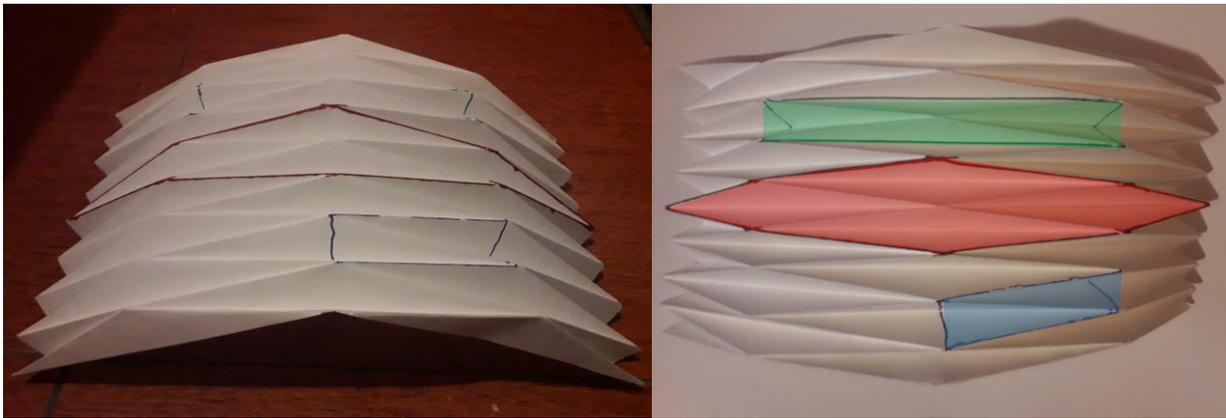


Nota. Al intentar agrupar este primer módulo básico se evidencia que cada pirámide queda como un elemento individual sin relación a la estructura de soporte ni los otros módulos. Elaboración propia.

Origami. Los siguientes modelos son una exploración del origami, a partir de la plegabilidad de una hoja de papel y las diferentes alternativas formales que dan (ver Figura 36 y 37). De estos modelos se puede concluir que la geometría específica de las plegaduras basadas en origami tienen la propiedad de plegarse o desplegarse a la vez en ambos sentidos, pero no dan la posibilidad de tener cambios de dimensión correspondientes a la plegabilidad del rombo.

Figura 36

Patrones de origami



Nota. Se identifican dentro de patrones tradicionales de origami diferentes figuras que se puedan adaptar a las redes, sin embargo, estos patrones se recogen uniformemente en todos los sentidos, lo cual es incompatible con las redes de tijeras identificadas. Elaboración propia.

Figura 37

Plegadura piramidal

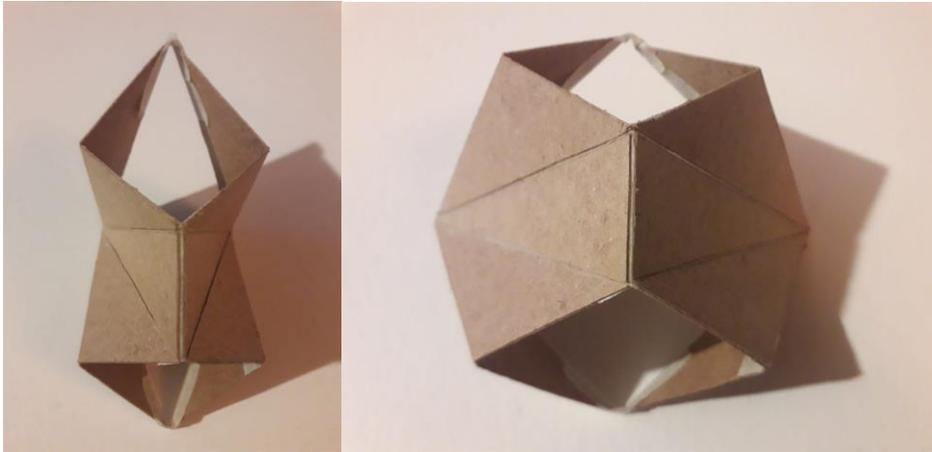


Nota. Otro patrón clásico del origami, genera un módulo que como inicio de plegabilidad desde un elemento plano, cambia de forma uniformemente, pero si se analizan los pliegues por separado, puede dar variaciones formales. Elaboración propia.

Modificaciones Geométricas. Con lo aprendido en las exploraciones anteriores, se realizaron modelos en los que se modificó la geometría de los modelos realizados (ver Figura 38), generando alternativas donde, a partir de los mismos principios de plegabilidad, se puedan dirigir los elementos a cambiar de dimensión según se requiere.

Figura 38

Modificaciones geométricas de las plegaduras

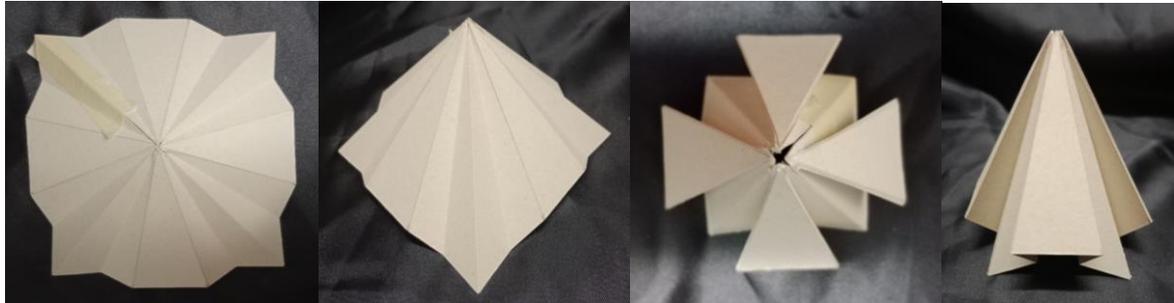


Nota. Partiendo de los patrones clásicos, se empezaron a hacer diseños propios, modificando esta geometría inicial, ya que en el caso de las plegaduras dinámicas no es un requisito que todas las partes salgan de una sola pieza plana como en el origami, pudiendo hacer acercamientos a los requerimientos de cambio de forma de la estructura. Elaboración propia.

Se llega a la conclusión de seguir trabajando con plegaduras denominadas piramidales en las cuales las caras convergen en un único vértice, y según el tipo de tijera en el que se apoya, puede cambiar de dimensión de igual forma o de forma contraria en cada sentido (ver Figura 39 y 40). A pesar de ser patrones inspirados en el origami, las dimensiones se pueden variar al desarrollarlas como plegaduras dinámicas, ya que los paneles son individuales y no deben salir de una sola pieza, ajustándose exactamente a las dimensiones de la estructura de soporte y los límites geométricos que se le quieran dar.

Figura 39

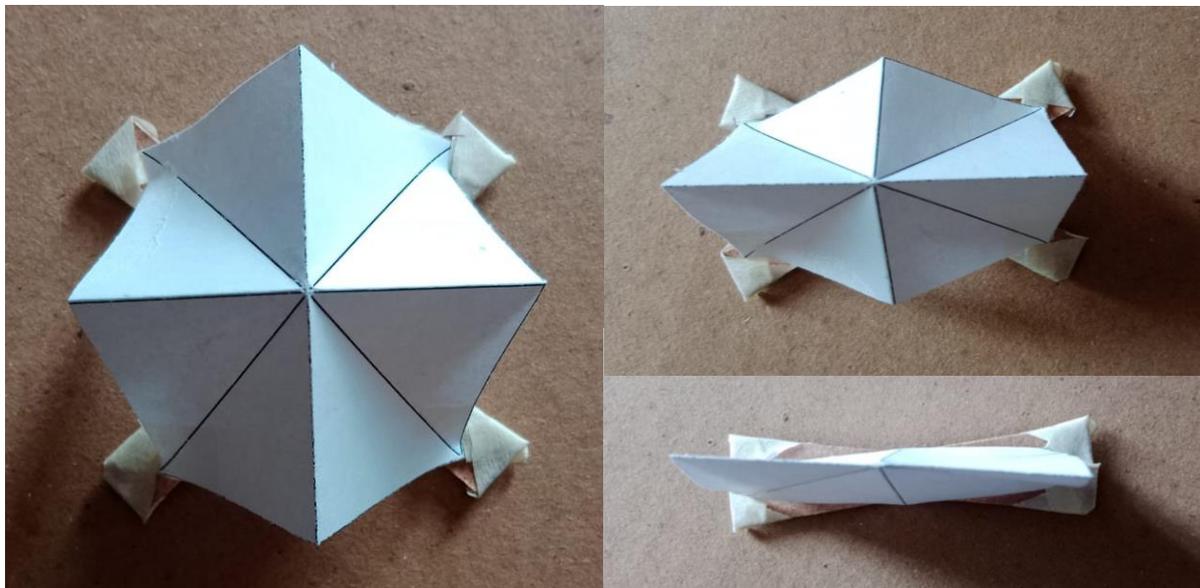
Plegadura piramidal de pliegue centralizado



Nota. Dentro de la exploración se plantea este modelo de plegadura, el cual genera un gran nivel de plegabilidad, manteniendo su geometría dentro del cuadrado que lo conforma en la base, lo cual lo hace funcional para agrupaciones en red. Elaboración propia.

Figura 40

Cambio de dirección de plegado



Nota. Al apoyar la plegadura piramidal en un módulo de tijera, se evidencia que es posible cumplir a través de la plegadura dinámica que el módulo crezca en un sentido y reduzca su dimensión en el otro como se requiere en las agrupaciones en un plano. Elaboración propia.

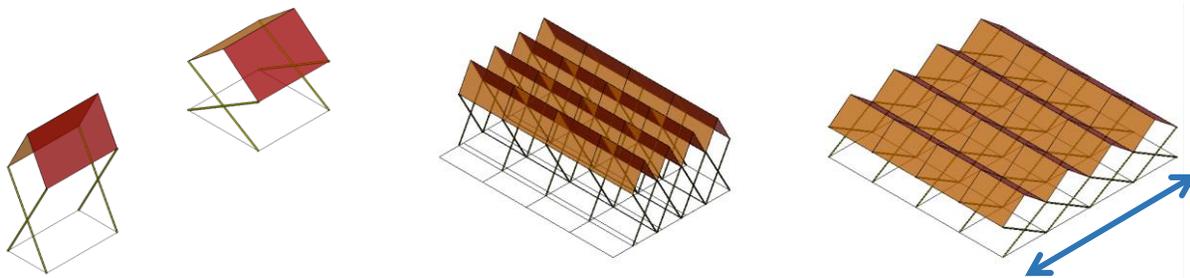
Agrupaciones

En esta etapa de exploración se hacen modelos en los que, a partir de las plegaduras estudiadas se hacen agrupaciones de tijeras en conjunto con los cerramientos con plegaduras, para ver su aplicabilidad en redes que puedan cubrir mayores luces.

Plegaduras en Agrupaciones en Paralelo. Para este tipo de agrupaciones, el requerimiento formal solo requiere que el cerramiento se despliegue en un sentido, generando el tipo de solución más sencilla (ver Figura 41), modulando las plegaduras con la estructura y pliegues en zigzag llegando a los mismos límites de despliegue de la estructura.

Figura 41

Plegaduras en agrupaciones en paralelo

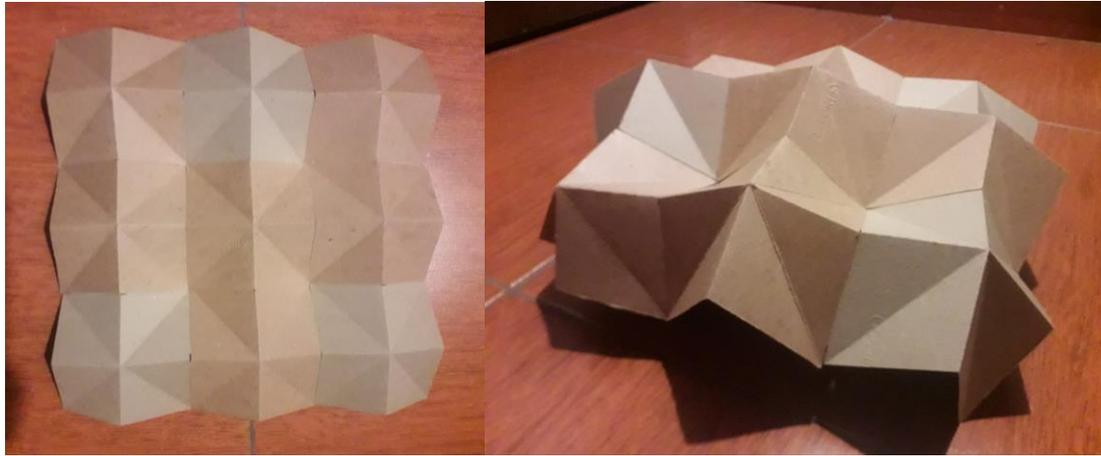


Nota. En la figura a la izquierda se observa el módulo básico para solucionar el cerramiento en una agrupación en paralelo con plegaduras que solo cambian de forma en un sentido, a la derecha los estados de transformación de la red. Elaboración propia.

Plegaduras en Agrupaciones en Red. En las agrupaciones en red se utilizaron las plegaduras piramidales reuniéndose de manera simétrica para cumplir con la reducción de dimensión en ambos sentidos de la red (ver Figura 42), sin embargo, al hacerlo con módulos conectados, el nivel de plegabilidad se ve reducido considerablemente, por lo que se incumple con uno de los principios funcionales que es la plegabilidad del sistema.

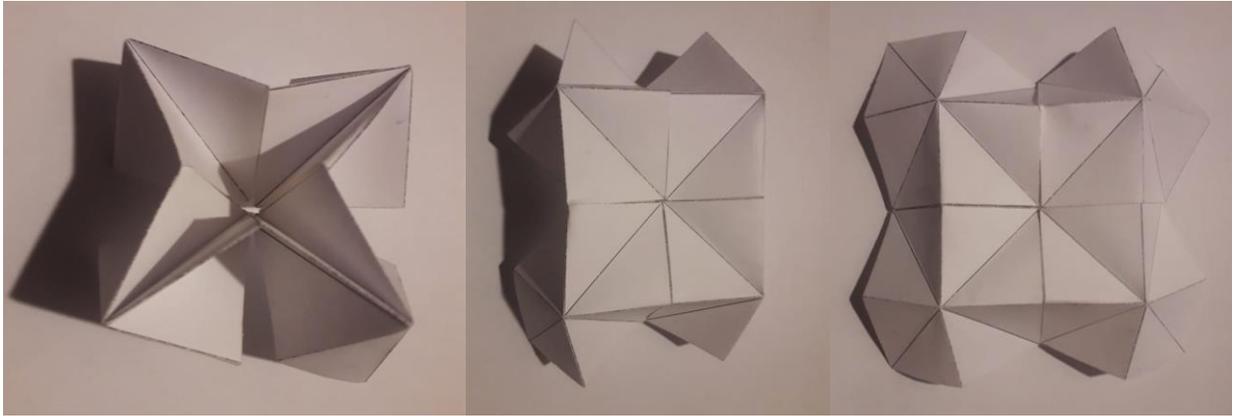
Figura 42

Plegaduras en agrupaciones en red

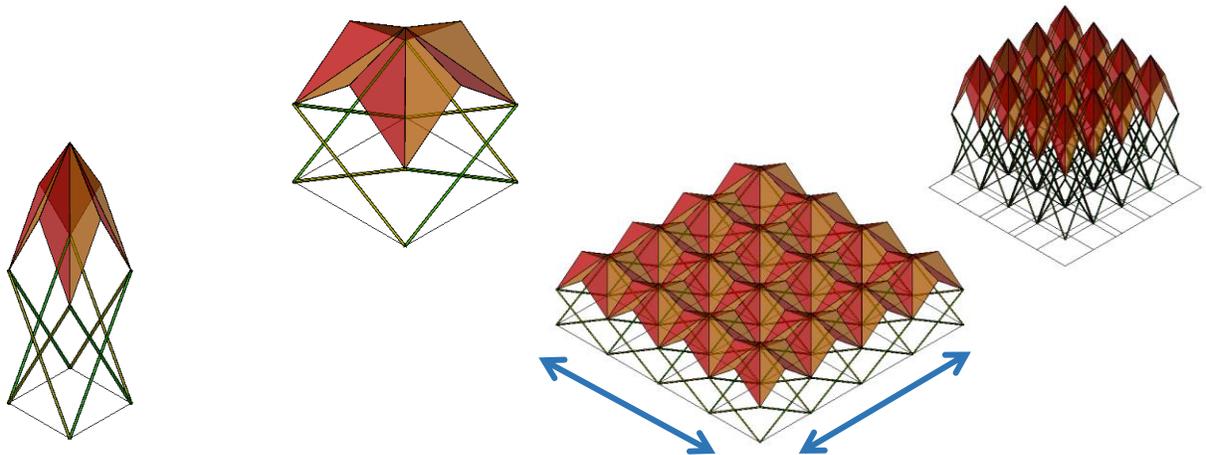


Nota. Se hizo un modelo de red con plegaduras piramidales, al intentar plegar el sistema en ambos sentidos correspondiendo al tipo de red de tijeras, la plegabilidad se ajusta a la estructura en la base, sin embargo los módulos siguen ocupando la mayor parte del área original. Elaboración propia.

De todas formas, se evidencia que para elementos individuales, estas plegaduras pueden dar solución al cerramiento cumpliendo con los requerimientos (ver Figura 43), o en redes donde se puedan traslapar los módulos y no haya restricciones muy fuertes de hermeticidad al interior (protección solar o para cortar ráfagas de viento, no como solución acústica o contra la lluvia, como se ve en la Figura 44).

Figura 43*Plegaduras en red para elementos puntuales*

Nota. Una agrupación de plegaduras piramidales pequeña (4 módulos), al manejar las plegaduras asimétricamente, logra tener un buen nivel de plegabilidad, que puede generar opciones como una correcta solución de cubierta para elementos puntuales de apoyo central. Elaboración propia.

Figura 44*Plegaduras en red, elementos aislados*

Nota. La plegadura del módulo piramidal conectada no funciona, pero haciendo traslapos puede dar una solución de cubierta en lugares donde no se requiera hermeticidad al interior del edificio con un buen nivel de plegabilidad. Elaboración propia.

Plegaduras en Agrupaciones en Plano. En este modelo se usaron redes de plegaduras piramidales, pero se recogieron los módulos de manera asimétrica en cada eje (ver Figura 45 y 46),

cumpliendo con la condición de cambio de forma aumentando de dimensión en un sentido y reduciéndose en el otro, manteniendo los altos niveles de plegabilidad de la estructura.

Figura 45

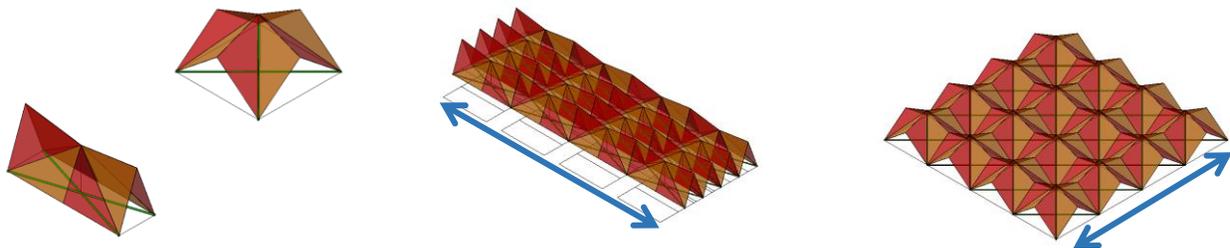
Plegaduras en agrupaciones en plano



Nota. La misma red de módulos piramidales se pliega en sentido contrario en cada dirección, generando lo que se requería, la red aumenta de dimensión en un sentido y se reduce en el otro, dando viabilidad al uso de esta red para este tipo de sistema de tijeras. Elaboración propia.

Figura 46

Plegaduras en agrupaciones en plano



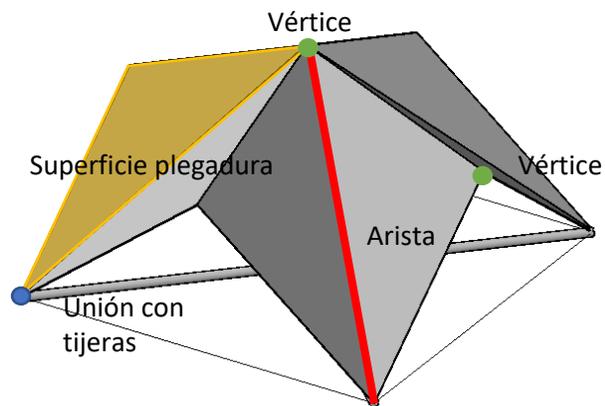
Nota. Modelo digital de red con plegaduras piramidales que crecen en un sentido y se reducen en el otro, pueden servir en redes desplegadas o adaptar la geometría para la solución de domos con tijeras anguladas ya que se cumple con la plegabilidad del rombo. Elaboración propia.

Modelos Constructivos

En esta etapa se analizan las características de movimiento de los elementos dentro de las tijeras y las plegaduras (ver Figuras 47 y 48), para poder diseñar en detalle los elementos que conforman el cerramiento, en particular la solución de los vértices de las plegaduras y las uniones de estas con las tijeras, así como las aristas entre las plegaduras, teniendo en cuenta las condiciones de estabilidad estructural, materialidad y de control ambiental requeridos. No se desarrolla en detalle los elementos de las tijeras, ya que estas se toman como objetos ciertos sobre los que ya se han realizado en otros proyectos (construidos y académicos) detalles específicos de cómo se construyen.

Figura 47

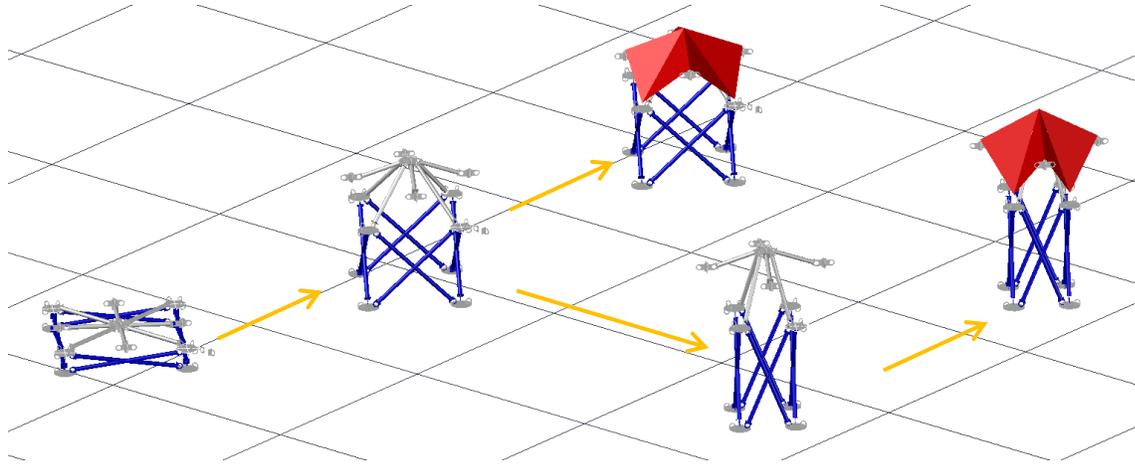
Elementos constitutivos



Nota. Se identifican los elementos a diseñar y detallar. Elaboración propia.

Figura 48

Análisis de movimiento de la estructura de tijera y la plegadura dinámica

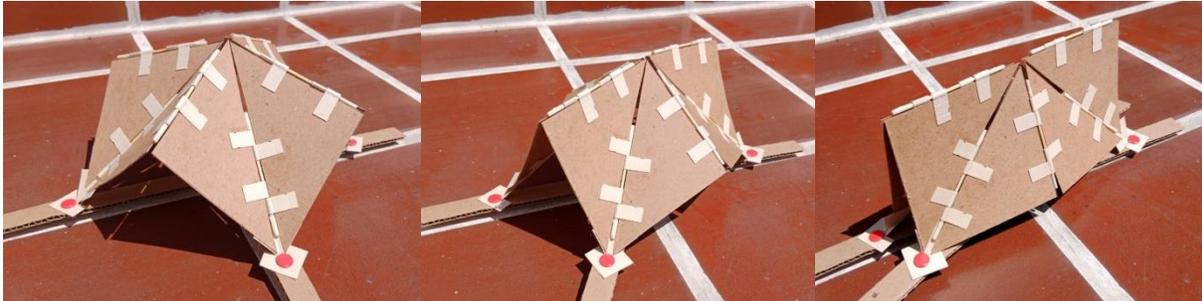


Nota. Como se evidenció en el análisis previo, las plegaduras adquieren rigidez estructural a través de los elementos de unión y la geometría, así que se estudia primero el movimiento entre las tijeras y una estructura de barras que podría ser el soporte de la plegadura dinámica evidenciando que hay puntos de giro en un solo sentido y en el caso de algunas uniones con las tijeras se genera el giro en diferentes ejes. Elaboración propia.

Al estudiar el comportamiento de las plegaduras dinámicas, se evidencia que ellas trabajan bien soportando el peso propio si los elementos de unión soportan estas cargas, el resto del trabajo estructural es ejercido por las tijeras, incluso el impulso para generar el movimiento, así que los elementos de unión entre paneles de la plegadura no necesitan ser barras interconectadas que transmitan esfuerzos entre ellas, solo que garanticen la unión de los elementos y giro entre ellos (ver Figura 49).

Figura 49

Modelo de plegadura dinámica con bisagras aisladas



Nota. En este modelo se apoyó el modelo de plegadura piramidal en la estructura de tijera, pero los elementos de unión en las aristas según se analizó no requieren ser continuos, ya que solo se ponen bisagras en puntos que garanticen la estabilidad de la forma con respecto al giro, el resultado es un movimiento adecuado, se concluye el requerimiento de elementos adicionales para la solución de las juntas. Elaboración propia.

Se inicia tras estas exploraciones formales y de trabajo estructural con el desarrollo del modelo constructivo de la propuesta, explorando otro punto que era la definición de los materiales idóneos que se pueden utilizar y la posibilidad de que estos sean de fácil consecución y que se puedan instalar, desmontar y cambiar con facilidad.

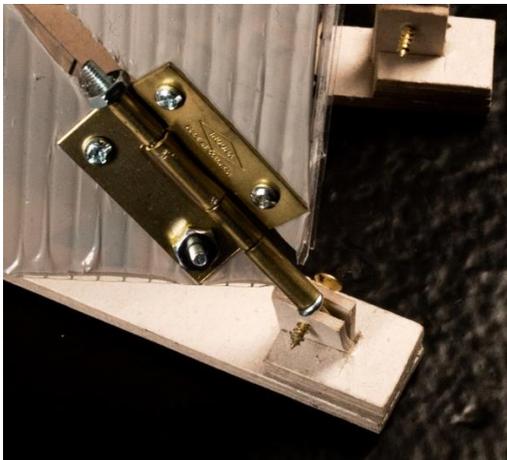
Solución de Vértices. Los primeros elementos son los vértices, encontrando 2 diferentes en este caso de plegaduras piramidales.

- El primer tipo de vértice está entre las tijeras y las plegaduras, estas se solucionan a través de articulaciones en un solo sentido (giro de la arista respecto al apoyo). Dependiendo del sentido de pliegue, las aristas pueden girar en otros ejes, pero teniendo en cuenta que las tijeras giran en conjunto y el punto de giro está en el mismo eje del centro de giro de las plegaduras, no se cambia la orientación del vértice respecto al apoyo y no se generan ángulos de giro adicionales en otros ejes.

- El material para estos elementos se plantea a través de platinas metálicas, generando las articulaciones con pasadores metálicos (tornillo-tuerca) y serían los únicos elementos que requieren un diseño específico que debe fabricarse a la medida (ver Figura 50).
- El segundo tipo es en los vértices superiores de las plegaduras y los vértices que unen módulos, pero como se evidenció con el modelo de bisagras, no se requiere un vértice que trabaje estructuralmente en estos puntos, ya que la movilidad y soporte lo garantizan las articulaciones de las aristas.

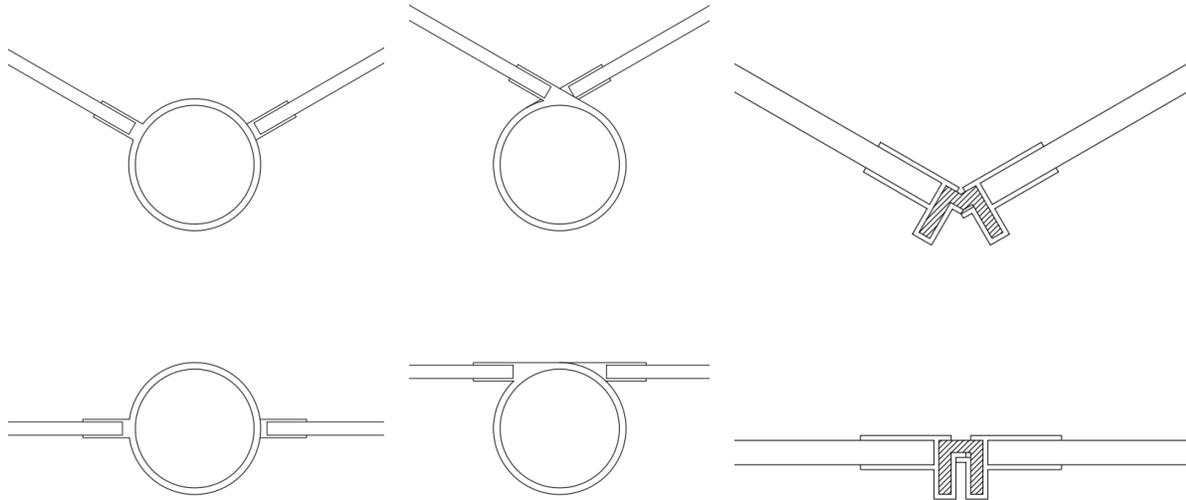
Figura 50

Vértice de unión tijera-plegadura



Nota. Al elemento de unión entre tijeras se añaden platinas que soportarán los elementos de unión con la plegadura a través de una unión mecánica articulada (tornillo-tuerca). Elaboración propia.

Solución de Aristas. Las bisagras que unen los paneles rígidos de las plegaduras deben tener resistencia, ya que constituyen el elemento de soporte estructural entre los mismos, y a la vez son articulaciones que garantizan el movimiento de la plegadura (ver Figura 51). Existen diferentes modelos de bisagras, las cuales pueden definir el límite de movimiento de los elementos y dar características como impermeabilidad.

Figura 51*Articulaciones*

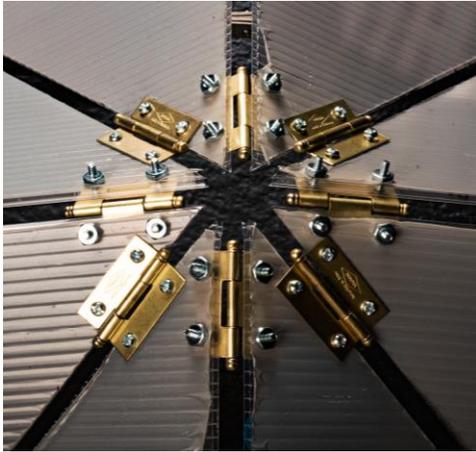
Nota. Diseños de bisagras para uniones entre paneles de plegaduras, en el último diseño se plantea una unión impermeable usando un empaque hermético al centro de la bisagra. Elaboración propia.

Para estas articulaciones pueden utilizarse bisagras comunes para puertas o cajones (las cuales se consiguen fácilmente en el mercado), ya que se propone una materialidad muy liviana para los paneles de las plegaduras y la carga por peso propio que deben soportar no es muy alta. La cantidad de bisagras y el tamaño de estas ya se definiría con un análisis estructural específico para cada caso.

Hay un tipo particular de bisagra que se usa en los puntos de unión con la estructura de tijera; se plantea una modificación del diseño tradicional de la bisagra, aumentando la longitud del eje y añadiendo un elemento adicional, teniendo tres puntos de unión en tres ángulos diferentes, dos a los paneles de la plegadura y uno adicional para la articulación del apoyo (ver Figura 52), se puede solucionar con los mismos elementos de la bisagra conseguida comercialmente, reemplazando el eje por un tornillo más largo y tuerca para asegurar la bisagra.

Figura 52

Bisagras unión vértice superior



Nota. Modelo de bisagra modificada con tres láminas que giran, las que constituyen la bisagra convencional unen los paneles de plegadura, soportándolas y permitiendo el giro, el elemento adicional permite el apoyo articulado con la estructura de tijera y soporta el peso del cerramiento. Elaboración propia.

Páneles de Plegadura. Son elementos rígidos que cumplen la función principal de cerramiento, protegiendo el interior de la edificación de elementos naturales como asoleación (iluminación y radiación térmica), lluvia, viento, ruido.

Se utilizan para el modelo constructivo paneles en lámina alveolar de policarbonato, material que se utiliza regularmente para solución de cubiertas livianas con resistencia a los elementos naturales, variedad de terminado que permite regular la cantidad de luz que ingresa y de fácil corte para adecuar a la forma requerida (ver Figura53).

Figura 53*Páneles*

Nota. Uso de páneles de cerramiento en lámina de policarbonato. Elaboración propia.

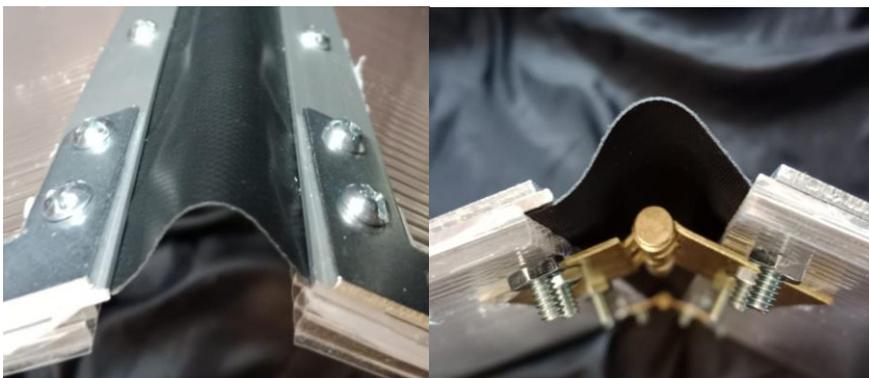
Solución de Juntas. En caso que se requiera un ambiente controlado, las bisagras y uniones deben ser herméticas, de lo contrario, se requieren elementos adicionales flexibles que garanticen el control ambiental al interior del edificio.

Se exploran alternativas para solucionar este punto, basadas en referencias comerciales existentes de bisagras impermeables o elementos flexibles para sellar las juntas entre los páneles (ver Figura 54). Son elementos metálicos unidos a través de tornillos o remaches a la superficie de los páneles a lo largo de las aristas y garantizando la hermeticidad y cumpliendo la función de refuerzo estructural que mantiene la forma de los páneles, y elementos flexibles de material sintético (plástico o caucho) que se ajustan al cambio de ángulo (ver Figura 55).

Figura 54*Bisagras impermeables*

Nota. Ejemplos comerciales de bisagras con elementos que garantizan la impermeabilidad de la unión. Tomado de “This is our galley hinge”. K. García. s.f. (<https://co.pinterest.com/pin/125819383316770053/>)

En los vértices de la plegadura si se requieren elementos diseñados específicamente para la solución de las juntas, usando el mismo material flexible de las juntas entre aristas, pero abarcando una superficie mayor, desarrollada geométricamente igual que la plegadura, para que el cambio de forma sea acorde al movimiento de los paneles (ver Figura 55).

Figura 55*Modelo de junta impermeable*

Nota. Modelo de junta impermeable aplicada al modelo constructivo de plegadura dinámica. Elaboración propia.

Modelo Final de Plegadura. Utilizando los elementos constitutivos planteados, se aplican en la realización del modelo a escala que muestra las características constructivas que se pueden implementar en la realización a escala real de este tipo de cerramiento (ver Figura 56).

Figura 56

Modelo constructivo de plegadura dinámica



Nota. Modelo constructivo de plegadura dinámica, se aplican los materiales propuestos mostrando cómo se monta el módulo y cumple con los requisitos propuestos. Elaboración propia.

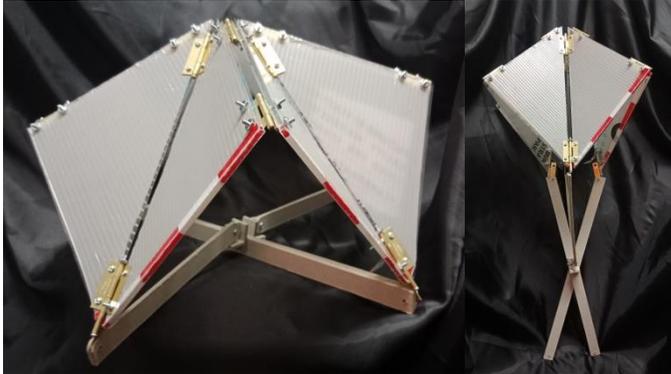
Aplicación de la Propuesta de Cerramiento Sobre las Estructuras de Tijeras

Se comprueban los planteamientos realizados respecto a la compatibilidad del sistema de cerramiento planteado a través de plegaduras dinámicas en los diferentes tipos de tijeras y agrupaciones de las mismas.

Cerramiento en Agrupación Lineal en Paralelo. Se plantea el uso de la plegadura piramidal del modelo en una sola tijera, requiere de elementos en la dirección contraria a la tijera para dar estabilidad así como controlar y limitar el movimiento de la plegadura (ver Figura 57).

Figura 57

Modelo de cerramiento perpendicular a la estructura de tijera

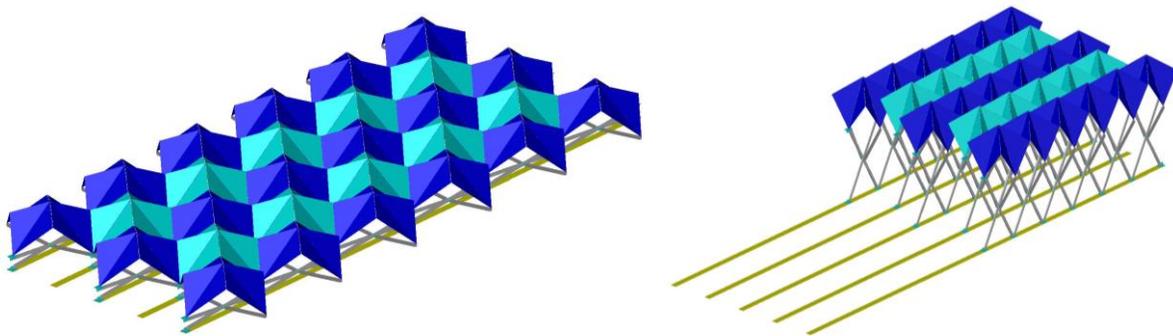


Nota. Aplicación del modelo constructivo con un módulo de tijera que puede agruparse en línea. Elaboración propia.

En la agrupación se manejan como elementos individuales, cada uno ocupando el espacio de una sola tijera, pero al desplegarse, la red cubre la superficie completa como se aprecia en la Figura 58.

Figura 58

Modelo de cerramiento en agrupación en paralelo



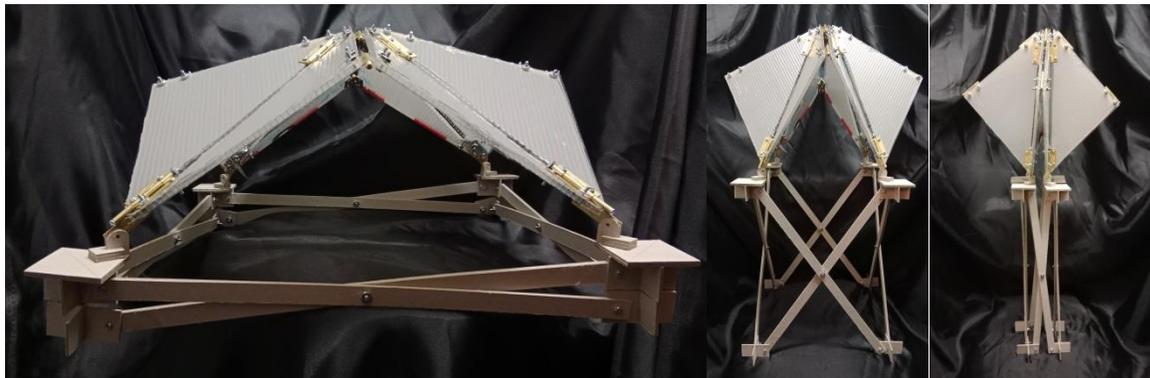
Nota. En este modelo se evidencia cómo funciona el modelo de plegadura propuesto como cerramiento en este tipo de agrupaciones, como elementos individuales que al abrir la estructura cubren la superficie completa de la red. Elaboración propia.

Cerramiento en Agrupación en Red. Se puede usar el modelo como elemento individual, ocupando el espacio definido por el polígono base de la red (ver Figura 59), al poner varios elementos en

la red, la forma de plegado hace que los módulos individuales de plegadura se choquen, ya que geométricamente se salen del módulo, por lo que en este tipo de agrupación tocaría que se pongan los módulos superpuestos a diferentes alturas, y así poder evitar esta interferencia, funcionando para control de iluminación y reducir la carga del viento sin garantizar hermeticidad al interior.

Figura 59

Modelo de cerramiento en módulo de agrupación en red

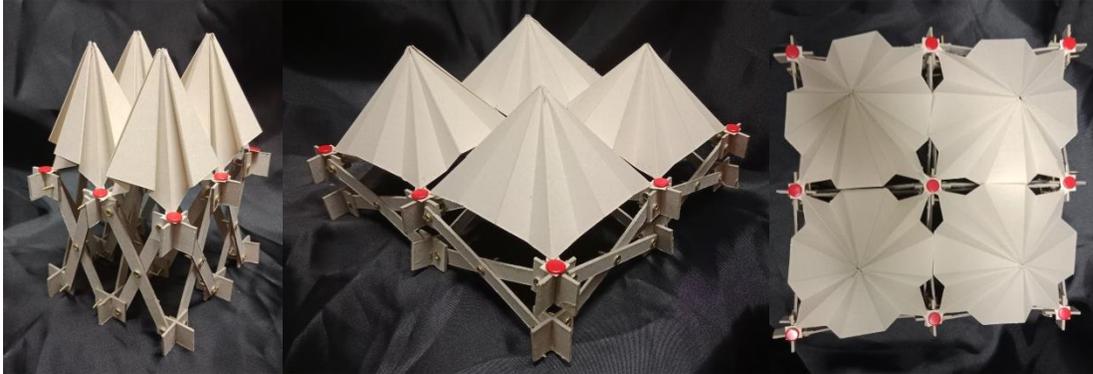


Nota. En este modelo se puede ver cómo, a partir de los mismos elementos y la misma plegadura como cerramiento, se da solución a la integración de estructura de tijera con el cerramiento dinámico. Elaboración propia.

Se hace una segunda aproximación en la que se utiliza el otro modelo de plegadura piramidal planteado, el cual da un mayor nivel de plegabilidad y a la vez un nivel completo de cerramiento de la superficie al desplegar la red como se ve en la Figura 60.

Figura 60

Modelo de cerramiento en agrupación en red (segunda propuesta)

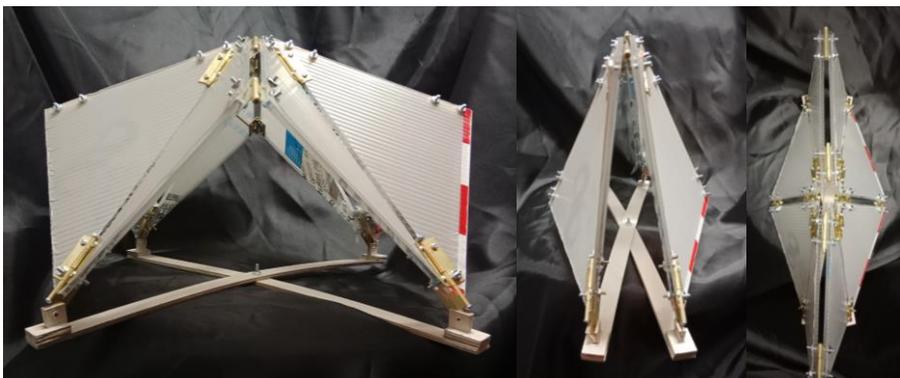


Nota. Utilizando el otro modelo propuesto de plegadura piramidal se logra la plegabilidad deseada sin haber interferencias entre los módulos y un cubrimiento total de la superficie al abrir la estructura. Elaboración propia.

Cerramiento en Agrupación en Plano. En este tipo de red al plegar el cerramiento, la geometría hace que cada plegadura se salga de cada módulo estructural (ver Figura 61), por lo que también funcionan intercalando plegaduras a diferente altura evitando choques (ver Figura 62) o modulando las tijeras para que desarrollen una curva al cerrarse.

Figura 61

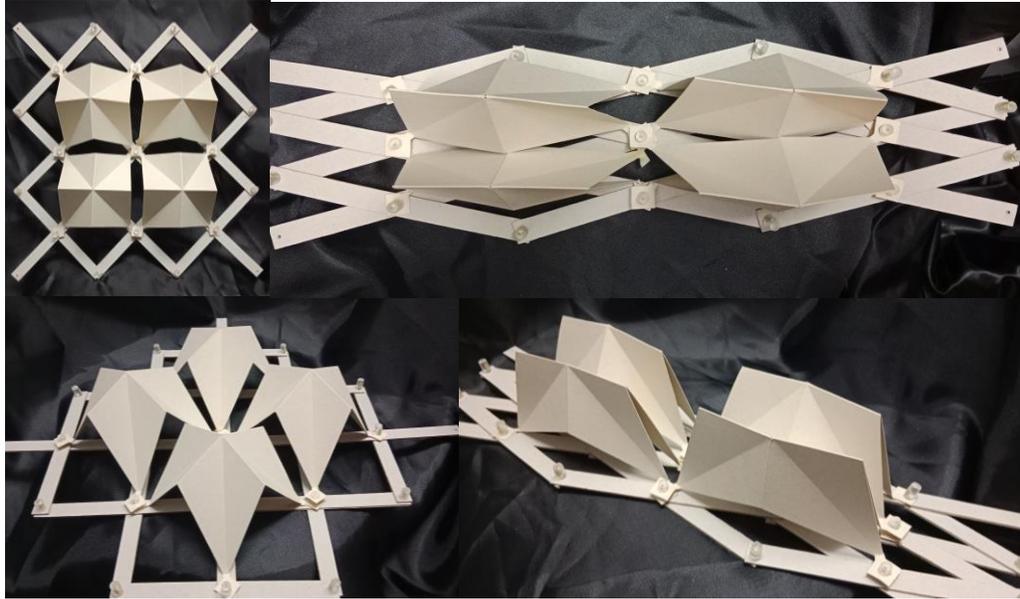
Modelo de cerramiento en módulo de tijera en un plano



Nota. Se usa el mismo modelo constructivo aplicado a la estructura de tijera, en este caso en paralelo al cerramiento, generando un tipo diferente de plegado, pero de igual manera responde al movimiento de la estructura. Elaboración propia.

Figura 62

Modelo de cerramiento en agrupación en plano



Nota. Modelo de agrupación en plano, las plegaduras varían en altura para sobreponerse y evitar interferencias en el movimiento de cada módulo de cerramiento. Elaboración propia.

La misma geometría de esta agrupación es la aplicable a domos con tijeras anguladas, solo que en ese caso tanto las tijeras como la geometría de la plegadura no es completamente simétrica.

Conclusiones y Recomendaciones

- Es viable el uso de plegaduras dinámicas como sistema de cerramiento para estructuras dinámicas tipo tijera; en los modelos finales se emplearon dos tipos de plegaduras de tipo piramidal (convergentes en un punto central) que daban respuesta al cambio de forma de la estructura.
- Dada la adaptabilidad de las plegaduras dinámicas a cambios de forma, en futuros estudios se puede experimentar con otras variaciones geométricas de los modelos de plegaduras dinámicas que potencialmente también den respuesta a los requerimientos de cerramiento de las estructuras tipo tijera, así como variedades formales y estéticas.
- Las plegaduras dinámicas responden adecuadamente a diferentes tipos de modelos de tijeras, tanto para elementos individuales como agrupaciones de las mismas, las cuales se pueden trabajar a gran escala y para grandes luces.
- El cerramiento por medio de plegaduras dinámicas no requiere mecanismos adicionales para generar el movimiento, la estructura de soporte por medio de tijeras es la que mueve el cerramiento a la par. Esto constituye una ventaja, ya que solo se requiere diseñar elementos de unión que soporten el peso del cerramiento y garanticen el movimiento deseado sin aportar mayor peso a la estructura. Los mecanismos para mover estructuras de tijera que se han desarrollado en los estudios previos de este tipo de estructuras (poleas, motores, rieles, incluso movimiento de forma manual) son suficientes para que funcione todo.
- Los modelos planteados de plegaduras dinámicas como cerramiento para estructuras tipo tijera pueden aplicarse como solución a requerimientos como control de iluminación, protección de la radiación solar y el viento, así como adecuación de las condiciones acústicas al interior de las edificaciones, también contra la lluvia en agrupaciones pequeñas o

- elementos individuales. En futuras exploraciones se podría avanzar en el diseño de detalles que den solución a requerimientos adicionales como hermeticidad, aislamiento térmico y acústico.
- Un punto fundamental en el desarrollo del proyecto era mostrar cómo se puede construir el cerramiento con materiales livianos, los cuales no afectan significativamente el trabajo estructural de las tijeras, salvo por cargas del peso propio de los materiales. En propuestas futuras pueden utilizarse otros materiales que en caso de ser más pesados, implicarían un trabajo de ingeniería estructural para ajustar el dimensionamiento de los elementos de las tijeras para soportar el cambio de carga o aumento de escala en proyectos de grandes luces.
 - Las formas y dimensiones de los elementos constitutivos de los sistemas de cerramiento para estructuras dinámicas tipo tijera varían según el diseño específico en cada caso.

Bibliografía

- Arch2o. (s. f.). Al Bahr Towers | Aedas. <https://www.arch2o.com/al-bahr-towers-aedas/>
- ArchDaily. (2017). ORIGAMI interviene Logroño con una estructura que se auto sostiene para Concéntrico 03. ArchDaily Colombia. <https://www.archdaily.co/co/873269/origami-interviene-logrono-con-una-estructura-que-se-autosostiene-para-concentrico-03>
- Avellaneda, O. (2020). *DISEÑO PARAMÉTRICO DE LAS ESTRUCTURAS DESPLEGABLES Control Límite de Movimiento* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio Institucional <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/328197?show=full>
- arqu.com.mx Buscador de Arquitectura. (2013). El homenaje construido de Zaha Hadid. <http://noticias.arqu.com.mx/Detalles/15551.html>
- Coca, S. (2014). *Planteamiento de uniones dinámicas para elementos tubulares con base en la morfología de sistemas de superficie activa (Plegaduras)* [Tesis maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59292>
- Deleo, A., O'Neil, J., Yasuda, H., Salviato, M., & Yang, J. (2020). Origami-based deployable structures made of carbon fiber reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, (191), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108060>
- Duque, K. (2011). Clásicos de Arquitectura: Restaurante Los Manantiales / Félix Candela. <https://www.archdaily.co/co/02-95859/clasicos-de-arquitectura-restaurante-los-manantiales-felix-candela>
- Fenci, G., & Currie, N. (2017). Deployable structures classification: A review. *International Journal of Space Structures*, (32), 1-19. <http://dx.doi.org/10.1177/0266351117711290>
- Fresno, M. (2015). CUBIERTA RECÍPROCA. <https://arquitectutecnica.com/2015/06/08/cubierta-reciproca/>

- Friedman, N. (2012). *Investigation of highly flexible, deployable structures: Review, modelling, control, experiments and application* [Tesis doctoral, Budapest University of Technology and Economics].
Repositorio Institucional <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00675481/file/Friedman2011.pdf>
- García, K. (s.f.) This is our galley hinge. (<https://co.pinterest.com/pin/125819383316770053/>)
- Giesecke, K. (2004). *Deployable Structures Inspired by the Origami Art* [Tesis doctoral]. Massachusetts Institute of Technology.
- gmp. (s. f.). Stuttgart Airport. <https://www.gmp.de/en/projects/548/stuttgart-airport>
- Hoberman Associates. (s. f.). HOBERMAN SPHERE TOY.
<https://www.hoberman.com/portfolio/hoberman-sphere-toy/>
- Hoberman Associates. (s. f.). IRIS DOME AT MOMA. <https://www.hoberman.com/portfolio/iris-dome-at-moma/>
- Howarth, D. (2018). Atlanta stadium by HOK hosts NFL games under retractable «petals».
<https://www.dezeen.com/2018/01/31/mercedes-benz-stadium-atlanta-georgia-hok-american-football-nfl-retractable-roof-super-bowl-liiii/>
- Koumar, A. (2016). Aushim Koumar. <https://www.vub.be/arch/people/aushim-koumar>
- Maurina, A., & Prastyatama, B. (2019). Bamboo Deployable Structural Systems: An Exploration Study in Responding to Rapid Alteration Challenges. *Advances in Engineering Research*, (156), 56-64.
<https://doi.org/10.2991/senvar-18.2019.10>
- Melancon, D., Gorissen, B., García-Mora, C., Hoberman, C., & Bertoldi, K. (2021). Multistable inflatable origami structures at the metre scale. *Nature*, (592), 545-550. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03407-4>
- Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Parajó, C. (2020). *Análisis de superficies plegadas en la arquitectura. Parametrización y desarrollo.*

[Proyecto Fin de Carrera/Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio Institucional
<https://oa.upm.es/58068/>

Parametric House. (s. f.). Origami. Parametric House. <https://parametrichouse.com/tag/origami/>

Rhode-Barbarigos, L. (2012). *An Active Deployable Tensegrity Structure* [Tesis doctoral, École Polytechnique Federale de Lausanne].

https://www.academia.edu/15994241/An_Active_Deployable_Tensegrity_Structure

Ródenas, M., Jiménez, P., Pérez, A., Peña, M., & García, P. (2019). *Estructuras desplegables. De los prototipos al diseño paramétrico.* Universidad Politécnica de Cartagena.

<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8294/edp.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rodríguez, C. (2000). *Arquitectura Metamórfica.* Universidad Nacional de Colombia.

Salvadori, M., & Heller, R. (1998). *Estructuras Para Arquitectos.* CP67.

Sánchez, N. (2014). Avanza la obra para el primer estadio con techo corredizo en el país.

https://www.clarin.com/ciudades/estadio-techado-parque-roca-primero-pais_0_B1JUZFvqPmx.html

Sánchez-Sánchez, J., Escrig, F., & Rodríguez-León, M. (2014). Reciprocal Tree-Like Fractal Structures.

Nexus Network Journal, (16), 135-150. <https://doi.org/10.1007/s00004-014-0182-z>

SBP Schlaich Bergermann Partner. (2022). Al Janoub Stadium. <https://www.sbp.de/en/project/al-janoub-stadium/>

Swaminathan, S., Rivera, M., Kang, R., Luo, Z., Bugra, K., & Hudson, S. (2019). Input, Output and

Construction Methods for Custom Fabrication of Room-Scale Deployable Pneumatic Structures.

Mob. Wearable Ubiquitous Technology, (3), 1-17. <https://doi.org/10.1145/3328933>

Torres, N. (2021). *Domos desplegadas. Método geométrico a partir de polígonos regulares*. [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya].

<https://www.tdx.cat/handle/10803/674741?locale-attribute=en#page=562>

Torres, N., & De Matos, H. (2018). Estructuras desplegadas: Sistemas tipo tijera. *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, (24), 16-68. <https://doi.org/10.5752/P.2316-1752.2017v24n35p16>

University of Cambridge. (s. f.). Deployable Structures. <http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/now/deployable.html>

Vergauwen, A., & De Temmerman, N. (2012). Analysing The Applicability Of Deployable Scissor Structures In Responsive Building Skins. *High Performance Structures and Materials VI*, (124), 493-504.

https://www.researchgate.net/publication/268191876_Analysing_the_applicability_of_deployable_scissor_structures_in_responsive_building_skins

Villate, M. (2008). *Estructuras no convencionales en arquitectura*. Universidad Nacional de Colombia.

VUB. (s. f.). Aushim Koumar. <https://www.vub.be/arch/people/aushim-koumar>

Wikiarquitectura. (s. f.). Estadio Olímpico de Múnich. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/estadio-olimpico-de-munich/>

Anexos

Anexo 1. Páneles