



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en *Tecnología de la Arquitectura,
Edificación y Urbanismo*

DISEÑO PARAMÉTRICO DE LAS ESTRUCTURAS DESPLEGABLES

Control Límite de Movimiento

Tesis presentada para obtener el título de Doctor de la Universitat
Politécnica de Catalunya por:

Omar Fabrisio Avellaneda López

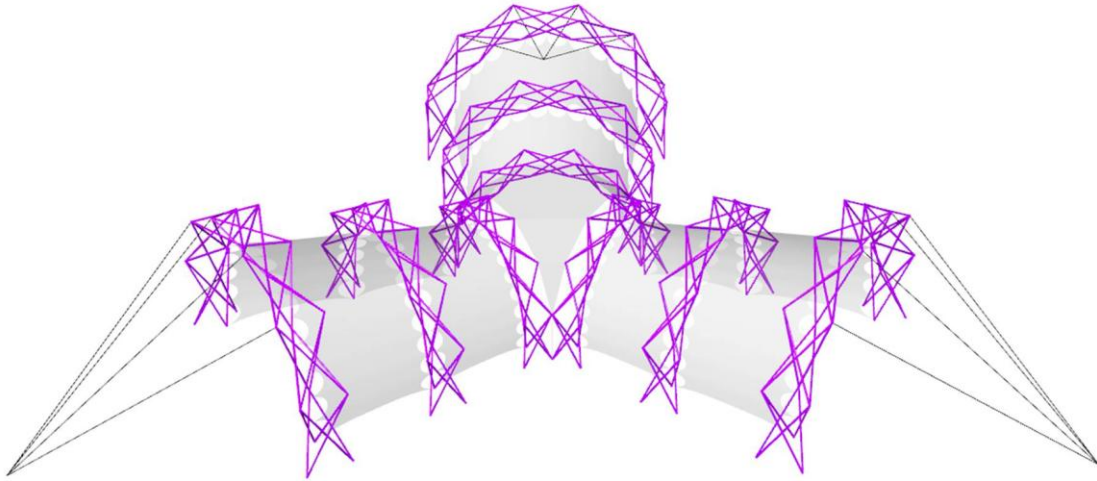
Dirigida por:

Dr. Arq. Ramón Sastre Sastre

Dr. Arq. Xavier Gimferrer Vilaplana

Departamento de Tecnología de la Arquitectura. Escuela Técnica
Superior de Arquitectura del Valles, ETSAV.

Barcelona. Marzo 2020



Agradecimientos;

A mi Director y Codirector de tesis, Dr. Arq. Ramón Sastre y Dr. Arq. Xavier Gimferrer por el gran aporte de sus conocimientos para conducir por buen camino esta investigación y el presente documento. También por compartir sus experiencias mas allá del ámbito académico logrando fortalecer mi formación integra durante este tiempo.

A mi compañera de vida Sally, quien acompaño muchas de mis aventuras académicas animándome a ir por más. Y aportando sus conocimientos audiovisuales.

A Diana, Natalia, Juan, Marisela y Hugo; compañeros del grupo de investigación SMiA que con sus aportes y experiencias contribuyeron al desarrollo de los workshops que forman parte de esta investigación.

Quiero agradecer a mis padres Stella y Pedro, y a mis hermanos Carlos y Pedro M; que fueron el pilar de este recorrido y me brindaron su apoyo y confianza en todo momento. Ustedes son parte de este logro. Y a toda mi familia que desde a distancia me han hecho sentir su cariño y sooporte en este maravilloso recorrido.

“You never change things by fighting the existing reality. To change something, build a new model that makes the existing model obsolete.”

— **Buckminster Fuller**

Resumen

Las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas tienen la virtud de ser ligeras, modulares y transformables. Así las definió el arquitecto Felix Escrig, quien nos dejó un legado fantástico sobre estas estructuras. Desde el grupo de investigación SMiA (Structural Morphology in Architecture) y específicamente desde esta investigación se han desarrollado sistemas desplegados enfocados en una aplicación real. Con ayuda de herramientas digitales como el diseño paramétrico y procesos de fabricación digital este documento describe una metodología de diseño de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas y desarrolla un método gráfico por tracción para hacer simulaciones de control de movimiento de estas estructuras. Para finalmente aplicarlos a dos casos de estudio pasando por los procesos de diseño, fabricación y montaje de prototipos a escala 1:1.

Una primera parte de esta investigación, describe los trabajos más notables y característicos en el campo de las estructuras desplegadas, centrándose en las barras rectas articuladas. Punto de partida en el que se propone hacer una descripción geométrica de los sistemas desplegados con barras rectas articuladas desde la unidad desplegable más simple hasta geometrías y agrupaciones desplegadas complejas. Con ayuda software como *Rhinoceros + Grasshopper* se hace una biblioteca de algoritmos con estructuras desplegadas. Biblioteca que sirve para hacer una propuesta de clasificación de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas.

La segunda parte de este documento propone un método de simulación por tracción para el control límite de movimiento de los sistemas desplegados. Con la ayuda de *Grasshopper + Kangaroo* se desarrolla un algoritmo que permite controlar la posición final de uso de las estructuras desplegadas, y hacer simulaciones de movimiento. El modelo permite controlar y ajustar las dimensiones, asimetrías y ángulos de incidencia para los sistemas desplegados. Así como prever el diseño de los elementos de control límite de movimiento.

Finalmente en la tercera parte de la investigación se proponen dos casos de estudio con el objetivo de aplicar las estrategias de diseño paramétrico y el método de simulación por tracción para controlar la estabilidad de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas. El alcance final es la construcción de prototipos a escala 1:1. El primer caso de estudio es el D30, domo desplegable de 30 metros cuadrados. Y el segundo caso de estudio es el pabellón Vertex, estructura de 90 metros cuadrados formado por 12 arcos desplegados de sección triangular.

El propósito de esta investigación es dar el salto a la construcción de prototipos a escala real con el fin de dar soluciones constructivas a los sistemas desplegados, potenciando su aplicación en la arquitectura.

Palabras claves: Estructuras desplegadas, Diseño paramétrico, Geometría activa, Control límite de movimiento, Fabricación digital, Fabricación y montaje, Prototipos.

Abstract

Deployable structures with articulated straight bars have the virtue of being light, modular, and transformable. Researches around the world have studied those well-known features, for example the architect Felix Escrig, who left us a fantastic legacy about those structures. At Polytechnic University of Catalonia, SMiA (Structural Morphology in Architecture) researchers have developed novel deployable structures, focusing on real-world applications. In this document, I describe a design method to create deployable structures applying digital tools and parametric design software. Several study cases highlight the design process, development, and assembly of each prototype using a 1:1 scale.

In the first section of this document, I highlight relevant deployable structure designs and its features, with attention to articulated straight bars. Then, a geometrical description of deployable systems with articulated straight bars is presented, from its most basic deployable unit to more complex systems. Using software such as Rhinoceros + Grasshopper, I provide a library of algorithms to develop deployable structures. This library offers a classification method for deployable structures with articulated straight bars.

A tensile simulation method for motion limit control of deployable systems is presented in the second section of the document. Using Grasshopper + Kangaroo, I develop an algorithm to control the final position of a deployable structure and simulate its motion. The method allows for dimensional adjustments, asymmetry, and incidence angles for deployable systems. The method also provides the means to assess the design of elements related to motion limit control.

Finally, in third section of this document, I describe two study cases applying parametric design strategies and the tensile simulation method to control the stability of deployable structures with articulated straight bars. The goal was to assembly prototypes using a 1:1 scale. The first study case is D30, a deployable dome of 30 m². The second case is a Vertex pavilion, a structure of 90 m², made of 12 deployable arcs with triangular cross-section.

The purpose of this research is to provide a framework for the construction of real-scale deployable structure prototypes, offering a solution to manufacturing issues and highlighting its application to architectural design.

Keywords: Deployable structures, Parametric design, Active geometry, Limited motion control, Digital design, Manufacturing and assembly, Prototypes.

Índice

Agradecimientos	VI
Resumen	VII
Abstract	VII
CAPITULO 01	
Introducción	2
Motivación de la Investigación	4
Objetivos	
Objetivo horizonte	6
Objetivos específicos	6
Justificación	7
Aplicaciones Potenciales	8
Ventajas y Fortalezas	9
Debilidades y Oportunidades	10
Hipótesis	11
Metodología	12
CAPITULO 02	
Estado del Arte de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas	14
Antecedentes	14
Estructuras Desplegables del Siglo XX	17
Richard Buckminster Fuller	17
Emilio Pérez Piñero	18
Feliz Escrig Pallares	18
Carlos E. Hernández	19
Charis Gantes	20
Niels De Temmerman	21
Definición de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas	22
Grados de Libertad	22
Clasificación de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas (EDBRA)	24
Clasificación por tipo de movimiento	24
Clasificación por transformación	25
Clasificación por tipo de superficie	26
Clasificación por tipo de curva	27
Investigaciones Recientes - Estado del Arte	29
Diseño Paramétrico	29
Transform - Grupo de Investigación	30
Método de Discretización para Barras Iguales	31
Diseño Digital de las Mallas de Tijeras Desplegables	32
Modificación de patrones y geometría en los sistemas desplegados	33
Prototipos	35
Infraestructura de Intervención Urbana	36
Sistemas Desplegables de Emergencia	37

Escenario Desplegable	39
Discusión del Estado del Arte	41
CAPITULO 03	
Diseño Paramétrico de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas	43
Diseño y Parametría	43
Construcción Geométrica y Paramétrica de las EDBRA	45
Unidad Simple	45
Restricciones de movimiento	47
Parámetros de diseño y condiciones de contorno	47
Parametrización de superficies	48
Parámetros y algoritmos	49
Sistemas Axiales	50
Sistemas Axiales Rectos	50
Sistemas Axiales Curvos	52
Proyección del sistema axial	54
Superficies axiales planas desplegadas	55
Superficies monocásticas desplegadas	56
Sistemas axiales asimétricos especiales	58
Sistemas Biaxiales	60
Agrupación lineal - Torres desplegadas	61
Superficies planas biaxiales	61
Superficies monocásticas desplegadas biaxiales	62
Superficies sinclásticas desplegadas biaxiales	64
Superficies antielásticas desplegadas biaxiales	66
Sistemas Triaxiales	70
Agrupación lineal - Torres desplegadas	70
Superficies triaxiales planas desplegadas	72
Agrupaciones especiales simétricas	74
Superficies monocásticas desplegadas triaxiales	75
Modulo triaxial asimétrico	75
Arco triaxial asimétrico	76
Modulo triaxial hexagonal asimétrico	78
Superficies sinclásticas desplegadas triaxiales	80
Domos desplegadas	82
Superficies antielásticas desplegadas triaxiales	87
Sistemas desplegadas especiales	89
Diseño Vertex	90
Diseño Torus12	91
Diseño Boom	92
Prismas y sólidos desplegadas	94
Clasificación de las EDBRA	101
Discusión del Diseño Paramétrico de las EDBRA	103

CAPITULO 04

Control de Movimiento Límite y Prototipado de las EDBRA	106
Método de Control de Movimiento por Tracción	108
Estabilidad y Equilibrio de las EDBRA	113
Sistemas Desplegables Cerrados	113
Sistemas Desplegables Abiertos	116
Maquetas de trabajo y modelos físicos	118
Materiales y detalles constructivos	120
Modelado mecánico 3d	122
Unión articulada compuesta	122
Módulo Triangular	124
Módulo Cuadrado	127
Módulo Hexagonal	130
Prototipado de módulos desplegados	133
Módulo Triangular Desplegable	135
Módulo Cuadrado Desplegable	135
Módulo Hexagonal Desplegable	135
Elementos de Bloqueo y Control de Movimiento Límite	136
Discusión del Método de Control de Movimiento y Prototipado	140

CAPITULO 05

Casos de estudio de las EDBRA	142
Introducción	142
Caso de estudio 01 - Sistemas Desplegables Cerrados	144
Construcción Geométrica del Domo D30	144
Diseño Paramétrico del Domo Desplegable D30	145
Condiciones Constructivas y de Materiales	147
Descripción Geométrica del Domo D30	148
Análisis de Tensiones y Deformaciones del Domo D30	149
Prototipo Domo Desplegable D30	151
Sistema de Control Límite de Movimiento Domo D30	153
Geometrías Alternativas Domo D30	155
Caso de estudio 02 - Sistemas Desplegables Abiertos	157
Construcción Geométrica del arco desplegable	158
Diseño Paramétrico del Arco Desplegable	159
Condiciones Constructivas y de Materiales	161
Descripción Geométrica del Vertex	162
Modelo Grafico de Control de Movimiento por Tracción	166
Análisis de Tensiones y Deformaciones del arco desplegable	167
Prototipo Pabellón Vertex	171
Sistemas de Control de Movimiento para el Pabellón Vertex	174
Geometrías alternativas con arcos desplegados	178
Discusión de los Casos de Estudio	184

CAPITULO 06	
Conclusiones y Futuras Investigaciones Generales	186
Diseño Paramétrico	187
Maquetas y Cambios de Escala	188
Fabricación y Montaje de las EDBRA	189
Futuras Investigaciones	190
BIBLIOGRAFIA	193
ANEXO 01	
Prototipos	197
ANEXO 02	
Publicaciones	201
ANEXO 03	
Proyecto Emprendedor	204

LISTA DE FIGURAS E IMÁGENES

CAPITULO 02

Fig 01. Yurta tradicional del norte de Mongolia. Imagen tomada de la web en junio 2019: https://www.holidayextras.co.uk/travel-blog/wanderlust/bucket-list/sleep-in-a-traditional-mongolian-yurt.html	14
Fig 02. Tipis indios de las llanuras con pieles de bisonte. Imagen tomada de la web en junio 2019: https://ndnhistoryresearch.com/2016/12/31/houses-of-the-oregon-tribes/	15
Fig 03. Recreación del Anfiteatro Flavio. Velum romano. Imagen tomada de la web en junio 2019: http://verdadyverdades.blogspot.com/2010/10/el-coliseo-o-anfiteatro-de-favio.html	15
Fig 04. Casa Dymaxion. Richard Buckminster Fuller. Imagen tomada de la web en junio 2019: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-288162/clasicos-de-arquitectura-la-casa-dymaxion-buckminster-fuller/51dee1f6e8e44eb808000010	17
Fig 05. Teatro Ambulante. Emilio Pérez Piñero. Fotografía de la estructura desplegable presentada para el VI congreso de la UIA en 1961.	18
Fig 06. Prototipos Desplegables del Arq. Feliz Escrig, presentados en el congreso de Transformables 2013. Sevilla, España.	19
Fig 07. Prototipos Desplegables del Arq. Feliz Escrig, presentados en el congreso de Transformables 2013. Sevilla, España.	19
Fig 08. Pabellon Itinerante. Grupo Estran. Fuente: www.grupoestran.com [2019]	20
Fig 09. Propuestas de mecanismos con actuadores para sistemas desplegados con barras rectas. Fuente: (Charis Gantes Y. A., 2011)	20
Fig 10. Análisis del modulo desplegable cuadrado por influencia de la gravedad. Fuente: (Arnouts, de Temmerman, Massart, & Berke, 2018)	21
Fig 11. Esquema de tijeras rectas simples. Etapas de pliegue y despliegue.	22
Fig 12. Esquema de agrupación lineal de unidades simples con articulación simétrica con un grado de libertad.	23
Fig 13. Clasificación de las estructuras móviles. Fuente: A Hanaor y R Levy, Evaluations of Deployable Structures for Space Enclosures. 2001	24
Fig 14. Clasificación por transformación física. Fuente: Stevenson CM. Morphological principles: current kinetic architectural structures. London. 2011	25
Fig 15. Clasificación de estructuras desplegadas. Sistema Tipo Tijera. Fuente: (Natalia Torres, 2017)	26

Fig 16. Clasificación de sistemas tipo tijera por curvatura. Fuente: (Roovers Kelvin, 2014)	27
Fig 17. Métodos de construcción de las unidades simples de tijeras. Fuente: (Temmerman, 2007) Pag 45 y 48.	30
Fig 18. Modulo hexagonal del mecanismo y malla aplicada. Fuente (Begiristain, 2015)	31
Fig 19. Mecanismos de nudos girados de seis barras: alteraciones de borde. Fuente: (Begiristain, 2015)	31
Fig 20. Método de agrupación por paquetes de círculos para sistemas desplegados tipo tijera. Fuente: (Roovers & Temmerman, 2015)	32
Fig 21. Ejemplos de una red de tijeras no esféricas con módulos triangulares. Fuente: (Roovers & Temmerman, Geometric Design of Deployable Scissors Grid Consisting of Generalized Polar Units, 2018)	33
Fig 22. Tres redes desplegadas de tijeras con patrones de rombos uniformes y de geometría no esférica. Fuente: (Roovers & Temmerman, Geometric Design of Deployable Scissors Grid Consisting of Generalized Polar Units, 2018)	33
Fig 23. Opciones geométricas según las dimensiones del sistema. Fuente (Charis Gantes, 2010)	34
Fig 24. Geometrías propuestas y ubicación de actuadores para el control de movimiento. Fuente: (Charis Gantes, 2010)	34
Fig 25. Mecanismos para los sistemas tipo tijeras espaciales y configuración de los actuadores. Fuente: (Charis Gantes Y. A., 2011)	35
Fig 26. Comportamiento estructural del sistema desplegable propuesto con actuadores. Fuente: (Yenal Akgüna, 2011)	35
Fig 27. Prototipo de modulo hexagonal con barras cruzadas. Fuente: (Begiristain, 2015)	36
Fig 28. Detalles del prototipo de tres módulos hexagonales y nudos cruzados. Fuente: (Begiristain, 2015)	37
Fig 29. Propuesta de vivienda de emergencia con sistemas de barras expandibles. Fuente: (J. Perez Valcárcel, 2019)	38
Fig 30. Propuesta de modulo de emergencia como equipamiento o servicios. Fuente: (J. Perez Valcárcel, 2019)	38
Fig 31. Prototipo para escenario desplegable con arcos. (Torres, 2017)	39
Fig 32. (a) Prototipo con barras en tubos de cartón y suelo en madera. (b) Prototipo con barras de aluminio. Fuente: www.smia-experimental.com	40

CAPITULO 03

Fig 33. Diseño paramétrico de la unidad simple simétrica desplegable.	45
Fig 34. Diseño paramétrico de la unidad simple asimétrica desplegable.	46
Fig 35. (a) Unidad simple simétrica. (b) Unidad simple con articulación asimétrica. (c) Unidad simple con barras asimétricas.	46

Fig 36. Ejemplo de simetría de rombos para evitar restricciones de movimiento fluido.	47
Fig 37. (a) Unidad simple simétrica lineal. (b) Modulo triangular tri-axial. (c) Modulo cuadrado bi-axial.	48
Fig 38. (a) Superficie plana. (b) Superficie monoclástica. (c) Superficie sinclástica. (d) Superficie anticlástica.	49
Fig 39. Diseño paramétrico de una unidad simple simétrica con agrupación lineal recta.	50
Fig 40. Sistema desplegable lineal recto con unidades asimétricas en espejo.	51
Fig 41. Sistema desplegable lineal recto con unidades asimétricas por barras.	51
Fig 42. Sistema desplegable lineal recto con unidades asimétricas por barras y trayectoria diagonal.	52
Fig 43. Diseño paramétrico de una unidad simple asimétrica con agrupación lineal curva.	52
Fig 44. Diseño paramétrico de una unidad simple asimétrica con agrupación lineal curva.	53
Fig 45. Diseño paramétrico de una unidad simple asimétrica de barras y centro con agrupación lineal curva.	54
Fig 46. EDBRA. Axial plana bidimensional. Proceso de despliegue.	55
Fig 47. EDBRA. Axial plana. Proceso de despliegue.	55
Fig 48. EDBRA axial asimétrica en espejo plana. Proceso de despliegue.	55
Fig 49. EDBRA axial asimétrica en barras plana. Proceso de despliegue.	56
Fig 50. EDBRA axial asimétrica en barras y en espejo plana. Proceso de despliegue.	56
Fig 51. EDBRA monoclástica axial asimétrica. Proceso de despliegue limite.	56
Fig 52. EDBRA monoclástica axial asimétrica de barras y centro. Proceso de despliegue limite.	57
Fig 53. EDBRA monoclástica axial asimétrica. Proceso de despliegue máximo.	57
Fig 54. EDBRA monoclástica axial asimétrica de barras y centro. Proceso de despliegue máximo.	57
Fig 55. Rotación de la unidad axial asimétrica en el eje (z). (a) Unidad axial rotada 180°. (b) Unidad axial rotada 120°. (c) Unidad axial rotada 90°. (d) Unidad axial rotada 60°.	58
Fig 56. EDBRA radial sinclástica axial. Proceso de despliegue.	58
Fig 57. EDBRA radial anticlástica axial. Proceso de despliegue.	59
Fig 58. Modulo biaxial simétrico. Proceso de despliegue.	60
Fig 59. Módulos biaxiales. (a) Simétrico. (b) Simétrico, asimétrico. (c) Asimétrico.	60
Fig 60. Torres biaxiales. (a) Simétrica. (b) Simétrica, asimétrica. (c) Asimétrica.	61
Fig 61. EDBRA biaxial simétrica plana. Proceso de despliegue.	61

Fig 62. EDBRA biaxial asimétrica plana. Proceso de despliegue.	62
Fig 63. EDBRA. Arco biaxial desplegable. Proceso de despliegue.	62
Fig 64. EDBRA. Bóveda biaxial desplegable. Proceso de despliegue.	63
Fig 65. EDBRA. Bóveda biaxial torre desplegable. Proceso de despliegue.	63
Fig 66. EDBRA. Bóveda biaxial con doble curva desplegable. Proceso de despliegue.	63
Fig 67. EDBRA. Biaxial sinclástica desplegable. Proceso de despliegue.	64
Fig 68. EDBRA. Biaxial sinclástica desplegable tipo domo. Proceso de despliegue.	64
Fig 69. Construcción geométrica biaxial de sección de esfera desplegable con unidades asimétricas.	65
Fig 70. Sección de esfera desplegable biaxial. Proceso de despliegue.	65
Fig 71. EDBRA. Domo biaxial con ejes radiales desplegables. Proceso de despliegue.	66
Fig 72. Modulo biaxial anticlástico. Geometría.	66
Fig 73. Modulo biaxial anticlástico. Proceso de despliegue.	67
Fig 74. EDBRA. Medio Hiperboloide biaxial. Proceso de despliegue.	67
Fig 75. EDBRA. Paraboloides hiperbólico biaxial. Proceso de despliegue.	67
Fig 76. EDBRA. Agrupación de 4 paraboloides hiperbólicos biaxiales. Proceso de despliegue.	68
Fig 77. Rotación de modulo de base triangular. (a) 1 modulo. (b) 2 módulos. (c) 4 módulos. (d) 5 módulos. (e) 8 módulos.	68
Fig 78. EDBRA. Hiperboloide biaxial de revolución. Proceso de despliegue.	68
Fig 79. EDBRA. Hiperboloide biaxial de revolución. (a) Hiperboloide biaxial simétrico y agrupación. (b) Hiperboloide biaxial asimétrico y agrupación.	69
Fig 80. Polígonos desplegables. (a) Polígono Triangular. (b) Polígono cuadrado. (c) Polígono pentagonal. (d) Polígono hexagonal. (e) Polígono octogonal	70
Fig 81. Torres de polígonos desplegables. (a) Polígono Triangular. (b) Polígono cuadrado. (c) Polígono pentagonal. (d) Polígono hexagonal. (e) Polígono octogonal.	70
Fig 82. Modulo triaxial simétrico. Proceso de despliegue.	71
Fig 83. EDBRA. Agrupación lineal del modulo triaxial simétrico. Proceso de despliegue.	71
Fig 84. Modulo hexagonal simétrico. Proceso de despliegue.	71
Fig 85. Modulo hexagonal de trayectoria plana. Tipologías. (a) Simétrico. (b) Asimétrico interno. (c) Asimétrico externo.	72

Fig 86. Modulo hexagonal asimétrico interno plano. Proceso de despliegue.	72
Fig 87. Modulo hexagonal asimétrico externo plano. Proceso de despliegue.	73
Fig 88. EDBRA. Superficie triaxial plana. Proceso de despliegue.	73
Fig 89. EDBRA. Torre triaxial asimétrica. Proceso de despliegue.	74
Fig 90. EDBRA. Superficie triaxial plana simétrica con sección triangular. Proceso de despliegue.	74
Fig 91. EDBRA triaxial simétrica espacial.	75
Fig 92. Modulo triaxial. (a) Simétrico. (b) Asimétrico interior. (c) Asimétrico exterior.	76
Fig 93. EDBRA. Arco triaxial asimétrico interno. Proceso de despliegue.	76
Fig 94. EDBRA. Arco triaxial asimétrico externo. Proceso de despliegue.	77
Fig 95. EDBRA. Bóveda triaxial asimétrico interno. Proceso de despliegue.	77
Fig 96. EDBRA. Bóveda triaxial asimétrico externo. Proceso de despliegue.	77
Fig 97. EDBRA. Bóveda triaxial asimétrico externo. Torre desplegable. Proceso de despliegue.	78
Fig 98. Modulo triaxial hexagonal. Proceso de despliegue.	78
Fig 99. EDBRA. Arco triaxial hexagonal asimétrico. Proceso de despliegue.	79
Fig 100. Arco triaxial hexagonal. (a) Vista lateral. (b) Vista aérea. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.	79
Fig 101. EDBRA. Bóveda triaxial hexagonal asimétrico. (a) Vista aérea. (b) Vista frontal. (c) Vista isométrica.	80
Fig 102. EDBRA. Arco triaxial hexagonal asimétrico. Proceso de despliegue completo con 9 módulos.	80
Fig 103. Frecuencias del icosaedro para domos geodésicos. (a) Frecuencia 2. (b) Frecuencia 3. (c) Frecuencia 4. (d) Frecuencia 5.	81
Fig 104. EDBRA. Agrupación triaxial hexagonal asimétrico. Modulo hexagonal central. Proceso de despliegue.	81
Fig 105. EDBRA. Agrupación triaxial hexagonal asimétrico. Modulo hexagonal con centro pentagonal. Proceso de despliegue.	82
Fig 106. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.	83
Fig 107. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. Proceso de despliegue.	83
Fig 108. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 2 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.	84
Fig 109. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. Proceso de despliegue.	84
Fig 110. EDBRA. Medio domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.	85
Fig 111. EDBRA. Medio domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.	85
Fig 112. EDBRA. Domos desplegables. (a) Domo desplegable frecuencia 2. (b) Domo desplegable frecuencia 3. (c) Domo desplegable frecuencia 4.	85

Fig 113. EDBRA. Domo tipo H (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.	86
Fig 114. EDBRA. Domo tipo H. Proceso de despliegue.	86
Fig 115. EDBRA. Domo tipo H extendida (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.	87
Fig 116. EDBRA. Domo tipo H extendida. Proceso de despliegue.	87
Fig 117. Optimización de superficies anticlásticas usando Kangaroo + Grasshopper + Rhinoceros. (a) Paraboloide hiperbólico. (b) Enneper. (c) Torus, sección.	88
Fig 118. EDBRA. Paraboloide hiperbólico triaxial. Proceso de despliegue.	88
Fig 119. EDBRA. Tipos de arcos desplegables. (a) Arco biaxial. (b) Arco triaxial triangular. (c) Arco triaxial hexagonal.	89
Fig 120. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales. (a) Vertex. (b) Torus. (c) Boom.	90
Fig 121. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Vertex. Proceso de despliegue.	90
Fig 122. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Vertex extendido.	91
Fig 123. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Torus. Proceso de despliegue.	91
Fig 124. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Torus. Sección formada por 4 arcos desplegables.	91
Fig 125. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Boom. Proceso de despliegue.	92
Fig 126. EDBRA. Boom triaxial desplegable. Tipos por número de arcos según polígono. (a) Boom base triangular. (b) Boom base hexagonal. (c) Boom base octagonal. (d) Boom base dodecágono.	93
Fig 127. EDBRA. Polígono desplegable triangular con unidades simétricas.	94
Fig 128. EDBRA. Polígono desplegable triangular con unidades simétricas. Proceso de despliegue.	94
Fig 129. EDBRA. Prismas desplegables con unidades simétricas. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.	95
Fig 130. EDBRA. Polígono desplegable triangular con unidades asimétricas.	95
Fig 131. EDBRA. Prismas desplegables con unidades asimétricas. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.	96
Fig 132. EDBRA. Red de polígonos desplegable triangular con unidades simétricas. Proceso de despliegue.	96
Fig 133. EDBRA. Prisma desplegable triangular con unidades simétricas. Proceso de despliegue.	96
Fig 134. EDBRA. Prismas desplegables con unidades simétricas. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.	97
Fig 135. EDBRA. Prisma desplegable triangular con unidades simétricas y brazos asimétricos. Proceso de despliegue.	97
Fig 136. EDBRA. Prismas desplegables con unidades simétricas y brazos asimétricos. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.	97
Fig 137. EDBRA. Geometría y parámetros de un sólido desplegable con unidades simétricas desplegables.	98
Fig 138. EDBRA. Tetraedro desplegable con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.	98
Fig 139. EDBRA. Cubo desplegable con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.	99

Fig 140. EDBRA. Cuboctaedro desplegable con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.	99
Fig 141. EDBRA. Agrupación de tetraedros desplegables con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.	99
Fig 142. EDBRA. Agrupación de cubos desplegables con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.	100
Fig 143. Propuesta de clasificación de las EDBRA.	102
CAPITULO 04	
Fig 144. Estados de posicionamiento de las EDBRA. (a) Estado abierto de uso. (b) Estado de movimiento. (c) Estado cerrado o de transporte	106
Fig 145. Esquema de agrupación lineal de unidades simples con articulación simétrica con un grado de libertad.	107
Fig 146. Esquema de control limite de movimiento por tracción. <i>Grasshopper + Kangaroo</i> .	108
Fig 147. Algoritmo (Grasshopper + Kangaroo) para esquema por tracción de una línea.	108
Fig 148. Algoritmo (Grasshopper + Kangaroo) para esquema de control limite de movimiento por tracción de un rombo desplegable.	109
Fig 149. Aplicación de algoritmo para el control limite de movimiento de un sistema desplegable con unidades simétricas axiales. <i>Grasshopper + Kangaroo</i> .	110
Fig 150. Aplicación de algoritmo para el control limite de movimiento de un sistema desplegable con unidades asimétricas axiales y plano de referencia. <i>Grasshopper + Kangaroo</i> .	110
Fig 151. Esquema de control limite de movimiento por Tracción. <i>Grasshopper + Kangaroo</i> . (a) 6 unidades asimétricas. (b) 8 unidades asimétricas (c) 10 unidades asimétricas.	111
Fig 152. Datos del esquema de control limite de movimiento por tracción. (a) 6 unidades asimétricas. (b) 8 unidades asimétricas (c) 10 unidades asimétricas.	111
Fig 153. Control limite de movimiento por tracción. Módulo triaxial hexagonal asimétrico.	112
Fig 154. Aplicación de algoritmo para el control limite de movimiento por tracción de un arco desplegable con módulos triaxiales hexagonales y plano de referencia.	112
Fig 155. (a) Sistemas desplegables cerrados. (b) Sistemas desplegables abiertos.	113
Fig 156. EDBRA. Sistema desplegable cerrado. Domo desplegable con barras rectas articuladas. Maqueta de trabajo. Proceso de despliegue.	114
Fig 157. Domo desplegable con barras rectas articuladas. Diseño paramétrico y Maqueta presentada en el Maker Faire Barcelona 2017.	114
Fig 158. EDBRA. Sistema desplegable cerrado. Cilindro desplegable. Diseño paramétrico.	115
Fig 159. EDBRA. Sistema desplegable cerrado. (a) Con un eje de trayectoria de movimiento. (b) Con dos ejes de trayectoria de movimiento.	115
Fig 160. EDBRA. Sistemas desplegables abiertos. Posición de uso de las EDBRA. (a) Sistema desplegable plano. (b) Sistema desplegable monoclástico. (c) Sistema desplegable sinclástico.	116
Fig 161. Arco hexagonal desplegable con barras rectas articuladas. Maqueta presentada en el Maker Faire Barcelona 2017.	117
Fig 162. Arco hexagonal desplegable con barras rectas articuladas. Diseño paramétrico y	

Maqueta presentada en el Maker Faire Barcelona 2017.	117
Fig 163. Maquetas desarrolladas por los estudiantes del Máster en Arquitectura de la Universidad Nottingham Trent. UK. En el taller sobre estructura desplegable impartidos en los cursos 2018 y 2019.	118
Fig 164. Taller sobre estructuras desplegadas en la Fundación Eric Miralles, Barcelona. 2017 A los estudiantes de la Universidad Javeriana de Colombia del programa de estudios internacionales PEI.	119
Fig 165. Maquetas flexibles. Exploración de agrupaciones y movimiento.	120
Fig 166. Maquetas rígidas. Exploración de agrupaciones y movimiento.	120
Fig 167. Maquetas rígidas. Módulo hexagonal asimétrico.	121
Fig 168. Maquetas rígidas. Agrupaciones asimétricas módulo hexagonal.	121
Fig 169. Unión compuesta biaxial. Pieza 3d. Vistas.	123
Fig 170. Unión compuesta triaxial. Pieza 3d. Vistas.	123
Fig 171. Unión compuesta triaxial. Ensamblado estándar con barras. Vistas.	123
Fig 172. Módulo triangular. Ensamblado estándar con barras y uniones compuestas. Prueba de movimiento.	124
Fig 173. Análisis estático módulo triangular. Tensiones.	126
Fig 174. Análisis estático módulo triangular. Desplazamientos.	126
Fig 175. Análisis estático módulo triangular. Deformaciones.	127
Fig 176. Módulo cuadrado. Ensamblado estándar con barras y uniones compuestas. Prueba de movimiento.	127
Fig 177. Análisis estático módulo cuadrado. Tensiones.	129
Fig 178. Análisis estático módulo cuadrado. Desplazamientos.	129
Fig 179. Análisis estático módulo triangular. Deformaciones.	130
Fig 180. Módulo cuadrado. Ensamblado estándar con barras y uniones compuestas. Prueba de movimiento.	130
Fig 181. Análisis estático módulo hexagonal. Tensiones.	132
Fig 182. Análisis estático módulo hexagonal. Desplazamientos.	132
Fig 183. Análisis estático módulo hexagonal. Deformaciones.	133
Fig 184. Unión hexagonal compuesta estándar. (a) Modelado mecánico 3D. (b) Anillo de pvc + tornillos. (c) Anillo de aluminio + tornillos. (d) Impresión 3d en PLA.	133
Fig 185. Uniones impresas 3D y barras por corte laser. (a) Uniones biaxiales cuadradas. (b) Uniones triaxiales hexagonales. (c) Barras de contrachapado de 3mm. (d) Barras de metacrilato de 3mm.	133
Fig 186. Ensamblado de módulo hexagonal. (a) Modelado mecánico 3d. (b) Maqueta con uniones de pvc. (c) Maqueta con uniones impresas en 3d (pla).	134
Fig 187. Módulo desplegable triangular con uniones PLA y barras de metacrilato. Proceso de despliegue.	135
Fig 188. Módulo desplegable cuadrado con uniones PLA y barras de metacrilato. Proceso de despliegue.	135
Fig 189. Módulo desplegable hexagonal con uniones PLA y barras de metacrilato. Proceso de despliegue.	136

Fig 190. Módulo triangular desplegable con elemento de bloqueo de movimiento y barras a flexión activa.	136
Fig 191. Estructura desplegable sinclástica con elemento de bloqueo de movimiento.	137
Fig 192. Elementos de control o bloqueo de movimiento de las EDBRA. Maquetas de trabajo.	137
Fig 193. Módulo triangular desplegable. (a) Sin control de movimiento. (b) Control de movimiento 01. (c) Control de movimiento 02.	138
Fig 194. Módulo cuadrado desplegable. (a) Sin control de movimiento. (b) Control de movimiento 01. (c) Control de movimiento 02.	138
Fig 195. Módulo hexagonal desplegable. (a) Sin control de movimiento. (b) Control de movimiento 01. (c) Control de movimiento 02.	138
Fig 196. Módulos desplegables con elementos de control límite de movimiento. (a) Módulo triangular. (b) Módulo cuadrado. (c) Módulo hexagonal.	139
Fig 197. Proceso de diseño de las EDBRA. Metodología.	139

CAPITULO 05

Fig 198. Geometría del domo desplegable D30. (a) Icosaedro. (b) Icosaedro truncado. (c) Sección del icosaedro truncado. (d) Domo desplegable D30.	144
Fig 199. Geometría del domo desplegable D30. (a) Vista en planta. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.	145
Fig 200. Algoritmo del domo D30 en Grasshopper. (a) Unidad simple asimétrica. (b) Par de unidades con eje central. (c) Rotación de 60° a las unidades simples. (d) Módulo hexagonal desplegable. (e) Agrupación según geometría del icosaedro truncado. (f) Geometría de cubierta textil. (g) Análisis de tensiones y deformaciones usando Millipede.	146
Fig 201. Domo desplegable D30. Proceso de despliegue.	146
Fig 202. (a) Maqueta de trabajo con pinchos y pvc flexible. (b) Maqueta con barras de contrachapado de 3mm y uniones 3d. (c) Prototipo con barras en madera de pino y tubos de pvc. (d) Prototipo escala humana con barras en madera contrachapada y uniones en pvc.	147
Fig 203. Maqueta Domo D30. Barras en metacrilato por corte laser y uniones impresas en 3d con pla.	148
Fig 204. Geometría del Domo D30 desplegable. Posición abierta de uso y cerrada o de transporte. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral.	148
Fig 205. Materiales del prototipo. Domo Desplegable D30.	149
Fig 206. Algoritmo en Grasshopper + Millipede. Análisis gráfico de tensiones y deformaciones.	149
Fig 207. (a) Condiciones de contorno. (b) Motor de análisis. (c) Resultado gráfico de tensiones y deformaciones.	150
Fig 208. Domo desplegable D30. Análisis gráfico de tensiones y deformaciones.	150
Fig 208a. Domo desplegable D30. Resultados de análisis de tensiones y deformaciones.	151
Fig 209. Domo desplegable D30. (a) Primer anillo. (b) Segundo anillo. (c) Cierre del perímetro o base.	151
Fig 210. Domo desplegable D30. Patrón de la cubierta textil exterior.	152
Fig 211. Domo desplegable D30. Proceso de montaje.	152

Fig 212. Domo desplegable D30. Universidad Abdullah Gull, Kayseri, Turquía.	153
Fig 213. Domo desplegable D30. Sistema bloqueo de movimiento.	153
Fig 214. Domo desplegable D30. Estudiantes del taller sobre Estructuras Desplegables. Universidad Abdullah Gull, Kayseri, Turquía. 2017	154
Fig 215. Domo desplegable D30. Universidad Abdullah Gull, Kayseri, Turquía. 2017	154
Fig 216. Domo desplegable D30. Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais. 2018	155
Fig 217. (a) Domo desplegable frecuencia 2. (b) Domo desplegable frecuencia 3. (c) Domo desplegable frecuencia 4.	155
Fig 218. Variaciones geométricas de domos desplegables.	156
Fig 219. Sistema construido por aspas de barras iguales pero articulaciones excentricas. (Escrig F. , 2012)	157
Fig 220. Arco desplegable axial con 7 unidades simples asimétricas. (a) Asimetría próxima a cero. (b) Asimetría intermedia. (c) Asimetría próxima a máxima posible.	158
Fig 221. Tipos de arcos desplegables. (a) Módulo triangular. (b) Módulo cuadrado. (c) Módulo hexagonal.	158
Fig 222. Tipos módulos desplegables con sección triangular. (a) Módulo simétrico. (b) Módulo asimétrico interior. (c) Módulo asimétrico exterior.	159
Fig 223. Tipos de arcos desplegables con sección triangular según módulo. (a) Módulo asimétrico exterior. (b) Módulo asimétrico interior.	160
Fig 224. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Proceso de despliegue.	160
Fig 225. Algoritmo arco desplegable A7 en Grasshopper + Millipede. (a) Unidad simple asimétrica. (b) Par de unidades con eje central. (c) Modelo triangular desplegable. (d) Arco desplegable. (e) Análisis de tensiones y deformaciones.	160
Fig 226. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Maqueta con barras de madera contrachapada y uniones en tubos de pvc.	161
Fig 227. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Maqueta con barras de madera contrachapada y uniones impresas en 3d en PLA.	162
Fig 228. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Maqueta con barras en metacrilato cortadas a laser y uniones impresas en 3d en PLA.	162
Fig 229. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Geometría de los elementos.	163
Fig 230. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Geometría del arco.	163
Fig 231. Pabellón Vertex. Núcleo central. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.	164
Fig 232. Pabellón Vertex. Geometría vista en planta.	165
Fig 233. Pabellón Vertex. Geometría vista en alzado.	165
Fig 234. Pabellón Vertex. Geometría vista perspectiva.	165
Fig 235. Modelo grafico del algoritmo para el control límite de movimiento por tracción de un arco desplegable con módulos triaxiales triangulares y plano de referencia.	166
Fig 236. Datos del modelo de control limite de movimiento por tracción para un arco desplegable de sección triangular.	167

Fig 237. Modelo grafico del algoritmo para el control límite de movimiento por tracción de un arco desplegable con módulos triaxiales triangulares y plano de referencia. Vista lateral.	167
Fig 238. Algoritmo en Grasshopper + Millipede. Análisis grafico de tensiones y deformaciones.	168
Fig 239. (a) Condiciones de contorno. (b) Motor de análisis. (c) Resultado grafico de tensiones y deformaciones.	169
Fig 240. Arco desplegable A7 con sección triangular. Análisis grafico de tensiones y deformaciones. (a) Vista en planta. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal.	169
Fig 241. Arco Desplegable A7. Resultados de análisis de tensiones y deformaciones.	169
Fig 242. Algoritmo en Grasshopper + Millipede. Análisis grafico de tensiones y deformaciones. Pabellón Vertex.	170
Fig 243. (a) Condiciones de contorno. (b) Motor de análisis. (c) Resultado grafico de tensiones y deformaciones.	170
Fig 244. Arco desplegable A7 con sección triangular. Análisis grafico de tensiones y deformaciones. (a) Vista en planta. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal.	170
Fig 245. Pabellón Vertex. Resultados de análisis de tensiones y deformaciones.	171
Fig 246. Materiales usados para el prototipo. Arco desplegable A7.	171
Fig 247. Mecanizado del material y fabricación del prototipo.	172
Fig 248. Construcción de los arcos desplegables.	172
Fig 249. Arco desplegable con sección triangular. Prototipo.	173
Fig 250. Patrón textil del Pabellón Vertex.	173
Fig 251. Diseño y ubicación de los anclajes y sistemas de control de movimiento. Pabellón Vertex.	174
Fig 252. Anclajes y sistemas de control de movimiento. Pabellón Vertex.	174
Fig 253. Pabellón Vertex. Primera prueba de montaje y comprobación del núcleo central. Tecnológico de Monterrey, México 2018.	175
Fig 254. Pabellón Vertex. Montaje e instalación. Tecnológico de Monterrey, México 2018.	175
Fig 255. Pabellón Vertex. Proceso de montaje e instalación. Tecnológico de Monterrey, México 2018.	176
Fig 256. Pabellón Vertex. Tecnológico de Monterrey, México 2018.	176
Fig 257. Pabellón Vertex. Instalación efímera de una estructura con arcos desplegables de 90 metros cuadrados construidos. Tecnológico de Monterrey, México 2018.	177
Fig 258. Pabellón Vertex. Instalación efímera de una estructura con arcos desplegables de 90 metros cuadrados construidos. Tecnológico de Monterrey, México 2018.	177
Fig 259. Pabellón Vertex. Prototipo desplegado en estado de uso. Prototipo cerrado en estado de Transportabilidad. Tecnológico de Monterrey, México 2018.	178
Fig 260. Configuraciones alternativas de arcos desplegables con sección triangular. (a) Vertex (b) Torus (c) Boom (Speudo-domo)	179
Fig 261. Configuraciones alternativas de arcos desplegables con sección triangular. (a) Vertex (b) Torus4 (c) Torus12	179
Fig 262. Prototipo Vertex. Nottingham Trent University. 2019	180

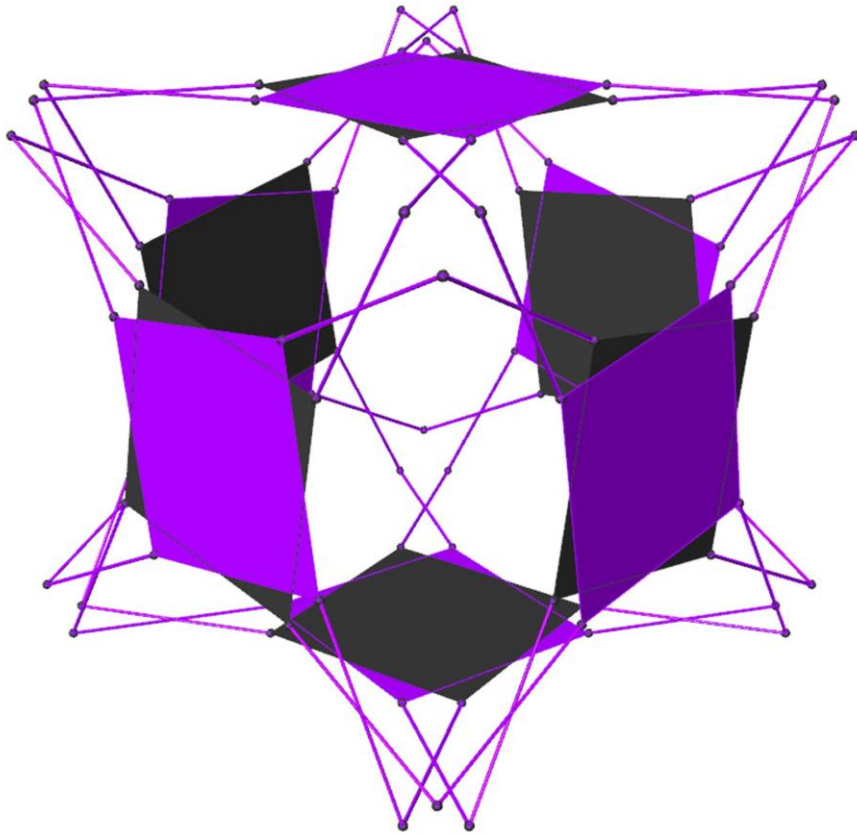
Fig 263. Prototipo Vertex. Expo IASS (International Association for Shell and Spatial Structures). Barcelona. 2019.	180
Fig 264. Pabellón Vertex presentado en la Expo del simposio de la IASS 2019.	181
Fig 265. Prototipo Torus4. Universitat Internacional de Catalunya. Barcelona 2018.	181
Fig 266. Prototipo Torus4. Universitat Internacional de Catalunya. Barcelona 2018.	182
Fig 267. Prototipo Torus12. Nottingham Trent University. 2018	182
Fig 268. Prototipo Torus12. Nottingham Trent University. 2018	183

CAPITULO 06

Fig 269. Diseño paramétrico del Pabellón Vertex usando Rhinoceros + Grasshopper + Kangaroo.	190
Fig 270. Propuesta de sistema desplegable de emergencia. Primer puesto del Simposio Latinoamericano de Tenso-Estructuras en Brasil, 2014.	191
Fig 271. Propuesta de sistema desplegable de emergencia. Primer puesto del Simposio Latinoamericano de Tenso-Estructuras en Brasil, 2014.	192

ANEXOS 02

Fig 272. Medios domos desplegables con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.	204
Fig 273. Pantallas con arcos desplegables en aluminio y lycra para proyección con video mapping. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.	204
Fig 274. Elementos de control de movimiento límite para las EDBRA. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.	205
Fig 275. Vertex con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.	205
Fig 276. Vertex con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Monterrey, México DINAMIKA - Sinergia Creativa.	205
Fig 277. Arco desplegable de acceso para evento cultural con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.	206
Fig 278. Medio domo desplegable con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Escenario de conciertos. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.	206



Capítulo 01

Introducción

La arquitectura transformable siempre ha sido objeto de estudio en nuestra historia. El hombre ha sentido la necesidad de diseñar y construir su entorno con elementos que pueda cambiar y modificar su espacio. Los romanos usaban en sus anfiteatros lonas textiles que podían ser plegadas o desplegadas según las condiciones climáticas para protegerse de los rayos solares. Otro ejemplo son las Yurtas, viviendas usadas por las comunidades nómadas del Asia Central. Estas son diseñadas y construidas con la capacidad de ser montada y desmontada en el menor tiempo posible con el fin de permitir el rápido desplazamiento de las comunidades.

En la actualidad la arquitectura transformable soluciona los mismos requerimientos de confort climático, transportabilidad y otros más complejos como cambio del espacio, adaptabilidad según forma y color, así como también la posibilidad de cambiar según su función de uso. Como es el caso del estadio CommerzBank Arena, en Frankfurt. Alemania. Que cambian su cubierta de abierta a cerrada, dependiendo de las circunstancias de clima exterior. Si bien con una tecnología muy actual, es muy parecido a los anfiteatros romanos.

El universo de la arquitectura transformable puede ser muy extenso y complejo. Por mencionar algunos de los sistemas como el origami o plegaduras, cables y membranas, paneles modulares, tensegrity, y sistemas articulados en barras. Este último es el objeto de esta investigación. Y más concretamente los sistemas de barras rectas articuladas.

La presente investigación doctoral, hace un recorrido por el mundo de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas y da una nueva mirada en su forma de diseño y alternativas para sus sistemas de control de movimiento. También se quiere presentar las posibilidades geométricas y de agrupación de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas. El acercamiento a se hace desde el diseño paramétrico y sus ventajas que tiene al permitir explorar diversas configuraciones y geometrías posibles. En la era digital y como un nuevo camino en la forma de diseñar, en esta investigación se hace uso de varios software de diseño paramétrico. También se explora en la búsqueda de alternativas para la construcción de maquetas y modelos físicos de trabajo, como la fabricación digital.

Las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas siempre han sido catalogadas como estructuras temporales o de arquitectura efímera. Tal vez por esto no han tenido la atención que se merecen. Y simplemente pasan a ser estructuras de un alto valor escultórico y de gran impacto visual en festivales y eventos académicos. La transportabilidad, la ligereza, y el hecho de ser modular hace que las estructuras desplegadas tengan un potencial amplio de aplicación en la arquitectura, y no necesariamente efímera.

Esta tesis tienen un alto componente explorativo y experimental. Se busca partir desde los antecedentes de diseño análogo de las estructuras desplegables como de las investigaciones recientes encontradas en el ámbito académico. La exploración con maquetas físicas y modelos digitales permiten recorrer un camino experimental de ensayo y error, donde la simbiosis de ambas da resultados más precisos y eficientes, buscando las aplicaciones de habitabilidad.

Motivación de la Investigación

El hecho que una estructura tenga la propiedad de cambiar su forma y transformar el espacio, es motivación suficiente para abordar esta investigación. Pero no solo basta con poder ser transformable, también su ligereza y modularidad son características de gran valor arquitectónico, en un mundo donde el cambio es lo constante. Pero más allá de estas características evidentes y bien sabidas dentro del marco teórico de las estructuras desplegadas, existe también un interés en dar un salto en su aplicación arquitectónica.

Cuando uno se sumerge en el estudio de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas, encuentra que existen numerosos trabajos e investigaciones en este campo. Además de ser un punto de partida importante de esta investigación, también son material de cuestionamiento y causa primaria de las hipótesis planteadas en esta tesis. Hablo de las aplicaciones arquitectónicas. En la gran mayoría de investigaciones consultadas para este trabajo, se pueden ver aplicaciones arquitectónicas parciales. Es decir las estructuras desplegadas son usadas para cubrir una superficie en particular como piel o fachada. Pueden ser superficies sin-clásticas o anti-clásticas. Pero son pocas las aplicaciones de las estructuras desplegadas como un objeto habitable.

La idea de tener una estructura transformable, que además sea contenedora de espacio y tenga la propiedad de ser habitable hacen que sea más interesante abordar esta investigación. Las posibilidades de aplicaciones se multiplican al lograr obtener una estructura con característica de habitabilidad. Este autor cree que las aplicaciones de las estructuras desplegadas van mucho más allá de una solución de piel, superficie o fachada dentro de un edificio. O en una cubierta de grandes luces.

Son muchas las explotaciones en el ámbito académico de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas, y muchas también las propuestas a nivel digital o de maquetas físicas. Pero son pocas las aplicaciones reales a escala humana. Tal vez en el cambio de escala se incrementan los problemas en la estabilidad final de la estructura y en su estado de transformación o cambio de forma. Tal vez aumenta la complejidad en sus nudos o articulaciones y hace que estos requieran mayor atención en su diseño y propuesta de materiales. Tal vez el poco éxito tenga que ver con la poca intención que existe hoy día en de dar el salto de la maqueta a la escala humana, ya sea por limitaciones económicas o técnicas.

Sería importante tener aplicaciones arquitectónicas habitables con sistemas de estructuras desplegadas. Bien sea como un solo sistema u objeto, o la suma de varios sistemas que según su agrupación configuren un objeto arquitectónico habitable.

Los actuales avances en tecnología han puesto a nuestro servicio nuevas formas de diseñar como los sistemas BIM (Building Information Modeling) que permite crear simulaciones digitales de diseño,

incorporando variables como tiempo y costos. O el caso del diseño paramétrico y diseño generativo, los cuales relacionan procesos geométricos y matemáticos como paquetes de información, pudiendo manipular con mayor precisión los diseños con resultados más óptimos.

Para esta investigación se quiere usar el diseño paramétrico, explorando una metodología de diseño para las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas, y desarrollar algoritmos que optimicen el diseño de los sistemas desplegados y su control de movimiento límite. Con ayuda de procesos de fabricación digital para la construcción de maquetas y prototipos a escala.

Objetivos

Objetivo horizonte

Con el uso del diseño paramétrico (Rhinceros + Grasshopper) se quiere proponer una metodología de diseño de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas desde su geometría, búsqueda de la forma, análisis de movimiento, control límite de movimiento y fabricación de prototipos para su aplicación arquitectónica.

Objetivos específicos

Estudiar y evaluar el estado de arte actual de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas y sus autores más representativos. Así como también las más recientes investigaciones de los centros académicos enfocados en este tema. Con el fin de conocer las fortalezas y las debilidades que estos sistemas tienen.

Realizar maquetas físicas y modelos digitales para la comprensión y estudio de movimiento de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas. Y analizar su comportamiento mecánico.

Hacer uso de programas digitales de diseño paramétrico y definir la forma, la configuración geométrica, la agrupación, el análisis de movimiento y modelos teóricos de cargas para las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas.

Controlar el movimiento máximo o límite, con ayuda de elementos adicionales como cables, membranas textiles o barras. El propósito de esta investigación es encontrar las posibles aplicaciones arquitectónicas de las estructuras desplegadas con barras rectas logrando el control límite o máximo de movimiento, en su estado de uso.

Por último definir los casos de estudio y proponer los sistemas de control de movimiento para cada caso. Aplicarlos en la construcción de un prototipo a escala humana y ver sus resultados finales. Analizar el comportamiento final de la estructura y sus posibles aplicaciones futuras.

Justificación

Los sistemas de estructuras despletables con barras rectas articuladas tienen tres estados de cambio en su forma. El primero es el estado de uso. Es cuando la estructura está abierta o desplegada. El segundo es el estado de movimiento. Este es cuando la estructura está cambiando su forma y se está cerrando. Y por último su estado de reposo. El estado de reposo es cuando el sistema está cerrado y puede ser transportado con facilidad. Pensando en dar el salto a aplicaciones habitables es necesario tener en cuenta el último estado de cambio.

Las estructuras despletables con barras rectas articuladas tienen una característica que las diferencia de otros sistemas despletables y es que son sistemas que en su estado cerrado o de pliegue, son las que menor espacio ocupan. Esta característica permite que sean más fáciles de almacenar, de transportar, de modular, y lo más importante de fabricar.

Debemos recordar que estamos hablando de estructuras que son temporales, no por su durabilidad en el tiempo sino por su opción de ser montada y desmontada en un lugar, para luego ser transportada y montada y desmontada en otro lugar. Es decir que la misma estructura pueda ser usada en varios lugares como un espacio habitable. Esta característica de temporalidad ayuda a reducir costos de instalación o mano de obra, y tiempos de montaje.

Por último estos sistemas cuentan con un grado de libertad, motivo que hace que su posición final de despliegue o estado de uso este marcado por su misma geometría. Pero hasta donde realmente debe de ser su máximo punto de apertura.

Con apoyo del diseño paramétrico se cree posible controlar la geometría y el movimiento de los sistemas despletables. Los algoritmos diseñados para esta investigación permitirán controlar el movimiento límite de las estructuras despletables con barras rectas.

En resumen los sistemas despletables con barras rectas articuladas tienen las ventajas de ser ligeros, modulares y transformables. Pero también son estructuras de rápido montaje y transportables. Lo que nos lleva a pensar que es en su etapa de fabricación donde más cuidado y atención hay que tener. Y si esta fabricación tiene la posibilidad de ser industrializada, tendríamos un sistema constructivo eficiente para aplicaciones arquitectónicas de infraestructura para eventos de pequeña y mediana escala, como conciertos, ferias y eventos deportivos. Pero también aplicaciones agrícolas como invernaderos y hasta sistemas temporales de emergencia.

Aplicaciones Potenciales

La hipótesis para iniciar este trabajo de investigación es la de cuestionar el por qué si las estructuras desplegables con barras rectas articuladas tienen grandes ventajas como su ligereza, su rápido montaje y su transportabilidad, no son tan comunes en su aplicación arquitectónica real. Y son pocos los casos de éxito que encontramos en la industria de la construcción y la arquitectura.

Por que las propuestas de aplicación arquitectónica se limitan a una cubierta o una piel. Es decir por que las configuraciones propuestas como aplicaciones arquitectónicas son superficies desplegables. En algunos casos sin-clásicas y en otros un pocos menos anti-clásicas. Terminan siendo propuestas parciales dentro de un edificio con estructura convencional.

¿Sera posible diseñar configuraciones geométricas desplegables con barras rectas articuladas, que sean contenedoras de espacio y que puedan ser en sí mismas habitables? La respuesta a esta pregunta permitiría resolver aplicaciones arquitectónicas temporales. Sería posible tener estructuras temporales de larga duración y con la posibilidad de reubicar de lugar cuantas veces sea posible.

Por ejemplo aplicaciones para la infraestructura en eventos de pequeña y mediana escala a nivel de ciudad como ferias, festivales musicales o gastronómicos, centros de convenciones o mercadillos de barrio. El uso de stands como pequeña escala y escenarios o anfiteatros de gran escala. También para la recreación y el deporte. O recintos que se adaptan abriéndose o cerrándose en consideración de su uso. Estructuras de exhibición y lanzamientos deportivos. Pero no solo en la industria del ocio es posible su aplicación. También en la industria agrícola, como invernaderos. Su uso temporal según las estaciones del año hace potencial su reutilización y transportabilidad.

Construcciones temporales en lugares apartados o de difícil acceso. También como bodegas o edificios de mantenimiento o auxiliares de obra civil. Como arquitectura de emergencia para refugios, instalaciones públicas de atención de emergencias tales como centros de salud y de alimentos. Otros como elementos arquitectónicos de apoyo; puentes, torres y plataformas.

También es posible encontrar aplicaciones fuera de la industria de la construcción y la arquitectura. En una mayor escala como antenas espaciales, y sistemas habitables para otros planetas. Y en una menor escala, en la industria medica como elementos quirúrgicos y de apoyo hospitalario. Y también en juguetes no solo como elementos de diversión, sino también como herramientas de aprendizaje geométrico y espacial.

Ventajas y Fortalezas

Los sistemas desplegados con barras rectas articuladas son ligeros, modulares y transformables. Tiene la capacidad de cambiar de forma según su geometría y agrupación. Están formados por elementos rectos rígidos o flexibles, con articulaciones simples para formar pares de tijeras, y articulaciones compuestas de dos, tres o más direcciones.

El sistema es modular, lo que permite agrupaciones lineales o espaciales. Pero también es posible hacer agrupaciones mixtas entre dos módulos diferentes o más. Las agrupaciones entre módulos pueden ser continuas o discretas dejando espacios vacíos según su morfología.

Si bien su estudio y exploración lleva poco más de 50 años, hoy en día con el apoyo de programas de diseño paramétrico es posible reducir tiempos en el diseño de nuevas configuraciones geométricas enfocadas en la aplicación arquitectónica.

Pensando en reducir el impacto ambiental, los sistemas desplegados con barras rectas articuladas se pueden construir con materiales como la madera, la caña o guadua. Las barras rectas en el sistema facilitan su construcción como sistema sostenible.

Su fabricación es relativamente fácil. Bien sea con materiales blandos de bajo costo como la madera y el pvc, que en este caso sirven para prototipos de estudios y ensayos. O de fabricación industrializada con barras en aluminio y uniones impresas en 3d con materiales termo formables. La piel o cerramiento del sistema puede ser con materiales flexibles como textiles o pueden ser materiales rígidos como paneles modulares.

Una de las características representativas de los sistemas de estructuras desplegadas es la reducción en sus tiempos de montaje. El ensamblaje de las piezas ya viene hechas desde el taller, así el montaje de la estructura en su lugar de uso es más rápido que un sistema tradicional. El cerramiento también viene ya ensamblado en la mayoría de los casos, solo es cuestión de desplegar la estructura.

Debilidades y Oportunidades

Las estructuras desplegadas en general son sistemas compuestos por una cantidad considerable de articulaciones. De hecho el elemento primario o tijera es una articulación entre dos barras. Entre más compleja es la estructura desplegada y más elementos la compongan, mayor número de articulaciones tiene. Este hecho hace que la estructura sea inestable en sí misma y todos sus elementos rígidos tiendan a moverse. En esta investigación definimos este fenómeno como "nervioso". Es así como definiremos a las estructuras desplegadas como *Sistemas Nerviosos*.

En la mayoría de los casos las estructuras desplegadas tienen un solo grado de libertad. Esto quiere decir que basta con un elemento para bloquear todo el movimiento. Esto es lo que dice la teoría, pero en la práctica podemos tener estructuras desplegadas complejas con un solo grado de libertad que requieren de mas elementos para controlar su estabilidad en el su estado de uso. En este punto se centra gran parte de esta investigación.

Las uniones o articulaciones de tres o más elementos rígidos son otro de los puntos a tener en cuenta. En la mayoría de los casos las exploraciones formales de los sistemas desplegadas con barras rectas se quedan solo en maquetas a pequeña escala, o bien en diseños por computador. El cambio de escala exige el diseño de sus articulaciones. La precisión en conservar los ejes de movimiento de sus elementos garantiza la apertura y cierre fluido de la estructura.

Uno de los puntos más débiles de las Estructuras Desplegadas son las fuertes deformaciones que presentan algunas geometrías durante su proceso de despliegue. Haciendo que las barras transmitan esta fuerza a las articulaciones logrando en algunos casos deformarlas.

Hipótesis

Las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas tienen como propósito ser transformables. Quiere decir que tienen un estado de forma inicial (cerrado), un estado intermedio (movimiento) y un estado final o de uso (abierto). En estos tres estados de transformación, el más importante para nosotros los arquitectos es el estado final o de uso, ya que su forma final no va a definir los límites y calidades del espacio como elemento arquitectónico o como espacio habitable. ¿Es posible controlar el movimiento límite de las estructuras desplegadas? De ser posible, ¿es el diseño paramétrico una herramienta útil para buscar controlar el movimiento límite?

Lo que pasa es que no siempre el estado final o de uso, de una estructura desplegada con barras rectas articuladas es en su máximo punto de apertura. Es decir, una estructura desplegada puede tener una apertura máxima del sistema y no ser ese su estado de uso. Ya que su forma final es previa a su máxima apertura. Esto se debe a sus características de forma y función. Por otro lado es posible tener estructuras desplegadas en las que su estado de uso es su máxima apertura. ¿Cómo se puede diseñar una estructura desplegada sabiendo desde el inicio su recorrido de movimiento? ¿Los sistemas desplegados bloquean en sí mismos su movimiento? O ¿requieren de elementos adicionales al sistema?

Podemos encontrar sistemas bi-estables, los cuales son compatibles en los estados cerrado y abierto, pero tienen algunas incompatibilidades en estados intermedios de pliegue y despliegue.

También existen sistemas desplegados con barras rectas que en sí mismos son estables en su máximo punto de apertura. Como es el caso de los domos desplegados. Y hay otros sistemas desplegados que no terminan de estar en equilibrio cuando han alcanzado su estado de uso. Y por esto es necesario añadir cables, anclajes o sistemas de bloqueo de movimiento para lograr la estabilidad del sistema. Y es en este punto donde esta investigación se va a enfocar. En cómo lograr controlar el estado límite de movimiento para que el sistema sea estable y funcional.

Se quiere explorar el uso de las herramientas de diseño paramétrico como metodología de diseño de las estructuras desplegadas, desde su geometría, control de movimiento límite y procesos de fabricación de prototipos a escala humana.

Metodología

Esta investigación es experimental, y busca obtener datos y caracterizaciones en la elaboración de modelos físicos y digitales. El ensayo y error hace parte del camino a seguir para obtener resultados de acuerdo a la hipótesis planteada anteriormente y a los objetivos propuestos. La morfología de las estructuras desplegadas está directamente relacionada con la geometría de sólidos. Y este será el punto de partida.

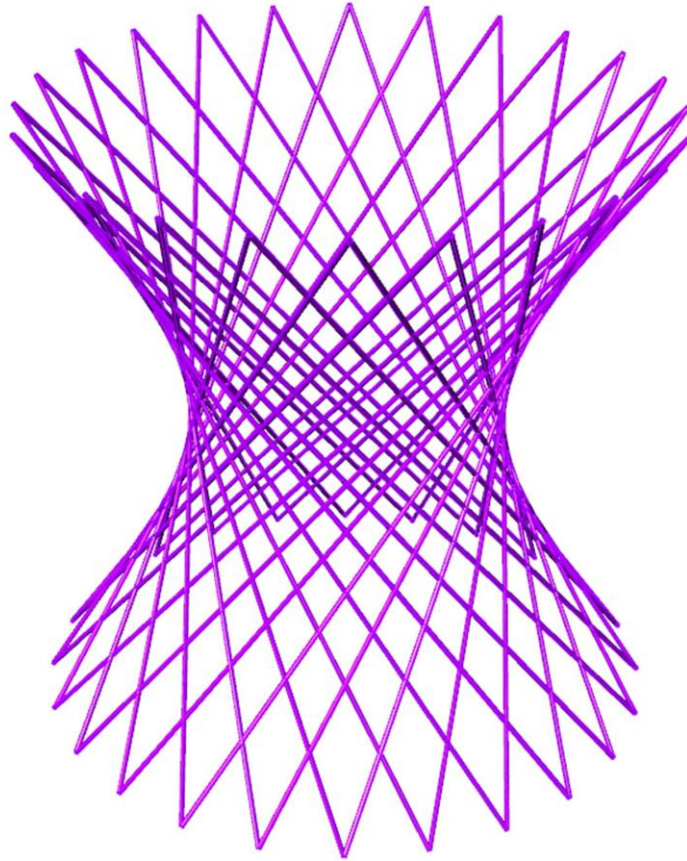
La metodología está compuesta por 3 etapas.

Una primera etapa son los antecedentes y conceptos básicos, necesarios para conducir la hipótesis y contar con un estado actual del conocimiento sobre las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas. La idea es recorrer los principales pioneros en estos sistemas estructurales y sus aportaciones. También revisar los avances e investigaciones actuales que sean relevantes como referentes de este documento.

La segunda etapa es la búsqueda de la forma. Esta es la etapa experimental de la investigación. Para esta etapa fue fundamental la participación como docente en formación en el curso de *Construcción Ligera* impartido por el Prof. Ramón Sastre, de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Valles. Oportunidad que sirvió de laboratorio de ideas para el grupo de investigación SMiA (Structural Morphology in Architecture), y para la creación del taller sobre Morfología Estructural y Estructuras Desplegadas que posteriormente sería impartido por SMiA en varios centros educativos.

La creación de estos talleres motivó las múltiples exploraciones con maquetas físicas y el uso de diferentes materiales y escalas para la fabricación de estructuras desplegadas.

Y finalmente una tercera etapa de pruebas y fabricación. En esta etapa se seleccionan posibles casos de estudio para su fabricación y construcción a escala humana. Se proponen diferentes tipos de unión con materiales de bajo costo y con fabricación digital con impresiones en 3d. Y se exploran las posibles soluciones de control de movimiento con elementos como cables o anclajes. La idea es poder ofrecer una solución de habitabilidad con un sistema de estructuras desplegadas con barras rectas.



Capitulo 02

Estado del Arte de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas

Antecedentes

El ser humano siempre ha sido una especie en evolución y cambio. Este comportamiento inherente a nosotros hace que tengamos la necesidad de cambiar nuestro entorno, de transformarlo. Desde nuestras primeras aproximaciones de espacios habitables hemos sentido la necesidad de protegernos de los factores medio ambientales básicos como el sol, la lluvia y el viento. Estos factores son imprevisibles y cambian constantemente. Es por esta razón que siempre hemos querido construir nuestro entorno intentando darles solución. La necesidad de ser transformables es por tanto un recurso.

A través de la historia podemos encontrar aplicaciones de arquitectura transformable en distintos lugares y épocas del mundo. Las más conocidas son sin duda son las *Yurtas* y las cubiertas de los coliseos romanos. Las primeras son estructuras temporales usadas como viviendas por los nómadas del Asia central. Los mongoles eran comunidades nómadas, por lo que las *Yurtas* debían ser modulares, de fácil montaje y desmontaje, y transportables. Por otro lado las cubiertas de los coliseos romanos tenían un desarrollo tecnológico más avanzado el cual les permitía plegar y desplegar cubiertas textiles planas sobre ejes y poleas.



Fig 01. Yurta tradicional del norte de Mongolia. Imagen tomada de la web en junio 2019:
<https://www.holidayextras.co.uk/travel-blog/wanderlust/bucket-list/sleep-in-a-traditional-mongolian-yurt.html>

En ambos casos encontramos similitudes en sus elementos que las componen. Barras rígidas y articulaciones. Y los recubrimientos textiles. Haciendo en cada caso un sistema estructural ligero. Pero no son los únicos ejemplos que podemos encontrar de arquitectura transformable a través de la historia. Nuestros antepasados primitivos usaban construcciones efímeras que usaban como refugios, como puntos de recolección de alimentos o centros ceremoniales. En la cultura de los pueblos indígenas norteamericanos encontramos los Tipis o Tepees. Son estructuras en forma cónica formada por elementos

de madera lineales y rígidos, recubiertos por pieles de animales. Nuevamente encontramos un ejemplo de una vivienda portátil, fácil de transportar que estaba acorde con las necesidades nómadas.



Fig 02. Tipis indios de las llanuras con pieles de bison. Imagen tomada de la web en junio 2019:
<https://ndnhistoryresearch.com/2016/12/31/houses-of-the-oregon-tribes/>

Las *Jaimas* o *Haimas* son otro ejemplo de arquitectura transformable. Son estructuras usadas por los antiguos pueblos árabes y bereber. Al igual que las *Yurtas* y los *Tipis* son viviendas de pueblos nómadas formadas por palos de madera usados como mástiles y cubiertas con pieles de animales tensadas con cuerda. Estas eran el centro de la vida social y podían llegar a tener grandes dimensiones, hasta el punto de albergar en su interior entre 15 y 20 personas.

En tiempos de los romanos podemos destacar "El Velum Romano". Este sistema consistía en una estructura en madera en la parte superior del Coliseo con secciones textiles y un conjunto de cuerdas para moverlas de forma radial con el fin de dar sombra a los espectadores en épocas estivales. Este complejo sistema de cubierta móvil era construido y manipulado por marineros con altos conocimientos en las velas de los barcos. Hoy en día podemos encontrar ejemplos similares en complejos deportivos o canchas de tenis, pero con mecanismos automatizados y tecnología en nuevos materiales.

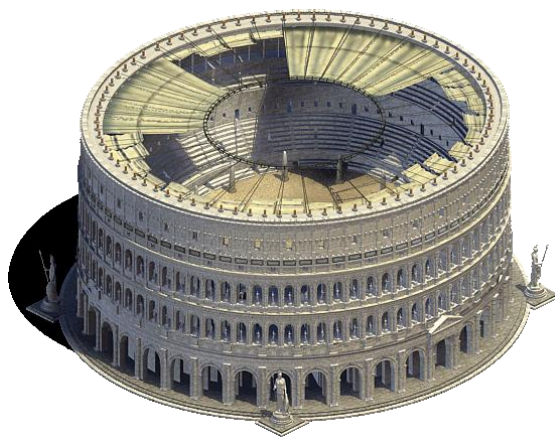


Fig 03. Recreación del Anfiteatro Flavio. Velum romano. Imagen tomada de la web en junio 2019:
<http://verdadyverdades.blogspot.com/2010/10/el-coliseo-o-anfiteatro-de-favio.html>

En todos los ejemplos que encontramos de la arquitectura transformable a través de la historia siempre podemos ver como el hombre ha intentado con éxito y de diferentes formas la integración entre estructura o elementos rígidos y cubierta o piel. Si bien en algunos casos primero se instalaba la estructura y luego la cubierta, fueron las primeras intenciones por desarrollar un sistema habitable de rápido montaje, modular y transformable.

Estructuras Desplegables del Siglo XX

Richard Buckminster Fuller

La arquitectura transformable como sistema industrializado aparece a mediados del siglo XX con proyectos experimentales para viviendas. Es el caso de la casa Dymaxion o *DDU* que son sus siglas en inglés para *Dymaxion Deployment Unit*, puede ser el referente más significativo de transformabilidad del espacio, diseñada por el arquitecto Richard Buckminster Fuller. Esta casa diseñada bajo el concepto de la prefabricación, fueron usadas como casas temporales durante la guerra. Su sistema de elementos modulares y concepto de cúpula hacían que la casa fuera de rápido montaje, cálida e iluminada. Su tejado con abanicos en aluminio fue el primero en su tipo logrando recogerse con un solo movimiento radial. La casa tuvo varios prototipos y se considera como unos de los primeros proyectos integrales de un diseño transformable.



Fig 04. Casa Dymaxion. Richard Buckminster Fuller. Imagen tomada de la web en junio 2019:
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-288162/clasicos-de-arquitectura-la-casa-dymaxion-buckminster-fuller/51dee1f6e8e44eb80800010>

El trabajo de Fuller se extendió hasta el desarrollo de estructuras geodésicas ligeras, combinando sistemas estructurales novedosos y de una alta complejidad geométrica. Gran parte de sus aportes teóricos los encontramos en el libro, "*Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking*". En este libro podemos ver los análisis geométricos y espaciales que usó el autor para sus innovadoras propuestas de ingeniería y arquitectura.

En la última mitad del siglo XX han existido personajes que se han preocupado por el uso y diseño de estas estructuras, y las han denominado de diversas maneras como estructuras dinámicas, estructuras desplegadas, sistemas móviles.

Emilio Pérez Piñero

El arquitecto español Emilio Pérez Piñero presenta su proyecto Teatro Ambulante en el VII congreso de la UIA en Londres en 1961. El proyecto constaba de una estructura reticulada plegable que cubría una luz de 32mts, 11mts de altura y 3000 kg de peso.



Fig 05. Teatro Ambulante. Emilio Pérez Piñero.
Fotografía de la estructura desplegada presentada para el VI congreso de la UIA en 1961.

El concepto de plegabilidad fue revolucionario en su época. Resolvía los problemas de cubierta y rigidez para un espacio de grandes luces con un sistema de articulación sencillo y mecanizado. La idea de tener una estructura plegable y transportable ayudaría a reducir tiempos y costos en su fabricación y montaje.

Los proyectos de Emilio Pérez Piñero fueron visionarios e incluso para aplicaciones en otras industrias. Se le considera uno de los pioneros en los sistemas de barras articuladas. Sus proyectos van desde pabellones de exposiciones transportables, cúpulas desplegadas, sistemas desmontables para cubrir grandes luces, hasta el diseño de una vidriera desplegable, encargo por el pintor y escultor Salvador Dalí. Actualmente existe la fundación Emilio Pérez Piñero, que se encarga de difundir y preservar toda documentación relevante del arquitecto y sus proyectos. www.perezpinero.org [2019]

Feliz Escrig Pallares

Félix Escrig Pallares fue también un arquitecto español, de Sevilla, con una gran aportación en las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas. La diferencia entre las estructuras desplegadas de

Piñero con las de Escrig, es que las primeras eran tri-aspas o 3 barras articuladas en sus centros. Mientras que las segundas eran espaciales con barras planas articuladas en sus extremos. La importancia del trabajo académico y profesional de Félix Escrig fue su esfuerzo en llevar a cabo la construcción de algunos de sus proyectos. En su libro "Modular, Ligero y Transformable. Un paseo por la arquitectura ligera móvil" escrito en colaboración con del Arquitecto Dr José Sánchez Sánchez, nos presentan sus incansables intentos por llevar a la construcción de algunos de sus proyectos con estructuras desplegables. El cual podemos apreciar en su máximo desarrollo el proyecto de la piscina municipal del complejo San Pablo de Sevilla. (Escrig F. , 2012)



Fig 06. Prototipos Desplegables del Arq. Feliz Escrig, presentados en el congreso de Transformables 2013. Sevilla, España. Imágenes tomadas por el autor.



Fig 07. Prototipos Desplegables del Arq. Feliz Escrig, presentados en el congreso de Transformables 2013. Sevilla, España. Imágenes tomadas por el autor.

Carlos E. Hernández

En Latinoamérica el Arquitecto Carlos Hernández y miembro de Grupo Estran (Estructuras Transformables) en Venezuela, ha trabajado algunas morfologías de las estructuras desplegables con barras rectas. También hizo una gran aportación en su trabajo doctoral sobre las deformaciones y comportamiento mecánico de las barras y las uniones en estos sistemas. Exploro las estructuras transformables de bóveda, mejorando y desarrollando prototipos a escala humana. Diseño detalles

constructivos para los mecanismos y uniones del sistema, y experimento con diferentes procesos de pliegue y despliegue. Incorporando al sistema de desplegable puntos de anclajes de la membrana textil.



Fig 08. Pabellon Itinerante. Grupo Estran. Fuente: www.grupoestran.com [2019]

Charis Gantes

Otro de los investigadores de relevancia sobre las estructuras desplegables, es el Ingeniero Charis J. Gantes. Profesor de la Universidad Nacional Técnica de Atenas, Grecia. Autor del libro "*Deployable Structures: Analysis and Design*" que recoge gran parte de su trabajo a nivel del comportamiento estructural de las estructuras desplegables. En su investigación plantea que los estados de pliegue y de despliegue de la estructura resultan libres de tensiones o estrés. Pero plantea que las estructuras de barras articuladas sufren un comportamiento de tensión en sus elementos rígidos que son causados por el movimiento y la fricción durante el desplazamiento de sus barras. El propone un modelo simple para obtener resultados numéricos de las deformaciones de las barras y los puntos de articulación, según la geometría del sistema.

En sus trabajos más recientes sobre las estructuras desplegables, propone nuevos mecanismos adaptables para los sistemas de tijeras espaciales, funcionando como actuadores para superficies de curva simple como bóvedas o superficies de doble curvatura. Estos mecanismos son el resultado del comportamiento mecánico de las barras para reducir las deformaciones y tensiones presentes en el sistema de barras.

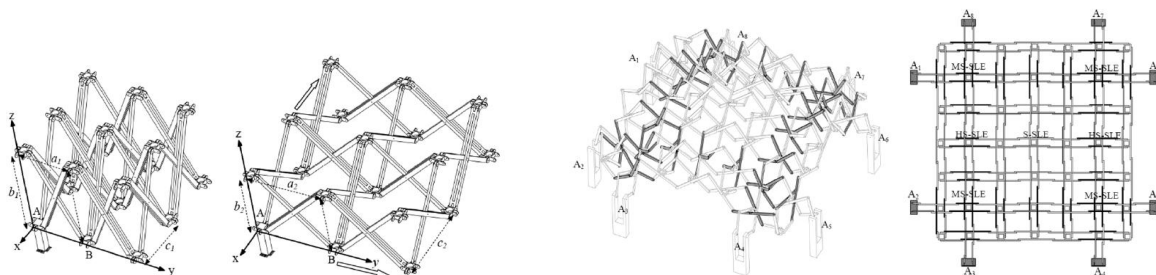


Fig 09. Propuestas de mecanismos con actuadores para sistemas desplegables con barras rectas.
Fuente: (Charis Gantes Y. A., 2011)

Niels De Temmerman

Por último es importante destacar el trabajo de investigación del Ingeniero Niels de Temmerman y de su grupo de investigación *Transformables* del Laboratorio AE Lab (architectural engineering) de la Universidad de Vrije en Bruselas. Enfocados en el uso de herramientas y medios de ingeniería para crear y diseñar arquitectura transformable. El avance en los diferentes programas de diseño computacional paramétrico y el uso de nuevos sistemas de fabricación digital y de materiales, están incorporados en las investigaciones del grupo de Transformables. La geometría compleja al representar en tiempo real el movimiento de una estructura desplegable y sus posibles limitaciones, sirve como referentes para el desarrollo de la presente investigación.

El diseño y análisis de las estructuras desplegadas con barras y su aplicación en la arquitectura son el foco de interés del trabajo de N. Temmerman. Es precisamente el esfuerzo en llegar a la aplicación arquitectónica lo que merece el interés. La construcción de prototipos a escala humana con ayuda del diseño paramétrico y la fabricación digital, permite dar soluciones al movimiento fluido de las barras y la disminución en sus deformaciones durante el proceso de pliegue y despliegue.

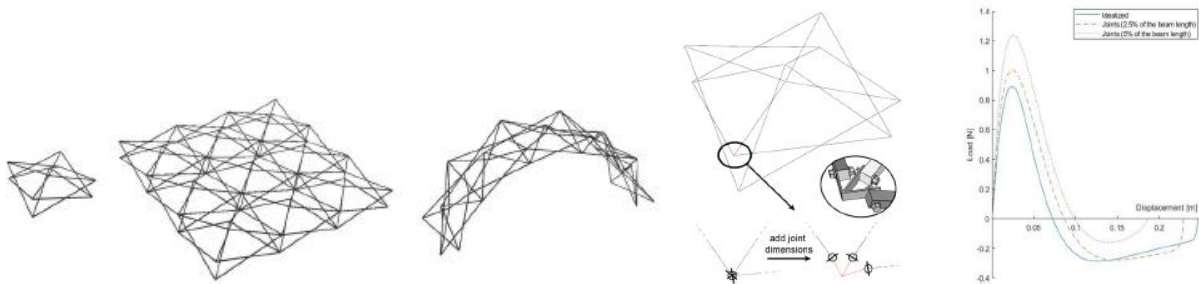


Fig 10. Análisis del modulo desplegable cuadrado por influencia de la gravedad.
Fuente: (Arnouts, de Temmerman, Massart, & Berke, 2018)

Definición de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas

Las estructuras desplegadas son por definición un sistema de barras articuladas que cambian su forma. Teniendo como resultado tres estados según su posición. El primer estado es el de uso o abierto. Este es el estado alcanzado por el conjunto de barras articuladas formando un sistema estable y configurando una superficie o un espacio. El estado de uso es logrado al controlar el movimiento ya sea con un elemento adicional al sistema según sus grados de libertad o ya sea porque el sistema detiene su movimiento según su geometría o forma.

Un segundo estado es de movimiento o transición. En este estado el sistema está en movimiento para alcanzar su estado de uso y normalmente cuenta con un solo grado de libertad. Durante el estado de movimiento la estructura se comporta de manera inestable o "nerviosa". Para un sistema desplegable entre mas articulaciones tenga mas nervioso será comportamiento durante su movimiento. Y Por último el estado cerrado. Este es normalmente el estado de reposo o almacenamiento. Y suele ser el estado en que menos espacio ocupa la estructura o el sistema.

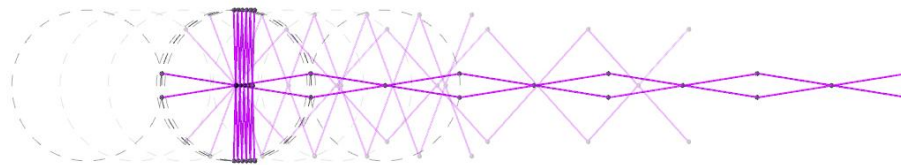


Fig 11. Esquema de tijeras rectas simples. Etapas de pliegue y despliegue.

En el desarrollo de este documento nombraremos a las *Estructuras Desplegadas con Barras Rectas Articuladas* por sus iniciales E.D.B.R.A. Las cuales son el foco de investigación y análisis de los casos de estudio presentados en los capítulos posteriores.

Grados de Libertad

En las estructuras desplegadas y sistemas móviles se consideran los grados de libertad al número de elementos necesarios para detener y controlar el movimiento de la estructura o sistema. Estos elementos rigidizan la estructura y la ponen en equilibrio. Le dan estabilidad formal al conjunto y controlan la posición final o límite de movimiento de la estructura. Es por esto que los sistemas móviles o desplegados requieran de grados de libertad para poder definir el estado de uso de la estructura. Los elementos que rigidizan la estructura pueden ser barras rígidas, cables, anclajes o membranas textiles.

En las estructuras desplegables con barras articuladas los módulos simples de pares de barras articuladas o unidad, tienen un solo grado de libertad. Normalmente las agrupaciones de los módulos o unidad simple, solo tienen un grado de libertad. Sin importar el tipo de unidad usada, ya sea polar o angulada.

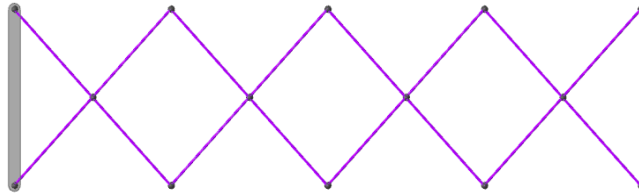


Fig 12. Esquema de agrupación lineal de unidades simples con articulación simétrica con un grado de libertad.

Es posible que en casos especiales la estructura desplegable tenga más de un grado de libertad. Dependerá de la estrategia de agrupación de sus módulos espaciales y de su geometría. Estos casos son poco frecuentes ya que dificultan el control de la estructura.

Cuando se diseña una estructura desplegable de barras articuladas se busca que solo tenga un grado de libertad, por simplicidad constructiva, por economía y por eficiencia estructural. Cada grado de libertad implica un elemento de bloqueo y entre más grados de libertad tengamos más elementos de bloqueo tendremos. Y si pensamos en la automatización de estos sistemas tendremos que considerar más número de actuadores (motores) para controlar la estructura.

Clasificación de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas (EDBRA)

Hacer una clasificación de los sistemas transformables resulta una tarea muy compleja, ya que la cantidad de variables puede resultar extensa. Por morfología, por tipo de movimiento, por articulación, por geometría de sus elementos, por sistema estructural, son algunos que podemos mencionar. Adicionalmente también existen los materiales y se pueden clasificar por el comportamiento mecánico. Sin embargo existen algunos autores que han propuesto clasificaciones a los sistemas transformables.

Clasificación por tipo de movimiento.

Las estructuras transformables o móviles han sido clasificadas en investigaciones anteriores y podemos encontrar clasificaciones por morfología, por tipo de movimiento y hasta por comportamiento estructural de sus elementos. Una de las más conocidas es la hecha por H. Hanaor y R. Levy (2002) donde agrupan los sistemas dinámicos según su morfología en dos grandes grupos; Agrupaciones rígidas y deformables.




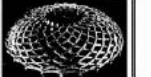
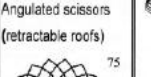
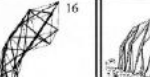
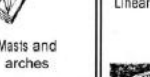

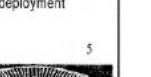
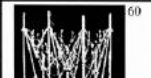

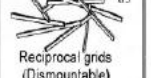



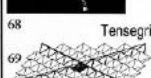
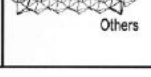



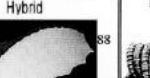

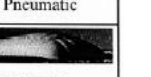

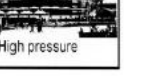
		Morphology			
		Lattice			Continuous
		DLG	SLG	Spine	Plates
Kinematics	Rigid links	Pantographic (scissors)			Folded Plates
		 Peripheral Scissors 19  Radial Scissors 55  Others	 Angulated scissors (retractable roofs) 74  Others 75	 Masts and arches 16  Others 98	 Linear deployment 110  Radial deployment 5
		Bars			Curved surface
		 Articulated joints 60	 Ruled surface 83  Reciprocal grids (Dismountable) 85	 Others 93	 Curved surface 101
	Deformable	Strut-cable systems		Tensioned membrane	
		 Others 68  Tensegrity 69  Others 97	 Tensegrity 90  Others 97	 Fabric 120  Hybrid 88  Ribbed	 Pneumatic  Low pressure 124  High pressure

Fig 13. Clasificación de las estructuras móviles.

Fuente: A Hanaor y R Levy, Evaluations of Deployable Structures for Space Enclosures. 2001

En las agrupaciones rígidas, las clasifica en mallas y en continuas. Las mallas las clasifica como sistemas tipo tijera en referencia a los pantógrafos. Los sistemas tipo tijera los divide en tijeras perimetrales, radiales y otros. Y tijeras anguladas. Para los sistemas continuos los define como placas o superficies desplegables. Los divide en desplegables lineales y radiales.

En el otro gran grupo de la clasificación encontramos los sistemas deformables. En esta clasificación tenemos los sistemas con cables y los sistemas tensionados con membranas textiles.

Clasificación por transformación.

Otra clasificación de las estructuras transformables más recientes es la hecha por la Dra. Carolina Stevenson Rodríguez de la Escuela de arquitectura de Liverpool (2011) en su artículo *Morphological Principles of Current Kinetic Architectural Structures*. En esta clasificación introduce variables de forma y de cambios de posición. También los patrones de agrupación lineal o circular. E introduce dentro de los sistemas transformables el origami como estructura y los sistemas recíprocos móviles. En la matriz de clasificación incorpora los tipos de movimientos según la transformación. Deformables, plegables, desplegables, retractiles, deslizables y giratorios. Y define la dirección de movimiento como mono-axial, biaxial y multi-axial.

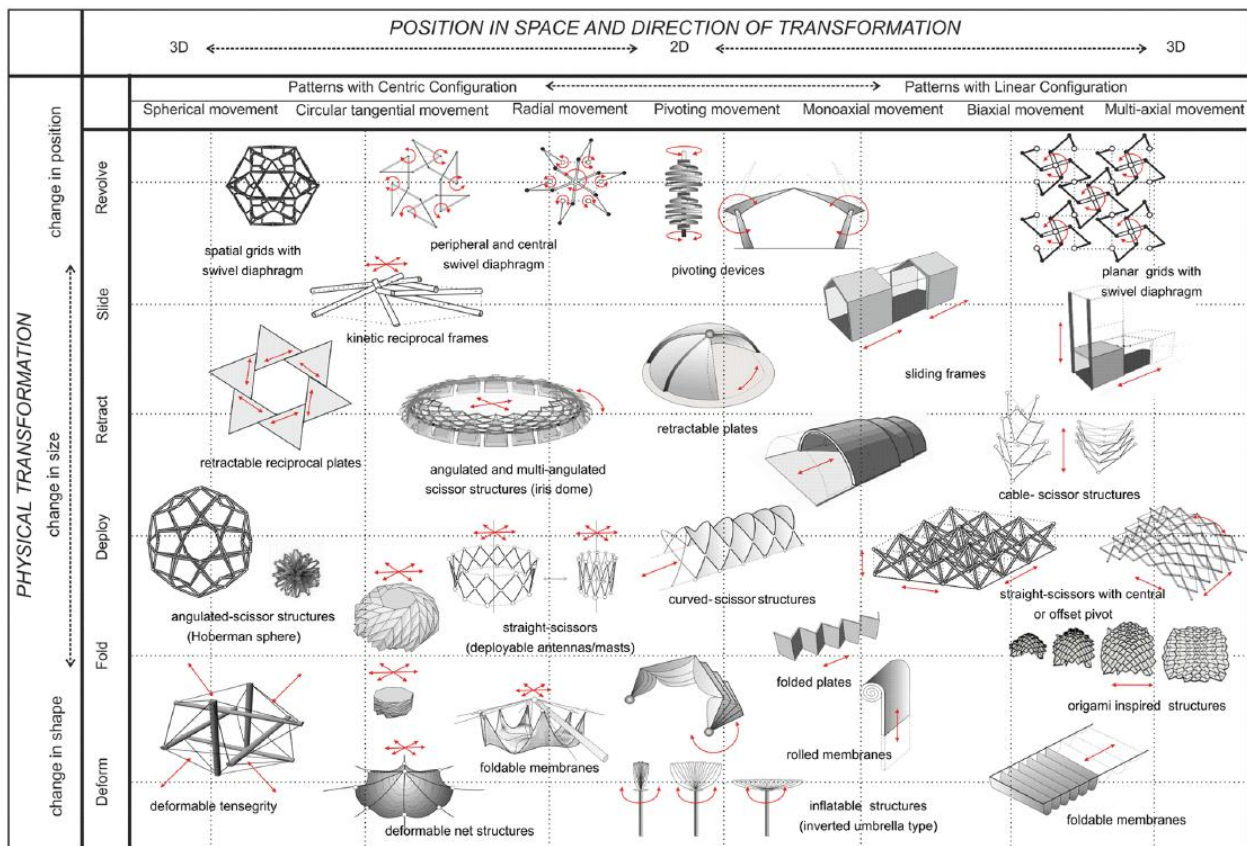


Fig 14. Clasificación por transformación física.

Fuente: Stevenson CM. *Morphological principles: current kinetic architectural structures*. London. 2011

Clasificación por tipo de superficie.

Y por ultimo una clasificación hecha por la estudiante de doctorado y miembro del grupo de investigación SMiA (Structural Morphology in Architecture), Natalia Torres. En su propuesta de clasificación publicada en el artículo *Estructuras Desplegables: Sistemas tipo Tijera. Revista Cuadernos de Arquitectura* V24. N35. 2do semestre 2017, define las estructuras desplegables como sistemas tipo tijera (STT). Esta clasificación se centra en los sistemas de barras articuladas, por lo que focaliza las variables en rectas y anguladas.

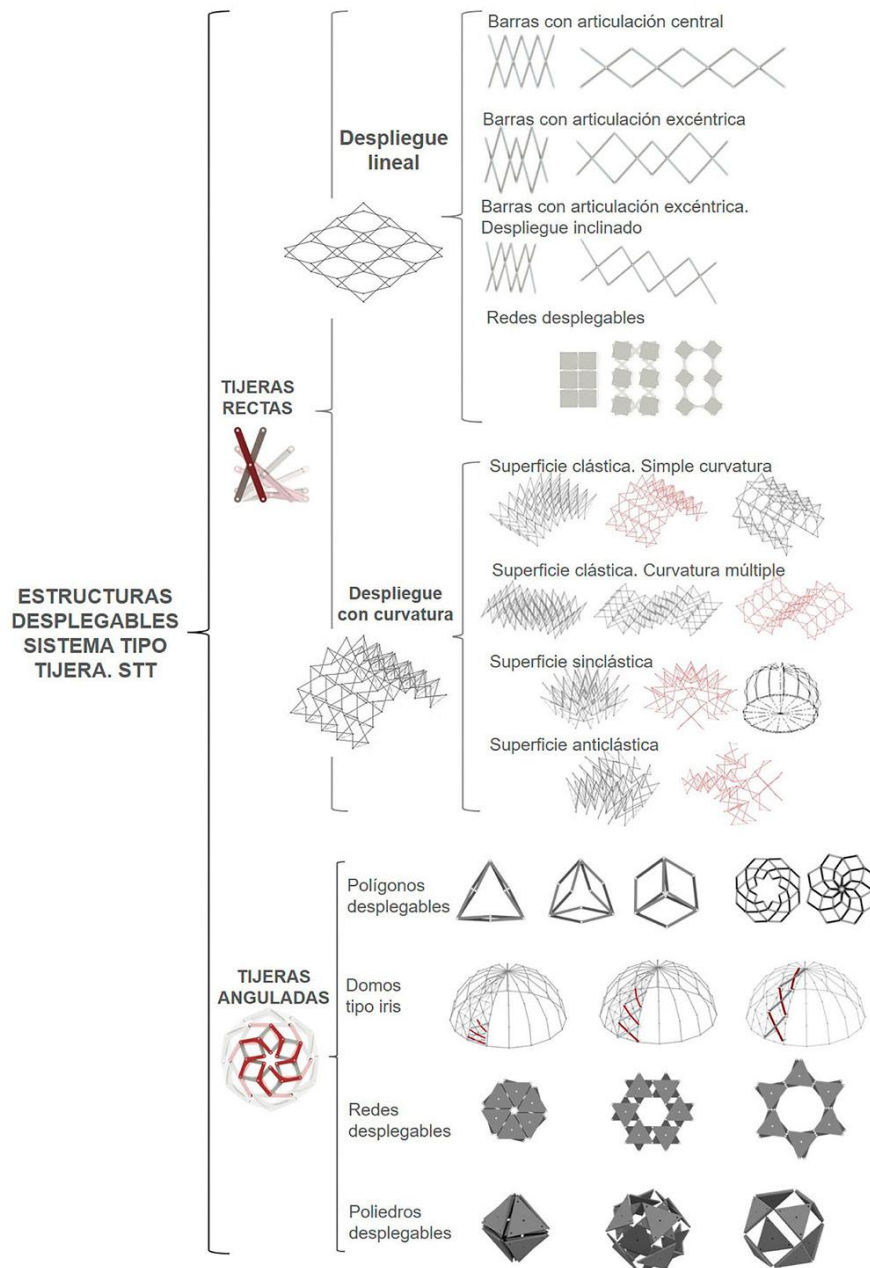


Fig 15. Clasificación de estructuras desplegables. Sistema Tipo Tijera. Fuente: (Natalia Torres, 2017)

En los sistemas rectos los divide por despliegue lineal y despliegue con curvatura. Para finalmente clasificarlos por tipo de articulación y forma de superficie. Define las barras con articulación central, excéntrica y redes desplegables. Y por forma de superficie en superficies con curvatura simple y doble curvatura. Para las de doble curvatura las divide en sinclásticas que son las superficies con doble curvatura y mismo sentido de giro, y las anticlásticas que son las superficies de doble curvatura pero con sentidos de giro opuestos. Para las tijeras anguladas define su clasificación en polígonos desplegables, domos tipo iris, redes desplegables y poliedros desplegables. (Natalia Torres, 2017)

Clasificación por tipo de curva.

Los sistemas desplegables con barras articuladas tienen varias formas de agrupación según su módulo y la curvatura que forma la orientación en la que se está agrupando. Si el sistema está agrupado por el mismo módulo este actúa como un mecanismo puro y sin ningún tipo de restricción. Pero también existen incompatibilidades geométricas que ocurren en los desajustes geométricos de las agrupaciones de módulos cuadrados. Estas incompatibilidades se ven en las deformaciones de las barras y tensiones adicionales del sistema. Estas condiciones de incompatibilidad fueron las mencionadas por F. Escrig y J. Valcárcel, en diferentes publicaciones. Y son justo estas restricciones las que permiten hacer una clasificación según la curvatura y su relación con la geometría y el movimiento para obtener sistemas desplegables que funcionen correctamente. (Roovers Kelvin, 2014)

Table 1: Classification of singly curved scissor grids

	Quadrangulated double-layer grid			Triangulated double-layer grid			Parallel linkage of linear scissor grids	
Scissor unit type(s)								
Basic module in deployed position								
Polyhedron described by basic module in deployed position								
Basic module in fully folded position								
Non-circular curvature	x	x	x		x	x		x
Deployment	foldable	foldable	foldable	incompatible	incompatible	foldable*	foldable*	snap-through
Needs external bracing	x	x	x					
Compactness ***	+	++	-	++	++	+	--	+
Single rod length		x		x	x			
Single joint hub	x	x	x	x	x	x**		

* Foldable if the angles between the scissor-unit planes in the grid are allowed to vary: special joint hubs required.

** Joint hub has to allow angular distortions of which the magnitude varies along the grid, thus it depends on the joint design.

*** Compactness in the stowed position, given as a scale from most compact (++) to least compact (--).

Fig 16. Clasificación de sistemas tipo tijera por curvatura. Fuente: (Roovers Kelvin, 2014)

Para la presente investigación tomaremos como referente las clasificaciones de las estructuras desplegables con barras rectas articuladas pertinentes para los casos de estudio a analizar, y desarrollaremos en los capítulos posteriores una clasificación más amplia que permita definir con precisión el comportamiento de los sistemas articulados con barras rectas.

Las EDBRA pueden clasificarse de varias formas. La más usada es según su tipo de articulación en la unidad simple. Podemos tener sistemas con articulación simétrica y con articulación asimétrica. Los sistemas con articulación simétrica forman agrupaciones lineales o planas. Esto debido a su movimiento simétrico de sus barras y por tanto describe una trayectoria ortogonal. Los sistemas con articulación asimétrica describen una trayectoria curva en el sistema.

También podemos clasificar las EDBRA por su forma de agrupación en el espacio. Planas, cuando la agrupación de sus módulos forma una superficie en el plano. Sinclásticas, cuando la agrupación de sus módulos forma una superficie de doble curvatura con el mismo sentido de giro. Y anticlásticas, cuando la agrupación de sus módulos forma una superficie de doble curvatura con sentidos de giro opuestos.

Otra forma de clasificarlas es según su geometría de modulo. Podemos encontrar generalmente sistemas con módulos triangulares, cuadrados y hexagonales. Y con la combinación de estos. Y también es posible construir EDBRA a partir de la descomposición de los sólidos geométricos regulares. Pueden ser por aristas y por caras. Los sistemas desplegables por vértices son posibles pero con barras anguladas.

Investigaciones Recientes - Estado del Arte

Actualmente y durante el desarrollo de esta investigación se han presentado nuevos aportes y estudios en el campo de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas en congresos internacionales como los de la IASS *International Association for Shell and Spatial Structures*. O el de *Transformables New Proposals For Transformable Architecture Engineering And Design*, Celebrado en Sevilla España en Septiembre del 2013. Organizado por el Arquitecto Felix Escrig, en honor a Emilio Perez Piñero. Y los del ICOSA, *International Conference on Structures and Architecture*. Entre otros, como el *Simposio Latinoamericano de Tenso-Estructuras*. Todos ellos han servido de escenario para presentar los nuevos avances de las EDBRA en los diferentes centros de investigación en Europa y América. Cabe mencionar que el autor de esta investigación cuenta con artículos y conferencias publicadas en los congresos mencionados, como parte del avance de esta tesis doctoral.

Para abordar los actuales desarrollos y avances en las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas se dividirá en tres grupos. Diseño paramétrico, prototipos y patentes.

Diseño Paramétrico

El modelado asistido por computadora es cada vez más frecuente en el diseño arquitectónico y estructural. Las herramientas digitales nos permiten tener más precisión en el cálculo de las dimensiones y eficiencias en formas, así como explorar geometrías complejas. El uso de estas herramientas ha tenido una evolución en los últimos años y hemos pasado de una generación de programas de diseño vectorial o de representación gráfica, a una última generación de programas de diseño generativo y paramétrico.

Esta nueva forma de diseñar se basa en la optimización de la forma mediante modelado por algoritmos o paquetes de información, diseño paramétrico. El diseño paramétrico permite crear reglas, códigos, y hasta fórmulas que tienen una relación definida entre sí. El resultado de estas relaciones es la representación gráfica del diseño. Que solo con modificar las relaciones cambia el resultado manteniendo la coherencia del diseño. Esto permite que aumenten las posibilidades de explorar múltiples soluciones.

Para las EDBRA abre un universo de posibilidades al poder explorar desde geometrías complejas, hasta poder diseñar un modelo de simulación de movimiento en tiempo real. Permite optimizar tiempo y recursos. Anteriormente la exploración de los sistemas desplegados por barras tenía que hacerse de forma análoga con la elaboración de maquetas hasta conseguir el diseño deseado. Hoy podemos hacer un diseño paramétrico de un sistema desplegable y poder comprobar su geometría y fluidez de movimiento mediante el modelo digital, mejorar su comportamiento y dimensiones antes de lanzarnos a construir el modelo físico. De todas formas siempre es importante el modelo físico o maqueta.

Transform - Grupo de Investigación

El grupo de investigación *Transform* de la universidad Vrije de Bruselas en Bélgica, ha presentado en varios congresos de la IASS (*International Association for Shell and Spatial Structures*) avances en el diseño paramétrico de las estructuras desplegadas. La tesis doctoral de Niels de Temmerman sirvió como punto de partida de este grupo.

El documento "*Diseño y Análisis de Estructuras Desplegadas con Barras para Aplicaciones Arquitectónicas Móviles*", de su título en inglés, "*Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications*". Publicada en Junio del 2007.

(http://homepages.vub.ac.be/~ndtemmer/Thesis_Niels_De_Temmerman.pdf)

En la investigación el autor propone dos métodos de diseño, usando parámetros dentro de la geometría y su interrelación para formar un sistema de barras desplegadas en dos dimensiones. Para explicar su método, propone hacerlo sobre una curva o arco el cual es la geometría más común para una aplicación arquitectónica. (Temmerman, 2007)

El método 1 propone partir de una curva o arco definido previamente y hacer la construcción geométrica de los módulos por unidades polares y con sus respectivas restricciones de pares de barras articuladas, como se muestra en la figura.

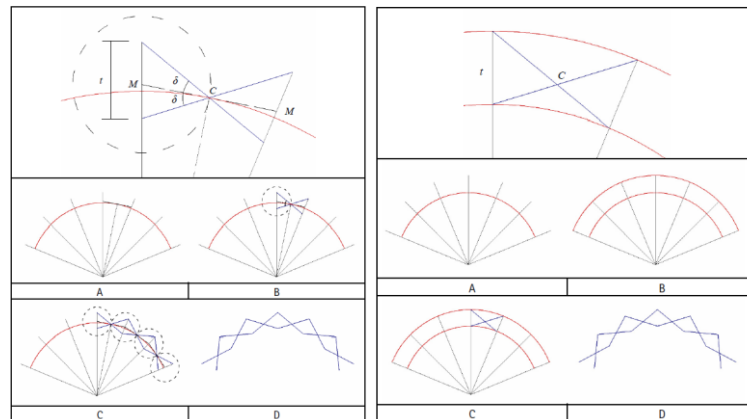


Fig 17. Métodos de construcción de las unidades simples de tijeras.
Fuente: (Temmerman, 2007) Pag 45 y 48.

Para el método 2 el autor propone trazar una curva en forma de arco y trazar otra curva interna o externa marcada por una constante en su distancia respecto a la curva inicial. Así cada unidad de tijeras simples es formada por la intersección de las líneas en el interior de cada modulo geométrico resultante. Las curvas paralelas son divididas en partes iguales para determinar la cantidad de pares de barras articuladas según el diseño.

Bajo este diseño geométrico el autor desarrolla superficies planas, sinclásticas y anticlásticas. Estos dos métodos son el punto de partida para el diseño paramétrico de las estructuras desplegables con barras rectas articuladas presentadas en los capítulos posteriores.

Método de Discretización para Barras Iguales

Los diseños de superficies complejas en sistemas desplegables con barras articuladas normalmente usan una, dos o hasta tres tipos diferentes de longitud de barras, incluso más si la frecuencia con la que se agrupan es mayor. Es el caso de las superficies geodésicas hecha con sistemas desplegables con barras rectas. En otros casos de discretización se limitan a la homogeneidad de la forma y no al número diferente de longitudes. El método propone el cambio de condiciones en el diseño de sistemas desplegables con barras rectas. El autor plantea iniciar con módulos definidos con elementos de las mismas longitudes y aproximarse a la superficie deseada. En resumen según el autor; "*si habitualmente las discretizaciones se han propuesto realizar superficies perfectas ejecutadas con barras imperfectas, se propone realizar geometrías imperfectas con barras perfectas*". (Begiristain, 2015)

Con el uso de Rhino + Grasshopper + Kangaroo, el autor toma un modulo hexagonal y la repite de forma que obtiene una malla hexagonal con barras de igual longitud. Partiendo de este sistema desplegable busca diferentes opciones de simulación física, aplicando fuerzas para lograr una superficie sinclásticas a partir de la malla inicial. Controlando las incompatibilidades de movimiento, remplazándolas o eliminándolas en algunos casos para lograr una discretización con todas las barras de igual dimensión.

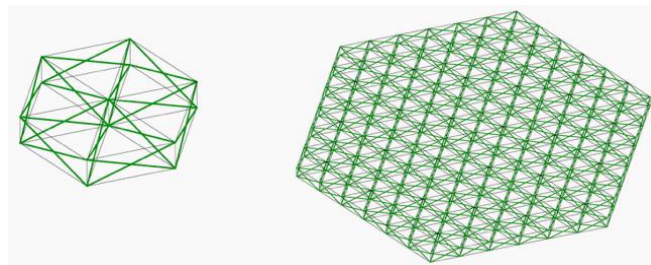


Fig 18. Modulo hexagonal del mecanismo y malla aplicada. Fuente (Begiristain, 2015)

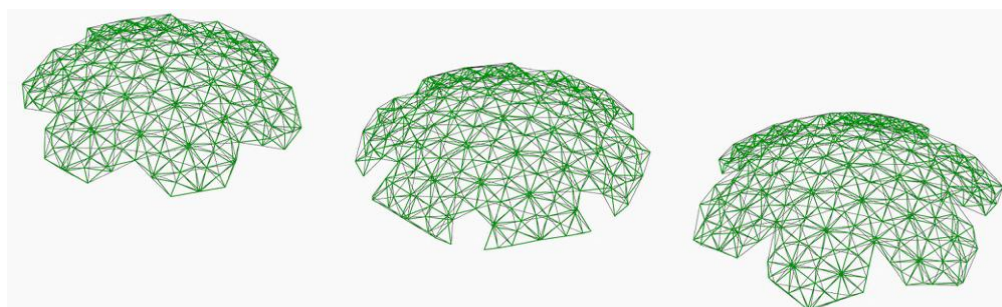


Fig 19. Mecanismos de nudos girados de seis barras: alteraciones de borde. Fuente: (Begiristain, 2015)

Diseño Digital de las Mallas de Tijeras Desplegables

En el artículo presentado para la IASS 2015 en Amsterdam, Diseño Digital de Mallas de Tijeras Desplegables Basado en Paquetes de Círculos (Digital design of deployable scissor grids based on circle packing) Los autores Kelvin Roovers y Niels Temmerman (Roovers & Temmerman, 2015) presentaron un método geométrico para el diseño de estructuras desplegables con barras articuladas a partir de mallas sinclásticas o anticlásticas.

El método de diseño parte de los parámetros básicos para formar una unidad o módulo de barras articuladas. Inicialmente se probaron mallas planas para configurar división o parametrización de la malla por paquetes de círculos ya sea por agrupación cuadrada o triangular respecto a sus centros.

Las mallas planas eran divididas por rejillas circulares unidas tangencialmente, esto permite controlar los radios o diámetros de los círculos, por tanto la densidad de círculos en la rejilla. Esto como consecuencia podía controlar la cantidad de módulos desplegables resultantes.

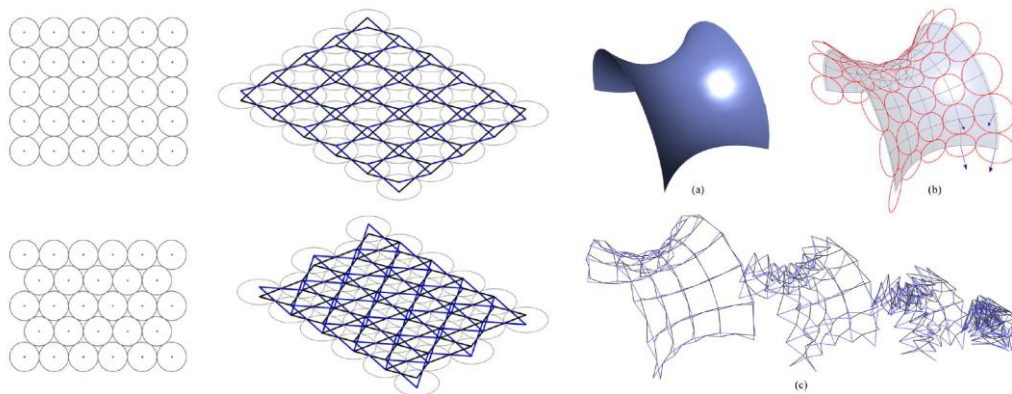


Fig 20. Método de agrupación por paquetes de círculos para sistemas desplegables tipo tijera.
Fuente: (Roovers & Temmerman, 2015)

Continuado con el método de agrupación por paquetes de círculos los autores proponen hacer una parametrización de las unidades polares de tijeras, o pares de barras articuladas para cualquier tipo de superficie sinclásticas o anticlásticas. En su propuesta toman la región o superficie de doble curvatura para formar paquetes de círculos sin importar el cambio de giro de la superficie, haciendo una red de círculos conectados de forma tangencial. Con esta propuesta de diseño paramétrico de acuerdo con los autores se amplía el abanico de exploraciones para superficies más complejas, ya que hasta el momento las aplicaciones de las estructuras desplegables se limitan a superficies geodésicas o de curvatura simple.

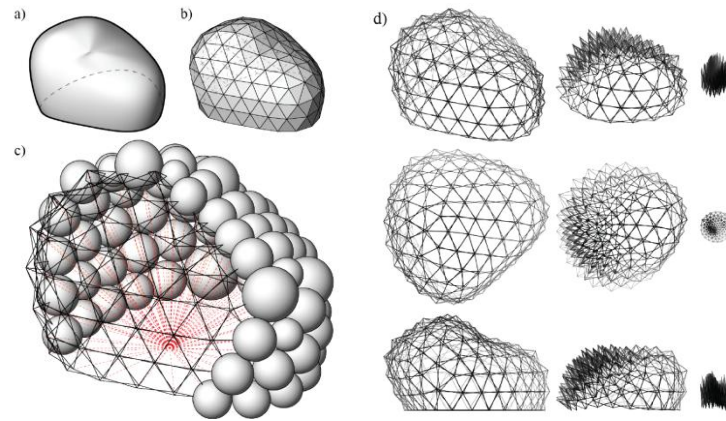


Fig 21. Ejemplos de una red de tijeras no esféricas con módulos triangulares. Fuente: (Roovers & Temmerman, Geometric Design of Deployable Scissors Grid Consisting of Generalized Polar Units, 2018)

En este artículo los autores proponen incorporar los rombos como base de la geometría para evitar restricciones de movimiento en el momento de parametrizar superficies complejas. E incorporan una propuesta de malla desplegable de doble nivel para dar mayor estabilidad al sistema. Como bien lo mencionan en su publicación, la parametrización de los módulos polares abre la posibilidad de explorar nuevas configuraciones geométricas y superficies complejas. Hay que tener cuidado con las restricciones de movimiento y proporción. Pero en definitiva es un gran paso para explorar nuevas aplicaciones con estos sistemas desplegables.

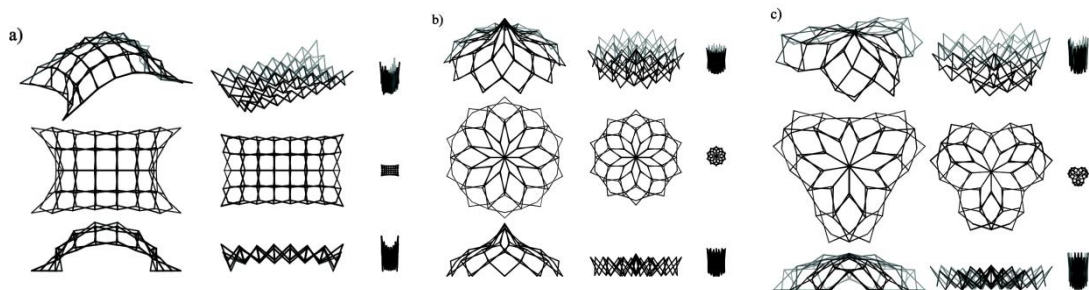


Fig 22. Tres redes desplegables de tijeras con patrones de rombos uniformes y de geometría no esférica. Fuente: (Roovers & Temmerman, Geometric Design of Deployable Scissors Grid Consisting of Generalized Polar Units, 2018)

Modificación de patrones y geometría en los sistemas desplegables.

Las EDBRA son sistemas que por lo general esta formados por módulos simples o unidad, y la repetición de módulos compuestos, siguiendo un patrón de conexión y tejido para formar una cascara sinclásticas o anticlásticas. Esto quiere decir que la repetición del modulo definida por un patrón de conexión es parte del todo. Pero qué pasa si en algún punto alteramos de forma intencional uno de los módulos compuestos por otro diferente. Esta es la hipótesis de investigación propuesta por los autores del articulo. (Charis Gantes, 2010)

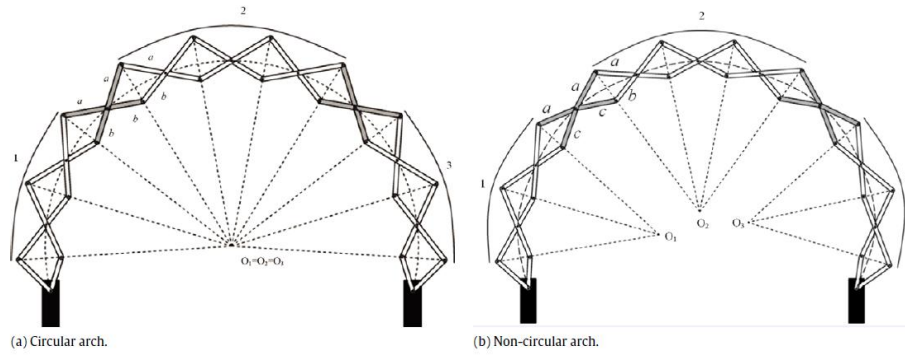


Fig 23. Opciones geométricas según las dimensiones del sistema. Fuente (Charis Gantes, 2010)

Los autores proponen bajo las condiciones de plegabilidad del sistema, modificar los patrones de repetición, haciendo cambios en la unidad de pares de barras por otras. Puede ser por otra unidad simple con diferente punto de articulación, o por unidades simples con barras anguladas. Eso si siempre manteniendo libre de restricciones el sistema. Para el control de movimiento del sistema propuesto, insertan actuadores que permiten mantener la estabilidad y control del movimiento.

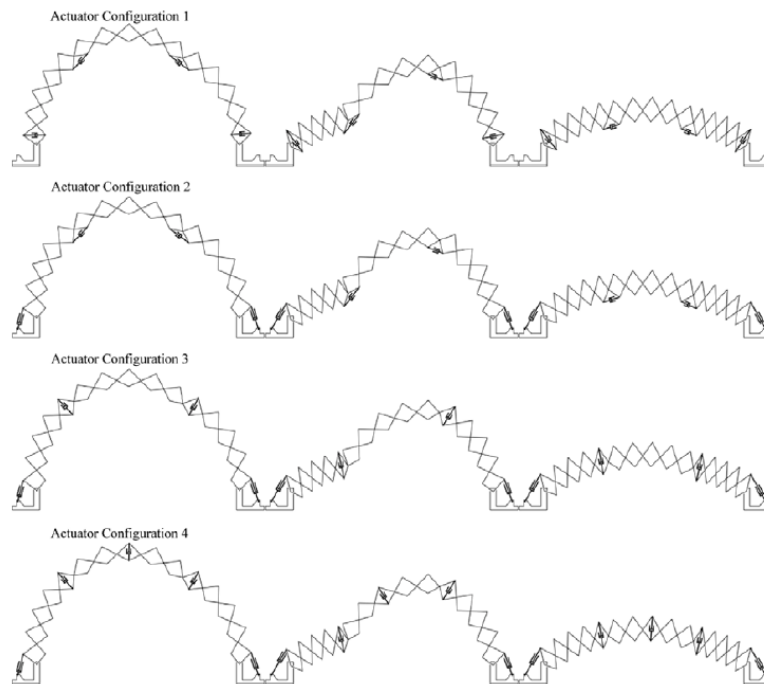


Fig 24. Geometrías propuestas y ubicación de actuadores para el control de movimiento. Fuente: (Charis Gantes, 2010)

Los autores también presentan en la misma publicación del año 2011 otro artículo en el cual proponen un novedoso mecanismo para los sistemas tipo tijeras aplicados a cubiertas convertibles. Bajo el principio de modificar la unidad dentro de un sistema desplegable, proponen una conexión que junto a la unidad modificada, es posible cambiar la geometría y forma de todo el sistema sin modificar las dimensiones de

sus elementos. Para estas propuestas de modificación de unidades, desarrollan las posibles variantes con sus respectivas limitaciones, parametrizando los patrones de agrupación para las unidades simples de tijera en un sistema espacial. (Yenal Akgüna, 2011)

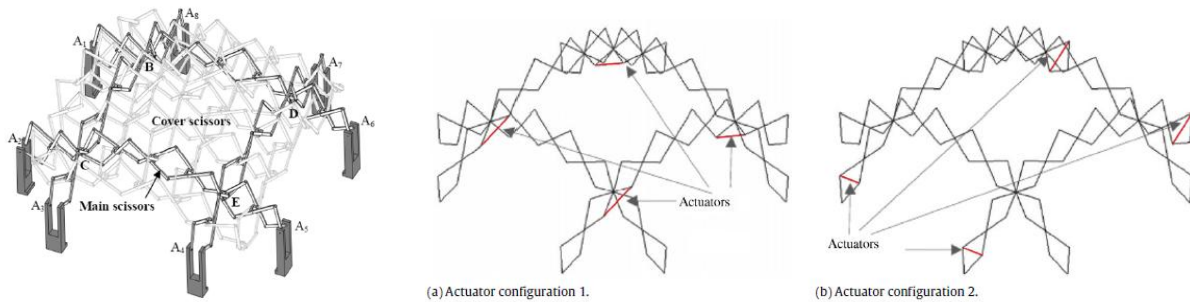


Fig 25. Mecanismos para los sistemas tipo tijeras espaciales y configuración de los actuadores. Fuente: (Charis Gantes Y. A., 2011)

El sistema que proponen los autores permite tener una cascara desplegable formada por barras de la misma dimensión con la ventaja que puede cambiar de forma al cambiar la curvatura de sus actuadores, cambiando así de geometría sin cambiar de tamaño del área cubierta. Esto significa que el sistema tiene la posibilidad de tener más de una posición final de uso. Es adaptable según las condiciones de contorno. El comportamiento estructural del sistema propuesto está dividido en dos partes, por un lado la rejilla principal donde están los actuadores y las unidades de tijera simple diferentes que cambian las condiciones de movimiento. Y otro los elementos secundarios del sistema que solo transmiten las cargas y deformaciones al sistema principal.

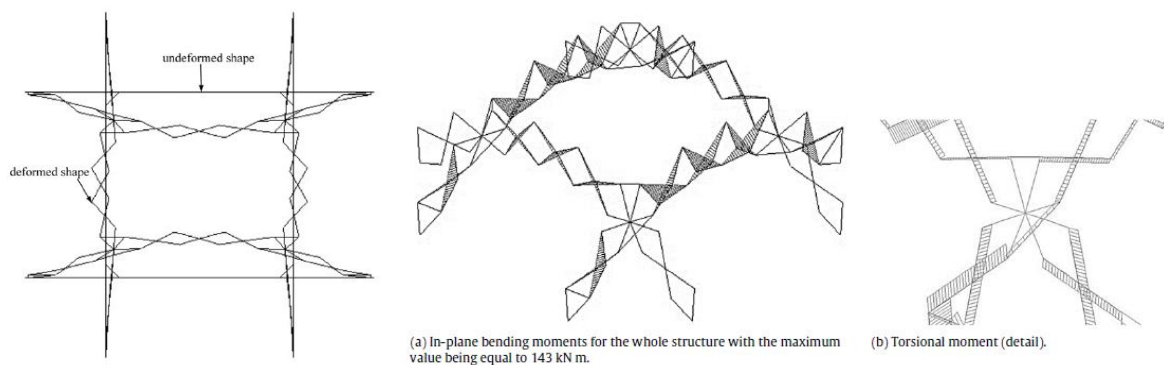


Fig 26. Comportamiento estructural del sistema desplegable propuesto con actuadores. Fuente: (Yenal Akgüna, 2011)

Prototipos

El uso de programas de diseño paramétrico es una herramienta vital para la exploración de nuevas configuraciones geométricas y para hacer comprobaciones virtuales de movimiento y de compatibilidad.

Pero sin duda es necesario el uso de maquetas a escala. Y de ser posible hacer cambios de escala hasta llegar a la construcción de prototipos. La maqueta es muy común en la arquitectura, pero en el caso de los sistemas desplegados es fundamental. La maqueta nos permite a través de la observación ver problemas o deformaciones que en el diseño digital pueden ser imperceptibles. Y en el caso del prototipo es la forma más directa de diseñar soluciones al detalle, de la fabricación y construcción de los sistemas desplegados. Es el único escenario donde podremos hacer las comprobaciones digitales y de maquetas.

Infraestructura de Intervención Urbana

La tesis doctoral "XXX, Sistemas Estructurales Desplegados para Infraestructuras de Intervención Urbana Autoconstruidas" propone el uso de las estructuras desplegadas como posible solución a construcción de infraestructura temporal de una ciudad. Entendiendo infraestructura urbana como; *"el conjunto de elementos o servicios que se consideran necesarios para la creación y funcionamiento de una organización cualquiera"*. Teniendo como campo de aplicación el uso de vacíos urbanos. (Begiristain, 2015)

En su propuesta el autor da tres posibles mecanismos o módulos a usar para la construcción de prototipos, todos formados por barras de igual longitud. En el prototipo construido se diseñan los nudos de forma que se puedan usar las combinaciones de mecanismos de barras cruzadas y de nudos para mallas de módulos hexagonales o triangulares. Se construyen dos prototipos, uno es un módulo hexagonal de barras cruzadas y otro de tres hexágonos de nudos girados de tres barras.

La construcción de prototipo de módulo hexagonal con barras cruzadas tenía un peso de 92kg. Fue manipulado por dos personas haciendo pruebas de abrir y cerrar la estructura. Por volumen y tamaño de la estructura no se continuó la fabricación de más módulos, presentando dificultades de manipulación.

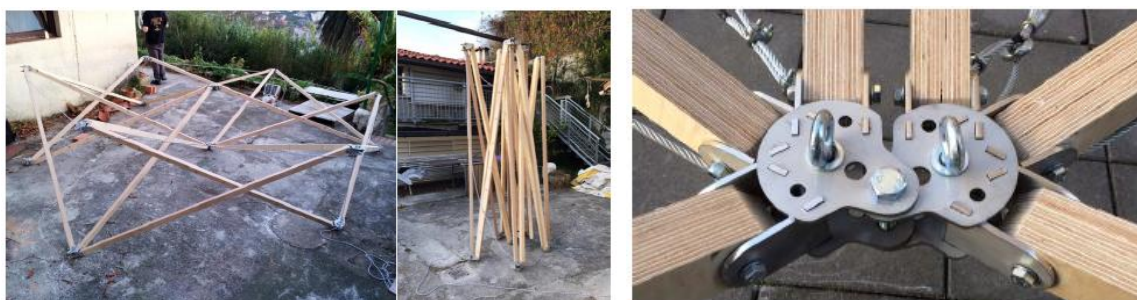


Fig 27. Prototipo de módulo hexagonal con barras cruzadas. Fuente: (Begiristain, 2015)

En el prototipo de nudos cruzados el autor diseñó las articulaciones de unión entre las barras de forma que permitiera el giro de la barra y la unión del cable triangulado a sus centros para dar mayor estabilidad al sistema. En un primer montaje la estructura presentó pandeos en algunas de sus barras debido a las

tensiones internas transmitidas por el sistema. Estos pandeos fueron mejorados en un segundo montaje haciendo ajustes a los nudos cruzados. La estructura presentó una estabilidad moderada al ser expuesta a una carga de 90kg. Presentando una flecha de deformación de 5cm. En una segunda carga de la estructura con un peso de 60kg la estructura presentó rotura en una de sus barras perimetrales. Una de las conclusiones dadas por el autor es el excesivo peso de la estructura, mejorable mediante el dimensionamiento proporcional de barras y nudos.



Fig 28. Detalles del prototipo de tres módulos hexagonales y nudos cruzados. Fuente: (Begiristain, 2015)

El proceso de fabricación y montaje, así como las pruebas de carga hechas por el autor demuestran la importancia de la construcción de prototipos a escala humana, probando así los mecanismos de diseño y el comportamiento de las articulaciones. Las deformaciones de las barras y algunas de sus roturas son muestra de las tensiones que sufren los sistemas desplegados llevados hasta cargas máximas con el fin de probar el comportamiento estructural del sistema.

Sistemas Desplegables de Emergencia

Las EDBRA siempre han sido una buena opción para su aplicación en la arquitectura de emergencia, quizás sus características más llamativas son las de rápido montaje, transportables, ligeras. El problema es que para llegar a tener una aplicación como arquitectura de emergencia no solo basta con las características mencionadas y una propuesta geométrica impactante. La arquitectura de emergencia requiere soluciones que van más allá de la forma. Necesita desarrollar soluciones integrales de habitabilidad y confort que posiblemente hace falta hacer en las propuestas con estructuras desplegadas.

Sin embargo podemos encontrar algunas aproximaciones de propuestas con estructuras desplegadas aplicadas a la arquitectura de emergencia.

El trabajo aportado en el artículo "Estructuras de barras expandibles para situaciones de emergencia" los autores incluido el Profesor Juan Pérez Valcárcel, quien trabajó por varios años con el Arq. Feliz Escrig en el cálculo y dimensionamiento de las estructuras desplegadas con barras rectas, proponen la aplicación de sistemas desplegados a situaciones de emergencia. Diferencian esencialmente dos tipologías de

arquitectura de emergencia, la primera el modulo habitable o vivienda. Y la segunda los edificios de equipamientos o servicios. (J. Perez Valcárcel, 2019)

En la investigación mencionan la poca aplicación y propuesta de estructuras desplegables que hayan sido construidas. Siendo más frecuente su uso para cubiertas o superficies. La propuesta desarrollada se ocupa no solo de la solución del sistema desplegable, sino de los factores y requerimientos para una vivienda e emergencia, solicitados por organizaciones internacionales para casos de emergencia.

La propuesta para el modulo de vivienda incluye un sistema de base o suelo portable con estructuras desplegables, lo que hace ser adaptable a cualquier terreno plano sin intervención in situ. También plantea la distribución espacial necesaria para la habitabilidad y confort mínimo para su uso. Por último propone un sistema de paneles de cerramiento y cubierta con sistemas ligeros que también sirven como elementos de rigidización del sistema. Lo interesante de la propuesta es el intento por resolver todas las variables para una vivienda de emergencia aplicando un sistema desplegable.

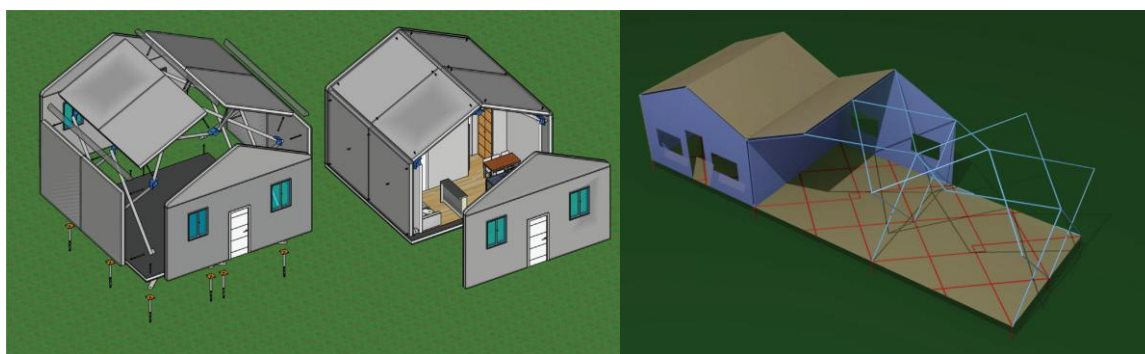


Fig 29. Propuesta de vivienda de emergencia con sistemas de barras expandibles. Fuente: (J. Perez Valcárcel, 2019)

Los autores también desarrollaron un modulo para equipamientos y servicios. Presentando un modulo de mayor tamaño con un doble sistema de barras articuladas. Una para suelo y otra para muros y cubierta. La propuesta integra los dos sistemas como uno solo. En este caso proponen un cubierta textil simple o doble en caso que se requiera mejorar las condiciones de aislamiento.

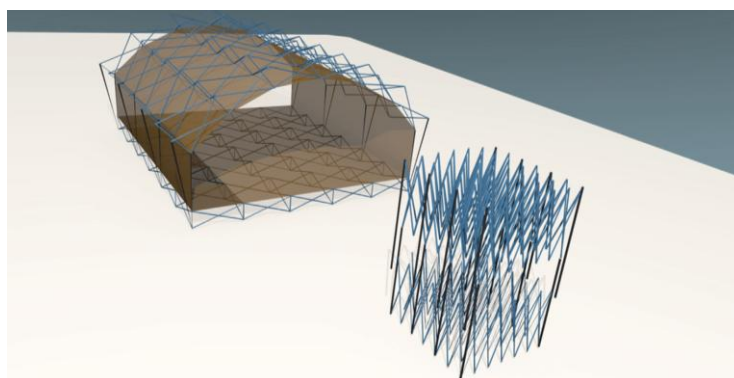


Fig 30. Propuesta de modulo de emergencia como equipamiento o servicios. Fuente: (J. Perez Valcárcel, 2019)

La investigación actualmente se encuentra en etapa de diseño y producción de modelos físicos para pruebas de movimiento y modulación.

Escenario Desplegable

Otras de las potenciales aplicaciones de las EDBRA son los escenarios o stands para eventos tanto deportivos como culturales. La ligereza y su rápido montaje hacen de los sistemas desplegables son una opción ideal para su aplicación. Nuevamente nos encontramos con propuestas y diseños planteados por diferentes autores, pero todos en el campo del diseño digital o maquetas a pequeña escala.

Nuestra compañera del grupo de investigación SMiA Natalia Torres, presenta en su investigación doctoral una propuesta para un escenario desplegable usando sistemas desplegables. El objetivo es resolver la mayor cantidad posible de problemas constructivos aplicados a un proyecto específico y real. Es decir un proyecto construido. (Torres, 2017)

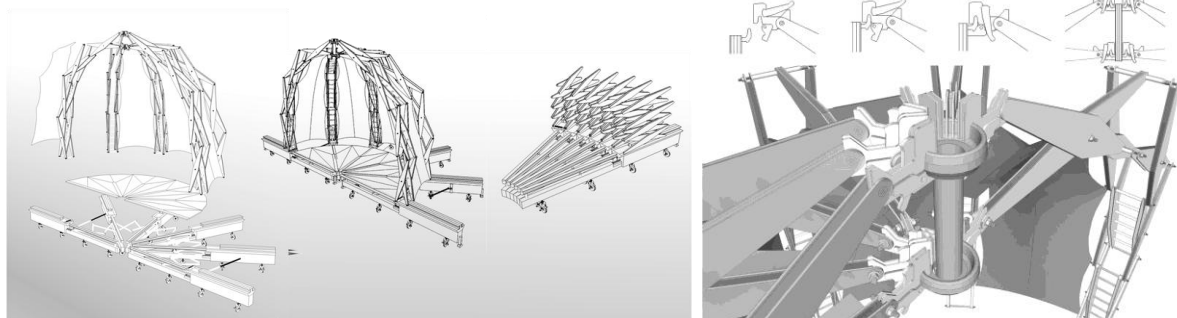


Fig 31. Prototipo para escenario desplegable con arcos. (Torres, 2017)

La autora propone una metodología de diseño para arcos desplegables, teniendo como base los polígonos regulares y su variación angular. Con este punto de partida, diseña un escenario desplegable compuesto por arcos desplegables con barras rectas. Definiendo la cantidad de arcos y los módulos simples de barras articuladas por arco. También plantea la integración de un suelo de paneles desplegables que funcionan como sistema de adaptación al terreno y también como punto de anclaje de los arcos. La cubierta es textil y cuenta con un sistema de apertura que evita el desgarre o rotura de la membrana.

El proyecto plantea soluciones constructivas para cada uno de sus elementos. Pero cabe destacar el nudo o clave propuesto para recibir los arcos en su punto máximo de apertura. El nudo resuelve la unión de los arcos y la continuidad en la transmisión de carga de los arcos. También la estabilidad de todo el sistema.

El proyecto ha tenido algunas variaciones en su etapa constructiva desde las maquetas en pequeña escala, hasta los prototipos a escala humana. Llegando a soluciones con arcos en tubos de cartón y suelo en madera, hasta una propuesta íntegra en barras de aluminio.



a.

b.

Fig 32. (a) Prototipo con barras en tubos de cartón y suelo en madera. (b) Prototipo con barras de aluminio.
Fuente: www.smia-experimental.com

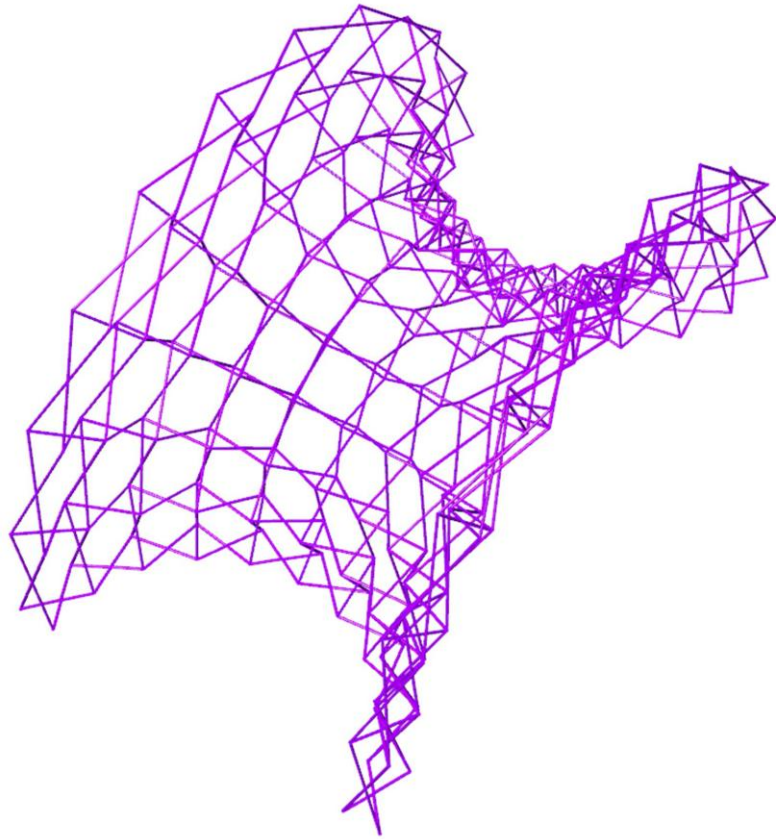
Discusión del Estado del Arte

Como podemos observar en el campo de la investigación de las EDBRA contamos con trabajos que abordan de diferentes maneras los sistemas desplegados, bien sea desde el punto de vista del diseño paramétrico, el análisis de movimiento vectorial y polar o la construcción de prototipos a escala humana con el fin de dar soluciones constructivas a los sistemas desplegados.

Cada uno de estos enfoques permite resolver el movimiento límite de las EDBRA sin llegar a ser abordado en profundidad. También es una muestra de que los sistemas desplegados requieren de un control de movimiento límite que garantice la posición final de uso de la estructura y su estabilidad. En algunas de las investigaciones se puede apreciar el interés en dominar la forma, aplicando patrones geométricos para un movimiento fluido de la estructura, pero en otros casos se pueden ver geometrías que buscan bloqueos parciales de movimiento del sistema.

Considerando que las EDBRA son sistemas desplegados en su mayoría con un solo grado de libertad y que tienen una cantidad considerable de articulaciones, las convierte en sistemas nerviosos. Esto quiere decir que son estructuras con dificultad para controlar su movimiento, inclusive cuando esta está en su máximo despliegue.

Por otro lado las uniones articuladas son parte importante para resolver el control límite de movimiento de las EDBRA, y su diseño será parte de la respuesta constructiva que se quiere abordar en este documento. El recorrido de esta investigación es abordar el control de movimiento límite de las EDBRA como una variable de diseño y como una respuesta constructiva a los sistemas desplegados.



Capítulo 03

Diseño Paramétrico de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas:

Diseño y Parametría

Las *Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas* (EDBRA) por sus iniciales las cuales nombraremos así en este documento, son sistemas desplegados formados por unidades simples de un par de barras articuladas en su centro, y unidas en sus extremos por más unidades para formar sistemas o módulos. La agrupación de módulos nos da como resultado sistemas desplegados complejos.

Los sistemas desplegados han evolucionado en los últimos años de la mano con el avance de programas en diseño paramétrico, permitiendo que la modelación y pruebas de movimiento sean mucho más rápidas que antes. De esta manera hace posible modelar sistemas desplegados complejos en corto tiempo. El diseño de movimiento implica tener una comprensión geométrica y espacial mucho más allá de los sólidos platónicos. Y de polígonos y poliedros regulares.

La posibilidad de diseñar un sistema desplegado complejo con un número considerable de elementos rígidos y articulaciones, logrando comprobar restricciones o incompatibilidades de movimiento, con el objetivo de explorar la morfología y sus posibles aplicaciones, todo mediante un código o algoritmo que permite modificar cuantas variables sean necesarias, facilita el camino para experimentar con estos sistemas.

En esta investigación nos ocuparemos de las Estructuras Desplegadas con Barras Rectas Articuladas, su diseño y parametría. Explorando las diferentes morfologías posibles teniendo en cuenta las restricciones geométricas y de movimiento, así como las incompatibilidades por forma o movimiento. Para la exploración geométrica se usará *Rhinoceros + Grasshopper* con la idea de diseñar el movimiento de los sistemas desplegados con barras rectas articuladas.

En los casos de EDBRA más complejos en los que se propone el uso de membranas textiles se usarán Kangaroo como motor de simulación física para obtener las geometrías deseadas.

Si bien el uso de software de diseño paramétrico es una herramienta de gran ayuda para la exploración y diseño de sistemas desplegados, durante el desarrollo de esta investigación fue necesario el uso de modelos físicos a escala para hacer comprobaciones y pruebas que en el software eran limitadas. La complejidad de diseñar sistemas desplegados o móviles hace de la maqueta física una herramienta fundamental para esta investigación.

Construcción Geométrica y Paramétrica de las EDBRA

En este capítulo se presentara la forma geométrica y morfológica para construir y diseñar Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas. Desde la unidad simple hasta las agrupaciones complejas y combinaciones posibles entre diferentes módulos desplegados. Tomaremos como punto de partida las agrupaciones lineales, continuado por agrupaciones con superficies plana, sinclásticas y anticlásticas. Para finalmente explorar combinaciones entre ellas para formar sistemas desplegados compuestos con el objetivo de tener objetos habitables espaciales.

Unidad Simple

Las EDBRA son sistemas desplegados formados por una unidad simple de dos pares de barras rectas articuladas en su centro. Esta articulación central simétrica es la que hace que sus barras giren respecto a su centro marcando un recorrido circular. Los círculos que están inscritos en los extremos de cada barra se desplazan constantemente manteniendo el mismo eje central de su articulación. La intersección entre los círculos garantiza la longitud de las barras. A este conjunto lo llamaremos Unidad Simple.

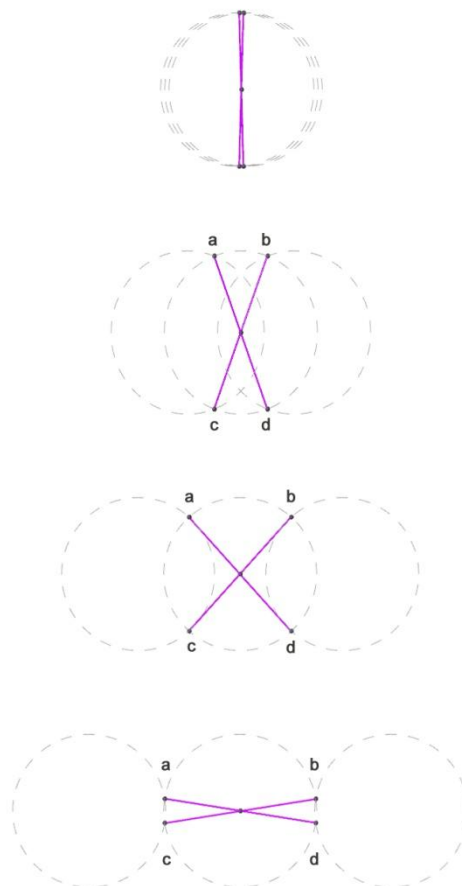


Fig 33. Diseño paramétrico de la unidad simple simétrica desplegable.

También podemos construir unidades simples formadas por pares de barras rectas con articulaciones desplazadas de su centro. Es decir con una articulación central asimétrica. El resultado de tener un par de barras con su articulación desplazada de su centro es un recorrido polar. Significa que tenemos dos extremos largos y dos extremos cortos respecto a su centro asimétrico. Y tenemos un ángulo de referencia entre las proyecciones del extremo corto y el extremo largo. El ángulo varía según la rotación de sus barras.

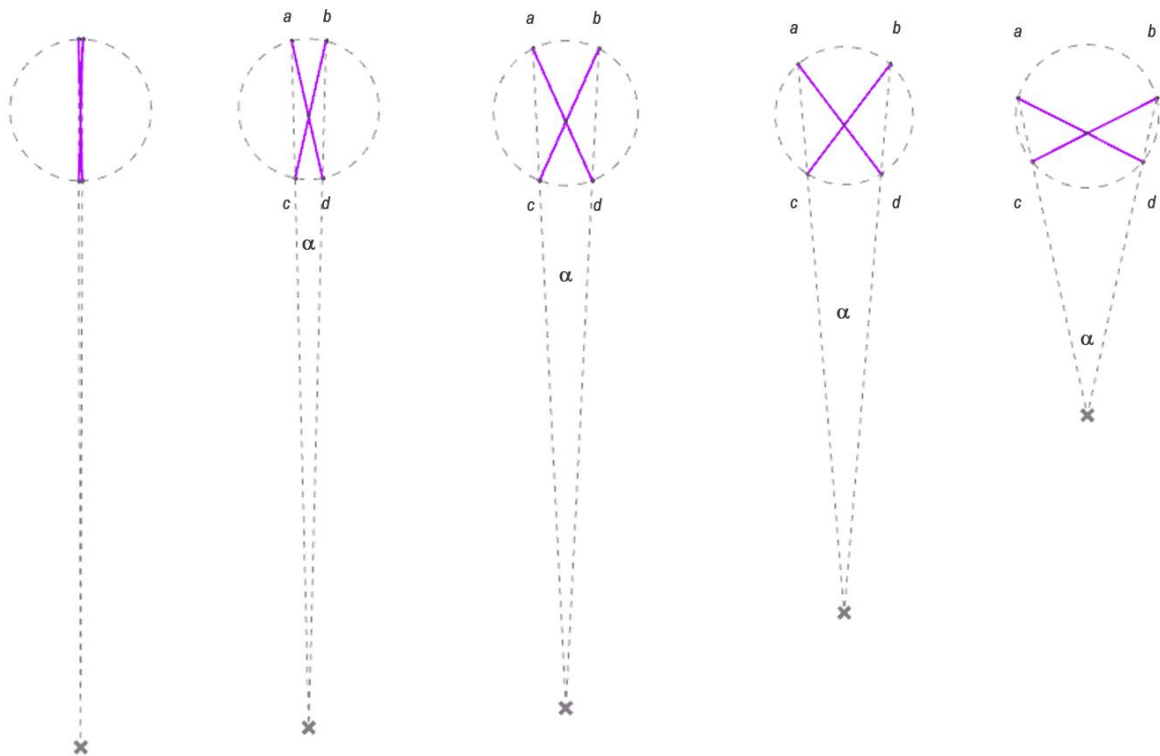


Fig 34. Diseño paramétrico de la unidad simple asimétrica desplegable.

Y por ultimo podemos tener también una unidad simple con asimetría en la longitud de barras. Es decir una barra corta y otra larga con una articulación central. Con estos parámetros podemos combinarlos de forma aleatoria o con algún patrón definido para obtener sistemas lineales y espaciales desplegados.

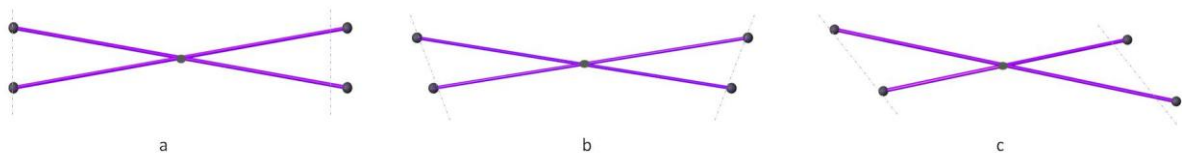


Fig 35. (a) Unidad simple simétrica. (b) Unidad simple con articulación asimétrica. (c) Unidad simple con barras asimétricas.

Restricciones de movimiento

Al explorar con las unidades simples para empezar a formar sistemas lineales agrupando mas unidades, hay que tener cuidado con agrupar unidades simples que no tengan una simetría al formar los rombos en su interior. La construcción de rombos simétricos permite un movimiento fluido, los rombos deformados que no permitan dividir en dos partes iguales los rombos bloquean el movimiento. Si se quiere garantizar un movimiento fluido entre cerrado y abierto máximo para un sistema EDBRA. De no ser así el sistema tendrá un bloqueo de movimiento en algún punto de su recorrido sin llegar a cerrar o abrir por completo.

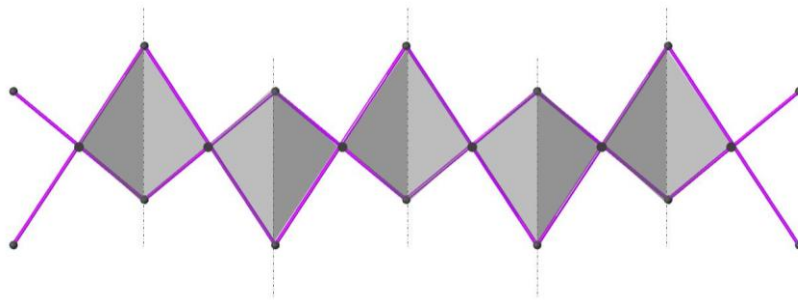


Fig 36. Ejemplo de simetría de rombos para evitar restricciones de movimiento fluido.

Parámetros de diseño y condiciones de contorno

Para comenzar con el diseño de EDBRA más complejos y tener una progresión geométrica en la exploración de sistemas desplegados, es necesario indicar unos parámetros que son inherentes a la agrupación de unidades simples desplegadas y de su movimiento. Debido al trazado lineal que ocurre al agrupar dos o más unidades simples es lógico pensar que podríamos clasificar las EDBRA según su dirección de tejido o red.

Las agrupaciones de unidades simples las podemos hacer en una, dos o tres direcciones o vectores de movimiento. Es por esta razón que una de las variables importantes de diseño para la exploración de sistemas desplegados es según su dirección de tejido. En esta investigación llamaremos a esos tejidos como sistemas axiales. Para una agrupación con una sola dirección con vector de movimiento Axial. Para dos direcciones Bi-axial y para tres direcciones triaxial.

Esta estrategia de diseño facilita la parametrización de sistemas desplegados ya que podremos hacer optimización de mallas para las superficies complejas y así poder discretizar por módulos.

La unidad mínima para la construcción de una EDBRA es la unidad simple, pero no es suficiente para el diseño de estructuras desplegadas con aplicaciones arquitectónicas. Entonces será necesario el diseño de una unidad mínima para construir sistemas desplegados complejos. Para esta investigación la unidad

mínima para diseñar estructuras desplegables espaciales será el modulo. El modulo mínimo posible es el formado por tres unidades mínimas en tres direcciones diferentes. Es decir un modulo tri-axial.

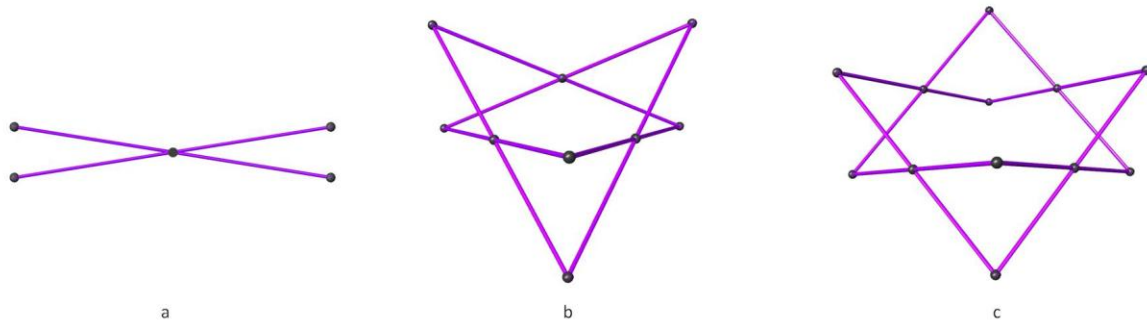


Fig 37. (a) Unidad simple simétrica lineal. (b) Modulo triangular tri-axial. (c) Modulo cuadrado bi-axial.

Otra de las características geométricas que tomaremos como parámetros para el diseño de las EDBRA son su forma de superficie, para este caso valoraremos la discretización de superficies para el diseño de sistemas desplegables. Y por ultimo exploraremos la descomposición de las aristas de los polígonos remplazándolas por barras articuladas y explorando agrupaciones planas y espaciales. Para llegar a los sólidos desplegables por aristas y caras planas.

Parametrización de superficies

Teniendo la construcción geométrica de las unidades simples simétricas y asimétricas, y de sus agrupaciones lineales rectas y curvas, podemos empezar a combinar las unidades simples para formar superficies. Y estas combinaciones nos llevaran a formar agrupaciones espaciales complejas. La estrategia de combinar unidades simples dará como resultado la construcción de un modulo.

El siguiente paso es definir las superficies básicas a discretizar para poder definir los parámetros de agrupación de módulos y aplicarlos para formar las superficies deseadas. Las superficies que tomaremos como referencia para el diseño de EDBRA son tres. Superficies planas, sinclásticas y anticlásticas.

Las superficies planas son las formadas por dos direcciones de líneas rectas. Las superficies monoclásticas son las formadas por dos direcciones, una dirección recta y otra línea curva en dirección opuesta, el ejemplo más común es la bóveda de cañón. Las superficies sinclásticas son las formadas por dos líneas curvas en la misma dirección, el ejemplo más común es la esfera. Y las superficies anticlásticas son las formadas por dos líneas curvas en direcciones opuestas, el ejemplo más común es el paraboloides hiperbólico o la silla de montar.

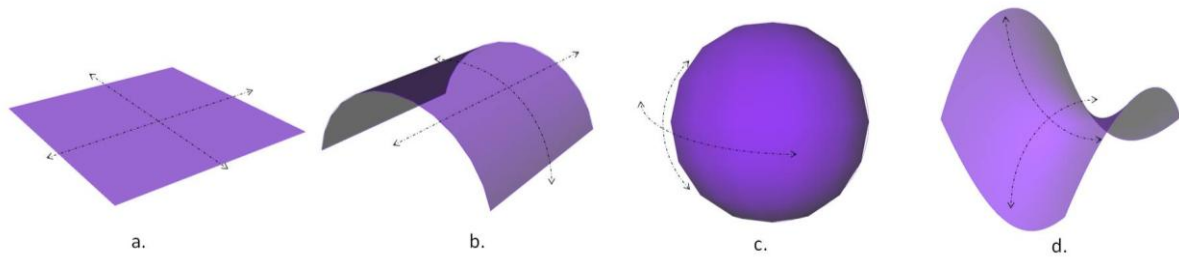


Fig 38. (a) Superficie plana. (b) Superficie monoclástica. (c) Superficie sinclástica. (d) Superficie anti-clástica.

Parámetros y Algoritmos

El diseño paramétrico de las EDBRA se hará usando los programas Rhinoceros + Grasshopper usando parámetros y algoritmos definidos y desarrollados por el autor. La idea es hacer un recorrido desde la unidad simple hasta el sistema desplegable más complejo, logrando descubrir y explorar los parámetros necesarios para cada tipo de algoritmo y de sistema desplegable.

Los algoritmos desarrollados para cada uno de los sistemas desplegables presentados a continuación son de autoría propia y hacen parte del recorrido explorativo de las EDBRA con el fin de establecer las geometrías desplegables ya conocidas y llegar a otras nuevas y complejas.

Durante el desarrollo de esta investigación se elaboraron más de 70 definiciones o algoritmos de las estructuras desplegables, permitiendo así crear una especie de biblioteca de sistemas desplegables que pretende seguir siendo alimentada por el autor a futuro. Igualmente se quiere desarrollar una aplicación o plugin que pueda ser usada por los usuarios de Grasshopper. Entendiendo que esto no hace parte del alcance de la presente investigación se tomó la decisión de no presentar los algoritmos como parte del documento.

Sistemas Axiales

Los sistemas axiales son los formados por unidades simples conectadas en una sola dirección o vector de movimiento. La trayectoria que recorre el vector de movimiento puede ser lineal recto o lineal curvo. Dependerá del patrón de combinación dado por las unidades simples. Los sistemas axiales pueden ser también de una curvatura o sinclásticas y de doble curvatura o anticlásticas.

Sistemas Axiales Rectos

La agrupación de más unidades simples con articulación en su centro construye un sistema desplegable lineal simple. El movimiento de una EDBRA lineal simple es vectorial. Esto significa que su desplazamiento es en (x) o en (y). Como podemos observar en la fig(X) los ejes a-a', b-b', y c-c' se desplazan horizontalmente de forma constante según el giro de las barras. El sistema se alarga y llega a su máxima longitud cuando los ejes a, b y c estén mas cercanos en dirección vertical. En esta posición lograra su máxima apertura el sistema. Y en dirección contraria, alcanzara su mínima longitud cuando los eje a, b y c estén mas distanciados entre ellos.

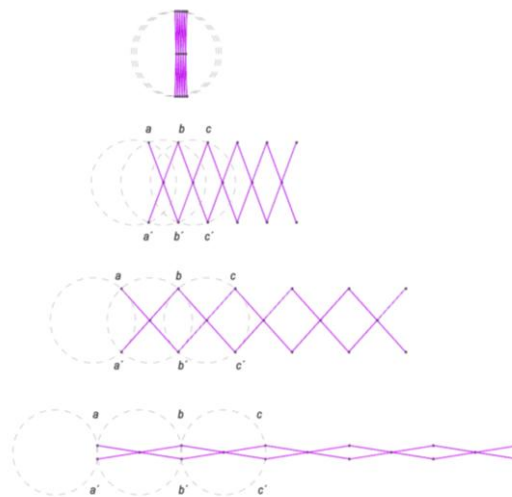


Fig 39. Diseño paramétrico de una unidad simple simétrica con agrupación lineal recta.

En este sistema desplegable simple lineal podemos ver como con un elemento adicional al sistema podremos bloquear el movimiento en cualquier punto. Esto se debe a que el sistema tiene un grado de libertad. Sin este elemento de bloqueo o freno la estructura tendría solo dos posiciones posibles, cerrada o abierta. Cuando los puntos a, b y c estén mas alejados de los puntos a', b' y c' la estructura estará en estado cerrado. Y cuando estén mas cercanos la estructura estará en su máxima apertura.

Las EDBRA que usan barras articuladas en su centro son llamadas sistemas rectos o con articulación simétrica. Es la estrategia de diseño básica para configurar agrupaciones simples en una, dos o tres direcciones.

También podemos encontrar sistemas axiales rectos usando unidades simples asimétricas. En este caso conservamos la asimetría de los rombos para mantener el movimiento fluido del sistema.

La primera opción es usar la unidad simple asimétrica y conectar la siguiente unidad en forma de espejo para formar una unidad compuesta. La repetición de esta unidad compuesta nos da como resultado un sistema desplegable lineal recto con unidades asimétricas.

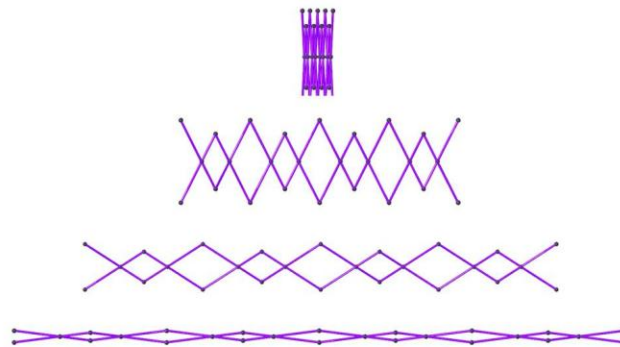


Fig 40. Sistema desplegable lineal recto con unidades asimétricas en espejo.

Otra opción de usar la unidad simple asimétrica es conectar módulos con asimetría de barras, una barra corta y una barra larga con articulación central. En este caso la articulación está en el centro de cada barra y la asimetría está en su longitud. Al agruparlas de forma lineal haciendo espejo con la primera formamos una unidad compuesta, la cual podemos repetir en la misma dirección de agrupación lineal. Para esta agrupación lineal recta el movimiento máximo se encuentra restringido por la longitud de las barras cortas. Si bien el sistema es posible cerrarse por completo, al desplegarse solo alcanzará su máxima longitud la que le permitan las barras cortas. Las barras largas quedarán con menos despliegue que las cortas.

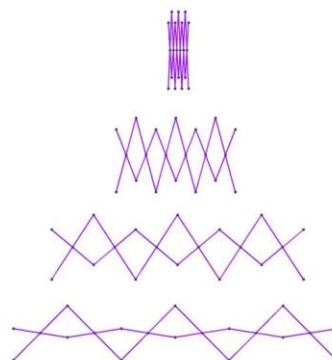


Fig 41. Sistema desplegable lineal recto con unidades asimétricas por barras.

Finalmente una tercera opción de sistemas desplegables lineales rectos es la formada por unidades simples por asimetría de barras, una barra corta y otra larga con articulación central. Para la construcción del sistema desplegables debemos posicionar las barras de tal forma que si trazamos un eje vertical en la articulación de la unidad simple, obtenemos un extremo corto y uno largo en cada lado. Luego hay que conectar las unidades manteniendo la misma posición de las barras. La trayectoria que traza este sistema lineal es en diagonal. Y su movimiento de pliegue y despliegue es fluido desde su posición máxima de cerrado hasta el despliegue máximo posible de apertura. Los puntos extremos del sistema mantienen siempre su eje vertical.

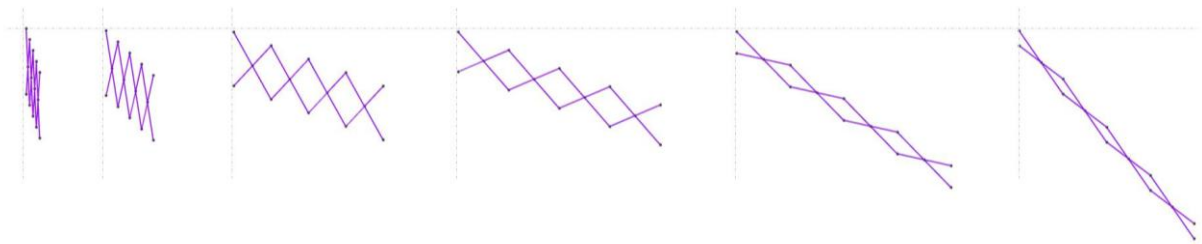


Fig 42. Sistema desplegable lineal recto con unidades asimétricas por barras y trayectoria diagonal.

Sistemas Axiales Curvos

La agrupación de más unidades simples con centros asimétricos construye un sistema desplegable lineal curvo simple. El movimiento de una EDBRA lineal curvo simple es polar. Recordamos que cada unidad simple asimétrica tiene un ángulo de referencia que cambia según la rotación de sus barras. La agrupación de la misma unidad asimétrica hace que todas las unidades tengan el mismo centro del ángulo de referencia como se observa en la siguiente figura.

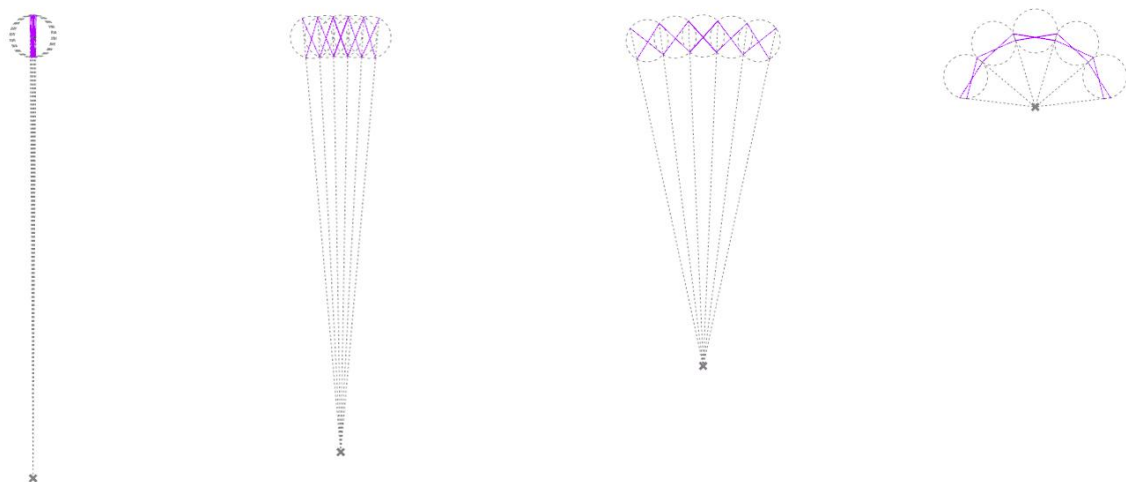


Fig 43. Diseño paramétrico de una unidad simple asimétrica con agrupación lineal curva.

El movimiento descrito por una unidad simple asimétrica es polar, trazada por una asimetría de sus extremos largos y cortos. La agrupación de más unidades simples asimétricas forma un trazado lineal curvo en dirección hacia los extremos cortos de las barras. Formando rombos asimétricos. La intersección de los círculos durante la trayectoria curva de las barras garantiza la longitud constante de las barras.

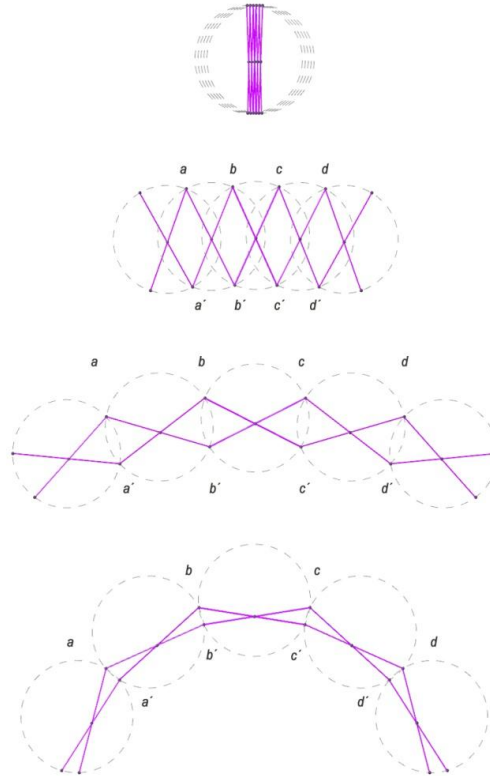


Fig 44. Diseño paramétrico de una unidad simple asimétrica con agrupación lineal curva.

Los sistemas axiales curvos también se pueden diseñar con unidades simples de barras asimétricas. Usando la unidad simple con asimetría en longitud de barras y con asimetría en su articulación. La idea es ubicar la articulación central de tal forma que tres de los cuatro extremos de la unidad tengan la misma longitud. Luego hacer espejo por la cara entre la extremidad corta y la larga. Esta unidad compuesta se repite en dirección lineal trazando una curva. Para lograr esta asimetría se usan dos centros con diferentes radios y el mismo ángulo de referencia.

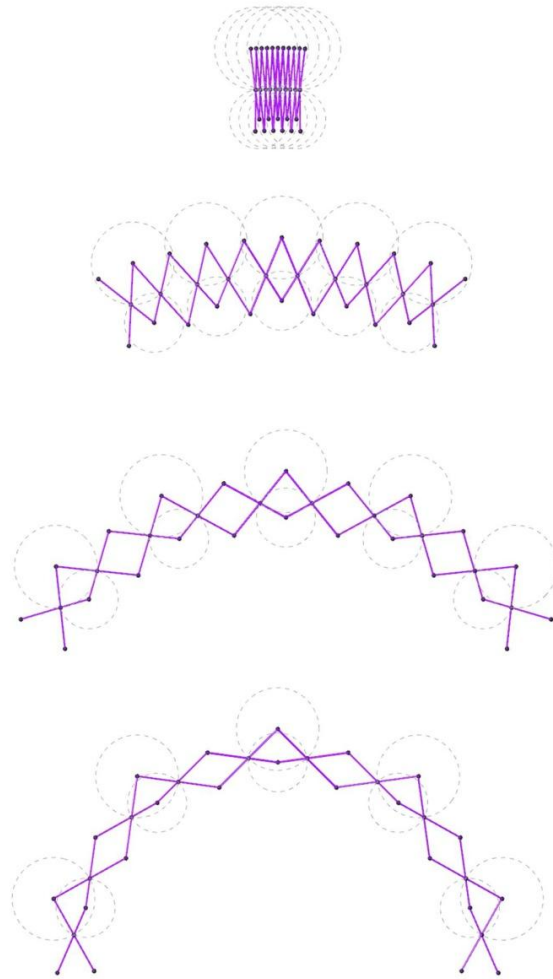


Fig 45. Diseño paramétrico de una unidad simple asimétrica de barras y centro con agrupación lineal curva.

Proyección del sistema axial

Los sistemas axiales son la base para la exploración formal del diseño paramétrico de las EDBRA. Pero son insuficientes para formar un espacio construido que pueda ser aplicado en la arquitectura. Para tener una estructura desplegable con un sistema axial debemos de proyectar en el eje opuesto al despliegue del sistema. Para unir las proyecciones axiales las conectamos con las articulaciones de las barras. Esto dará estabilidad y fluidez al movimiento de la estructura. De esta manera tenemos una estructura desplegable con barras rectas articuladas en forma de superficies planas y superficies monoclásticas. En estos casos la estructura queda cerrada de forma lineal ya que el sistema solo se cierra en un eje, el otro es fijo. Los sistemas axiales rectos tienen la particularidad de poder agruparse en dos direcciones. Siendo una agrupación axial puede formar un plano bidimensional siempre que sea una agrupación recta y no tenga restricciones de movimiento por incompatibilidad de geometría en los rombos.

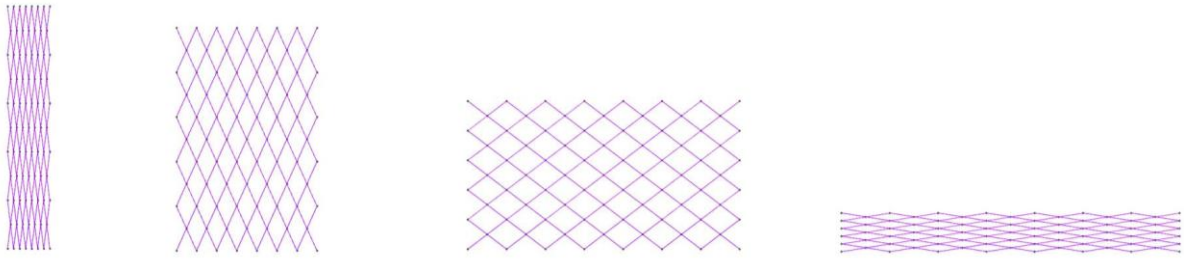


Fig 46. EDBRA. Axial plana bidimensional. Proceso de despliegue.

Superficies axiales planas desplegables

La estructura desplegable más sencilla es la proyección de un sistema axial recto y simétrico. Los parámetros para controlar son la cantidad de repeticiones del sistema axial y la distancia de separación entre ellos.

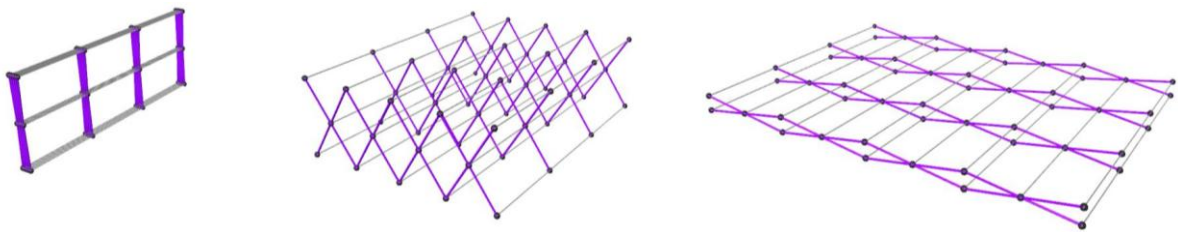


Fig 47. EDBRA. Axial plana. Proceso de despliegue.

Este mismo proceso de proyección lo podemos hacer con los otros tipos de sistemas axiales explorados. La selección del sistema dependerá de la necesidad que se quiera para su uso. Puede ser para suelos falsos en caso de no poder intervenir en el terreno o para cubiertas planas con puntos altos y bajos.

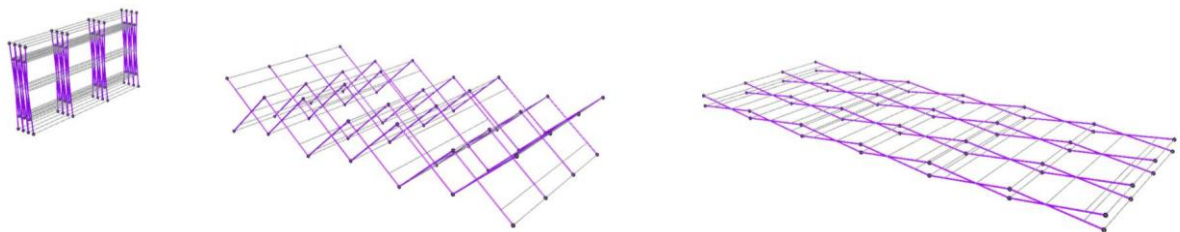


Fig 48. EDBRA axial asimétrica en espejo plana. Proceso de despliegue.

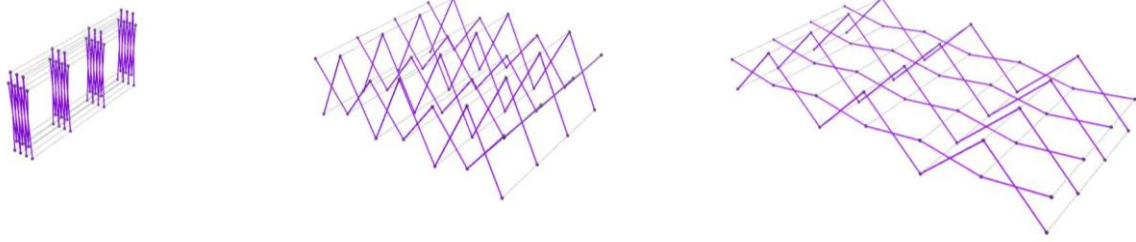


Fig 49. EDBRA axial asimétrica en barras plana. Proceso de despliegue.

Y por ultimo tenemos el sistema axial asimétrico de barras con trayectoria en diagonal. El ejemplo práctico lo encontramos en las escaleras plegables para las bodegas con puerta en los techos o áticos. Su recorrido en trayectoria diagonal permite un despliegue oblicuo manteniendo la verticalidad en los extremos. Lo que facilita el anclaje del sistema en uno de sus extremos a una superficie de apoyo vertical.

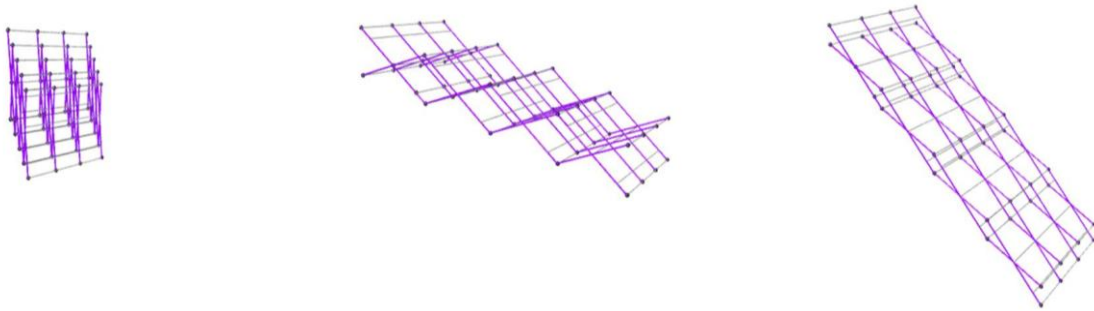


Fig 50. EDBRA axial asimétrica en barras y en espejo plana. Proceso de despliegue.

Superficies monocásticas desplegables

La proyección de sistemas axiales asimétricos nos da como resultado superficies monocásticas, con una sola dirección de curvatura. Estas con las más conocidas como superficies de bóvedas de cañón. Para este caso hay que definir el parámetro de máximo despliegue o despliegue límite donde la estructura obtenga la forma deseada.

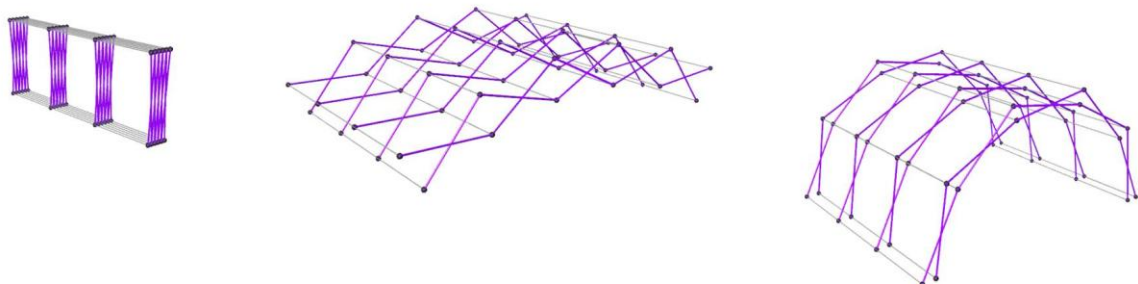


Fig 51. EDBRA monocástica axial asimétrica. Proceso de despliegue limite.

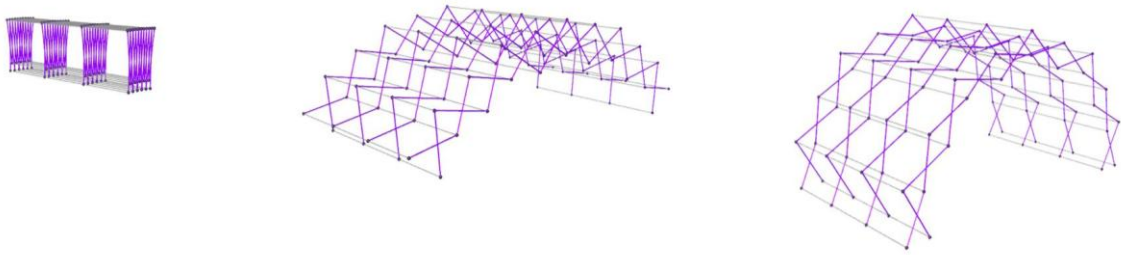


Fig 52. EDBRA monocástica axial asimétrica de barras y centro. Proceso de despliegue límite.

Los sistemas axiales asimétricos llegan a un límite máximo de apertura hasta ser bloqueados por el mismo sistema. Su trayectoria con geometría circular hace que esto pase. Cuando el sistema completa todo el giro y el movimiento es bloqueado, el sistema queda en estado de equilibrio. El tamaño de la trayectoria circular dependerá del número de repeticiones que hagamos de la unidad simple asimétrica. Así como la altura dependerá del número de repeticiones del sistema axial asimétrico.

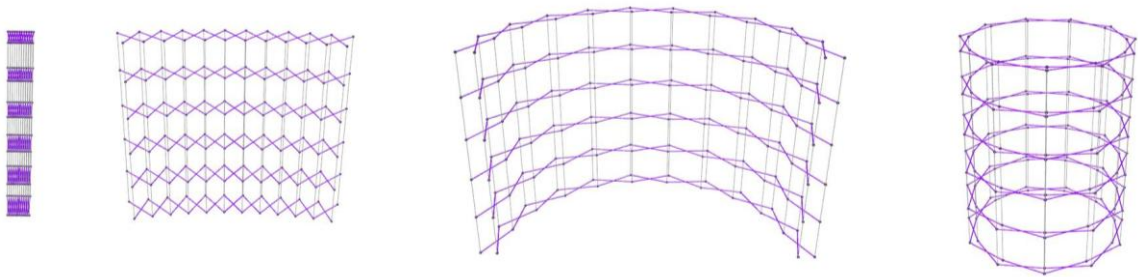


Fig 53. EDBRA monocástica axial asimétrica. Proceso de despliegue máximo.

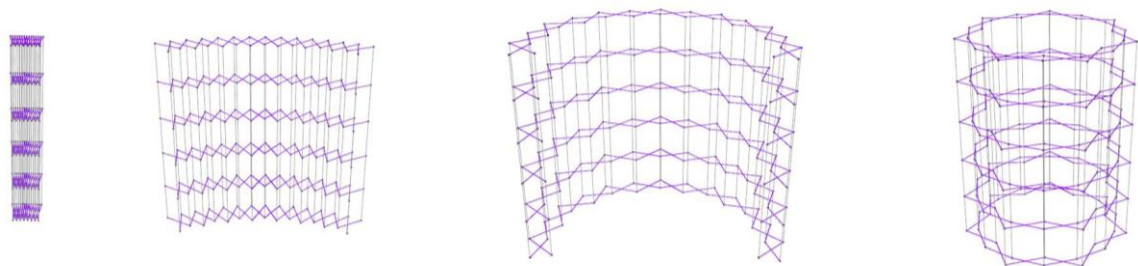


Fig 54. EDBRA monocástica axial asimétrica de barras y centro. Proceso de despliegue máximo.

Sistemas axiales asimétricos especiales

Los sistemas axiales asimétricos también pueden agruparse de forma radial, lo que nos da como resultado estructuras desplegables especiales. Especiales por que necesitan de elementos adicionales de soporte como cables o estructuras de membranas textiles para que el sistema este en equilibrio. Como exploración de diseño paramétrico teórico es posible.

Si tomamos una unidad simple axial y la repetimos en el eje de curvatura y tomamos el eje central como eje (z) podemos empezar a rotarlo sobre este eje y tener como resultado unidades desplegables compuestas. Estas unidades desplegables compuestas son el principio de diseño para los módulos desplegables.

Podremos rotar sobre el eje (z) las cantidades de veces deseadas, solo recordar que a nivel de diseño paramétrico el eje de rotación es un punto, pero en la realidad el modelo físico requiere de una pieza que reciba la articulación de cada eje que estamos rotando.

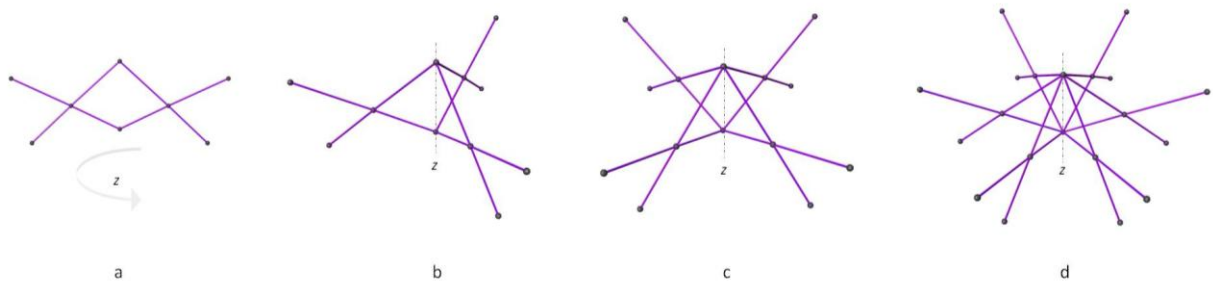


Fig 55. Rotación de la unidad axial asimétrica en el eje (z). (a) Unidad axial rotada 180°. (b) Unidad axial rotada 120°. (c) Unidad axial rotada 90°. (d) Unidad axial rotada 60°.

La repetición de unidades simples asimétricas sobre su eje forma una estructura desplegable sinclástica axial. La pronunciación de la curva de la estructura dependerá de la asimetría de la unidad simple. Cuanto más lejos este la articulación de su centro más cerrada será la curva, y cuanto más cercana a su centro será mas abierta la curvatura.

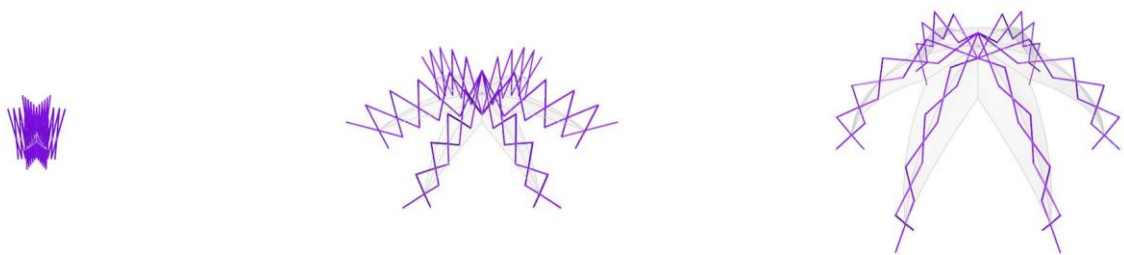


Fig 56. EDBRA radial sinclástica axial. Proceso de despliegue.

La otra opción de repetición radial de un sistema axial asimétrico, es rotar la unidad axial de tal forma que el sentido de la curvatura sea hacia el exterior del sistema. La geometría trazada por el sistema desplegable axial es una hipérbola. Para este caso como el anterior es necesario el uso de elementos adicionales como cables o membranas textiles para dar estabilidad a toda la estructura. Y la superficie trazada por la trayectoria de la estructura es anticlástica.

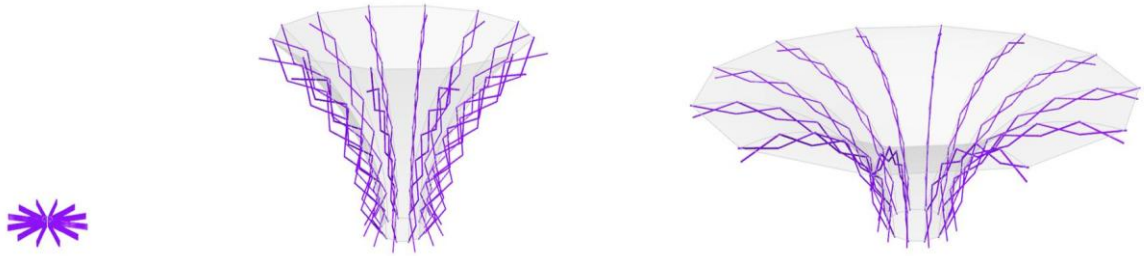


Fig 57. EDBRA radial anticlástica axial. Proceso de despliegue.

Sistemas Biaxiales

Los sistemas biaxiales son los formados por unidades simples conectadas en dos direcciones o vectores de movimiento. La trayectoria geométrica que recorren los vectores de movimiento puede ser lineal recto o lineal curvo. Dependerá del patrón de combinación dado por las unidades simples. Los sistemas biaxiales forman superficies planas, monoclásticas, sinclásticas y anticlásticas. A diferencia de los sistemas axiales, estos sistemas biaxiales si permiten cerrar al mínimo posible todos los elementos que la componen.

Para formar una EDBAR con sistemas biaxiales debemos definir los parámetros del modulo con el cual crearemos el patrón de agrupación. Y el modulo más sencillo es el modulo simétrico biaxial. La construcción geométrica de este modulo usa cuatro unidades simples desplegables conectadas en cada uno de sus extremos rotadas a 90° . Los ejes circulares indican las dos direcciones de movimiento, y las intersecciones entre de los círculos los extremos de cada unidad simple simétrica.

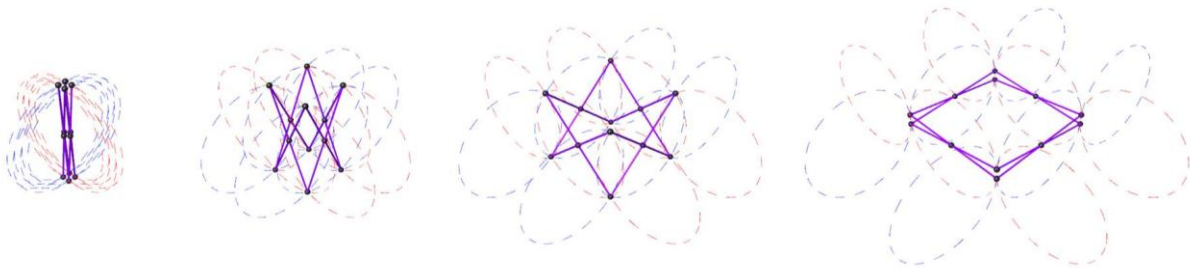


Fig 58. Modulo biaxial simétrico. Proceso de despliegue.

El modulo biaxial cuadrado se puede configurar de tres formas. La primera es agrupando las unidades simples simétricas en los dos ejes de diseño. Esta configuración inscribe un cuadrado en el interior del modulo durante todo el proceso de despliegue. La segunda es agrupando unidades simétricas en el eje (x) y unidades asimétricas en el eje (y). La geometría que inscribe en su interior durante el proceso de despliegue es el de un rectángulo pequeño y uno grande que se deforma según aumenta la asimetría. Y una tercera agrupación es la de usar unidades asimétricas en los dos ejes. La geometría que inscribe en su interior es de dos cuadrados, uno pequeño y uno grande según la asimetría.

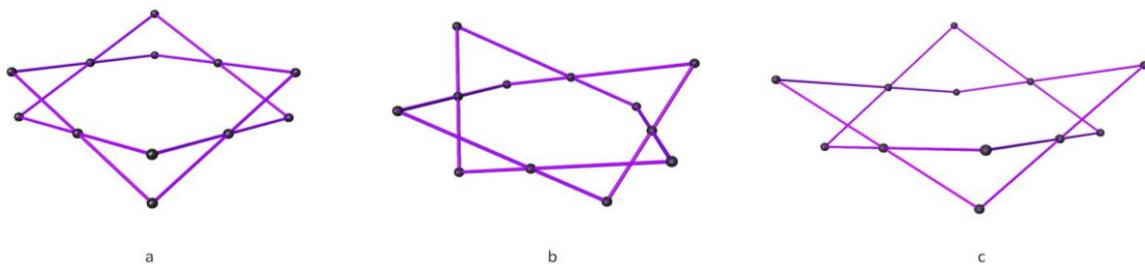


Fig 59. Módulos biaxiales. (a) Simétrico. (b) Simétrico, asimétrico. (c) Asimétrico.

Agrupación lineal - Torres desplegadas

Los módulos biaxiales desplegados pueden ser agrupados de forma lineal, formando una columna desplegable con una morfología muy particular según se agrupen los módulos. El módulo simétrico es el más común, proyectando una columna de sección cuadrada durante todo el proceso de despliegue. Los otros dos módulos pueden ser agrupados de forma lineal, formando módulos pares conectados en espejo para evitar cualquier restricción de movimiento.

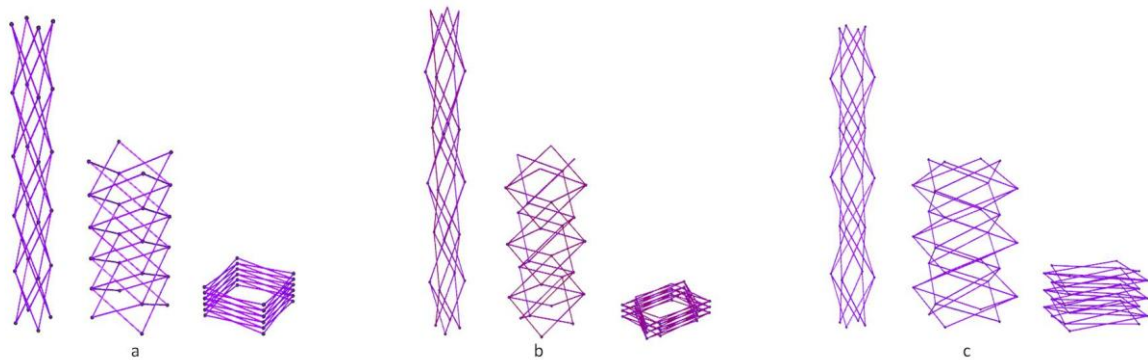


Fig 60. Torres biaxiales. (a) Simétrica. (b) Simétrica, asimétrica. (c) Asimétrica.

Superficies planas biaxiales

Las superficies biaxiales son el resultado de agrupar módulos cuadrados en los ejes (x) y (y). Las superficies no solo son posibles con módulos cuadrados agrupados con unidades simples, estos también se pueden construir replicando unidades pares o impares según la malla deseada. Cabe mencionar que entre más repeticiones de unidades se hagan para formar un patrón, más deformable puede resultar la estructura final. Esto es un problema inherente a la geometría de las mallas cuadradas.

La agrupación por módulos cuadrados puede resultar muy eficiente y práctica para los sistemas desplegados; aunque muy inestable, por lo que es necesario incluir un sistema de rigidización de esquinas ya sea con un sistema desplegable o con elementos adicionales al sistema.

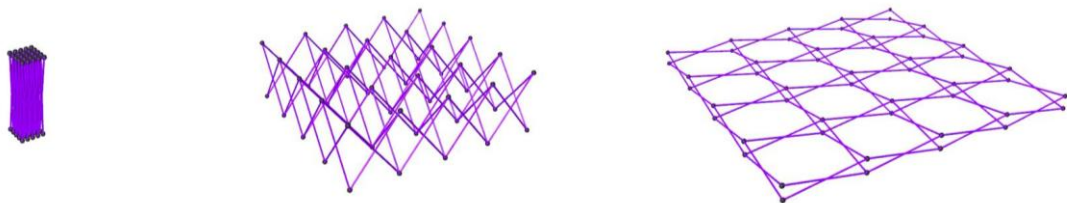


Fig 61. EDBRA biaxial simétrica plana. Proceso de despliegue.

Como mencionamos anteriormente es posible agrupar mas de una unidad simple para completar en modulo o patrón de la malla desplegable deseada. También es posible combinar unidades asimétricas de tal forma que la trayectoria de movimiento sea lineal recto.

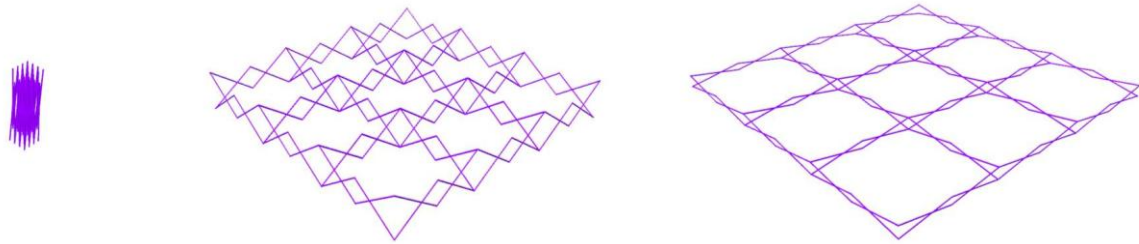


Fig 62. EDBRA biaxial asimétrica plana. Proceso de despliegue.

Superficies monoclásticas desplegables biaxiales

Las EDBRA pueden combinar unidades axiales simétricas en una dirección y unidades axiales asimétricas en la otra dirección. La combinación de ambas unidades nos da una superficie monoclástica. La agrupación lineal en el eje (x) o el eje con la dirección asimétrica, traza una trayectoria lineal curva. Logrando la construcción de un arco desplegable con módulos cuadrados.

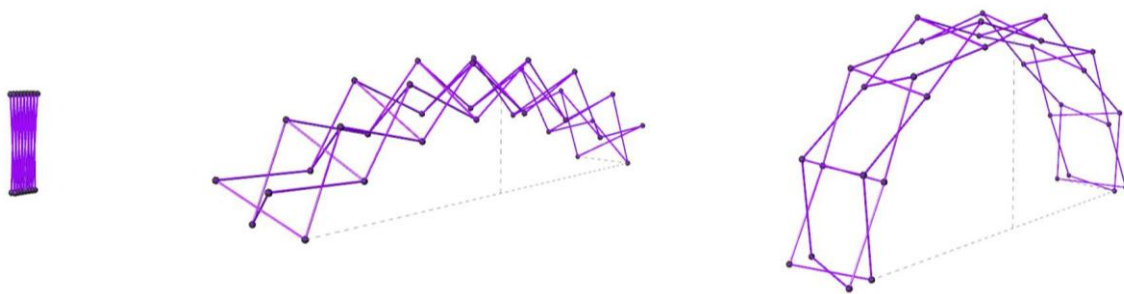


Fig 63. EDBRA. Arco biaxial desplegable. Proceso de despliegue.

La proyección del arco en el eje de las unidades simétricas, permite diseñar una superficie monoclástica biaxial o bóveda de cañón. El número de repeticiones de módulos cuadrados para formar el arco dependerá del Angulo de incidencia de las unidades simples asimétricas. Y también del tipo de arco y curvatura deseada. Lo ideal es poder calcular estos parámetros de tal forma que las unidades simples de base sean coplanares con la superficie de apoyo.

Esta geometría requiere de un control de movimiento límite para bloquear la estructura en la posición deseada de uso.

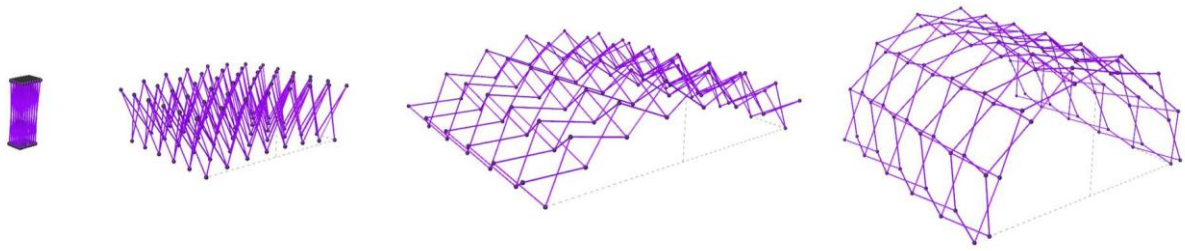


Fig 64. EDBRA. Bóveda biaxial desplegable. Proceso de despliegue.

Como la geometría de la bóveda biaxial requiere de un control límite para frenar la estructura en su estado de uso, podemos continuar su trayectoria de movimiento hasta su límite máximo el cual es cuando sus extremos hacen contacto. Para este caso es necesario bloquear esta posición para estabilizar la estructura.

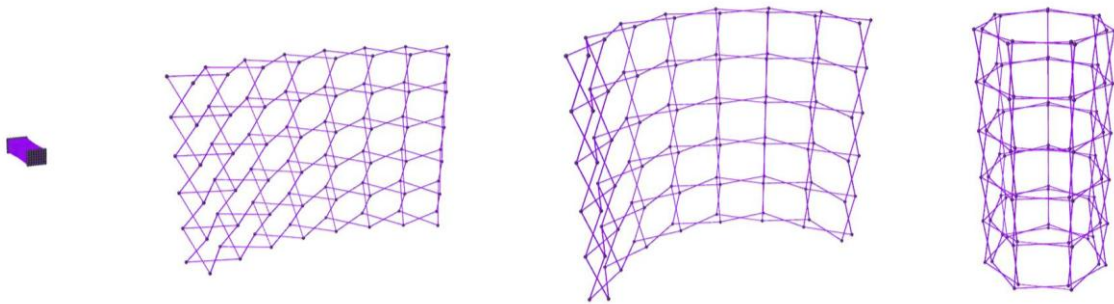


Fig 65. EDBRA. Bóveda biaxial torre desplegable. Proceso de despliegue.

La otra posible agrupación de los módulos biaxiales simétricos - asimétricos, es la de cambiar el sentido de giro o curvatura de los módulos asimétricos sobre uno de los ejes simétricos. El cambio de giro traza una trayectoria en forma de (s) que da mayor estabilidad al sistema en su estado de despliegue sobre los ejes asimétricos. Esta morfología también requiere de elementos adicionales que controlen la posición final de la estructura para su estabilidad.

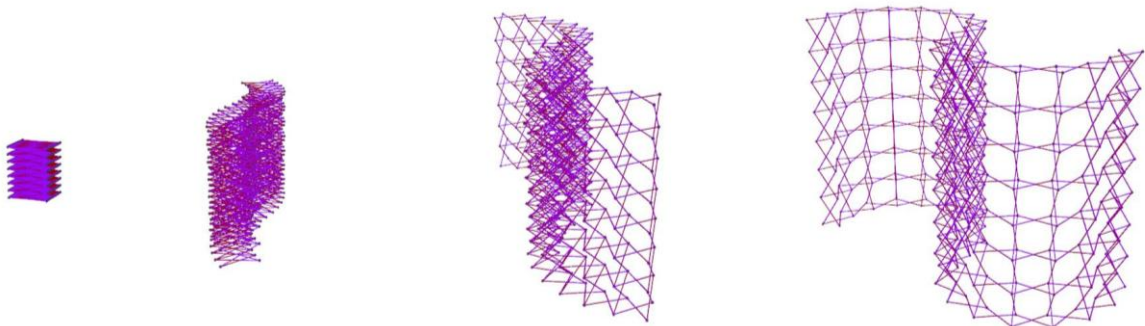


Fig 66. EDBRA. Bóveda biaxial con doble curva desplegable. Proceso de despliegue.

Superficies sinclásticas desplegadas biaxiales

Continuado con la exploración geométrica y paramétrica de las EDBRA, podemos combinar solo unidades simples asimétricas para formar un modulo biaxial como mencionamos anteriormente en este capítulo. La agrupación de unidades simples asimétricas en dirección (x) y (y) con el mismo sentido de giro de su curvatura nos da la posibilidad de explorar superficies sinclásticas. La agrupación de módulos asimétricos sinclásticos traza una trayectoria esférica o geodésica.

Depende de la asimetría de sus unidades simples si el trazado geodésico es más abierto o cerrado. La exploración paramétrica para las superficies desplegadas sinclásticas pueden presentar incompatibilidad de movimiento si el ángulo de incidencia o la asimetría cambian entre los ejes (x) y ejes (y).

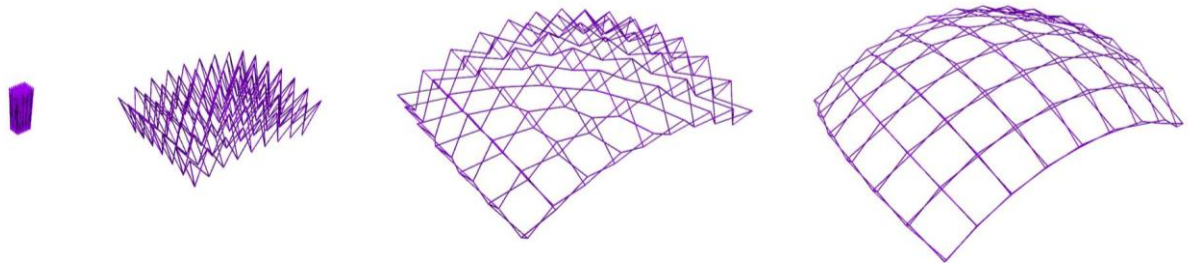


Fig 67. EDBRA. Biaxial sinclástica desplegable. Proceso de despliegue.

Si aumentamos la asimetría de las unidades simples podemos diseñar una estructura tipo domo desplegable con malla cuadrada. Las barras cambiarán de longitud para lograr la forma aproximada de una esfera. Y es necesario calcular el ángulo de incidencia adecuado para que la estructura tenga un contacto coplanar con la superficie de apoyo. Este tipo de geometría requiere de elementos adicionales para controlar y bloquear el movimiento límite de uso.

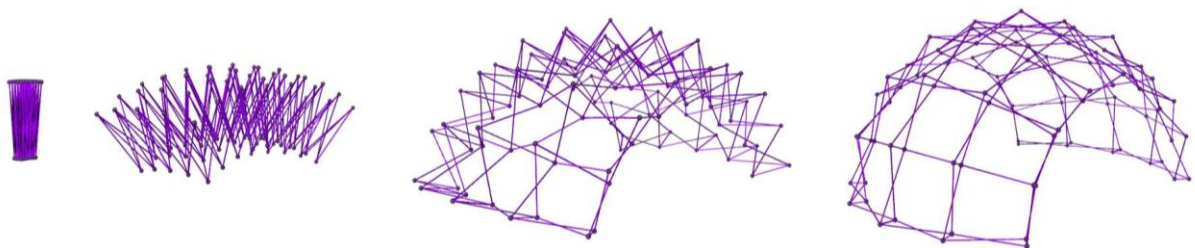


Fig 68. EDBRA. Biaxial sinclástica desplegable tipo domo. Proceso de despliegue.

La otra posible agrupación de unidades simples asimétricas biaxiales para formar una estructura con características espaciales aplicables a la arquitectura, es dibujar una unidad simple asimétrica sobre el eje (x) y luego rotar la unidad en el eje (z) en cada extremo de la primera unidad. Para finalmente agrupar

más unidades simples asimétricas sobre las que han sido rotadas hasta construir dos arcos. La trayectoria de movimiento que traza cada arco hará que en algún momento del despliegue ambos arcos se encuentren en sus extremos, formando una sección de una esfera.

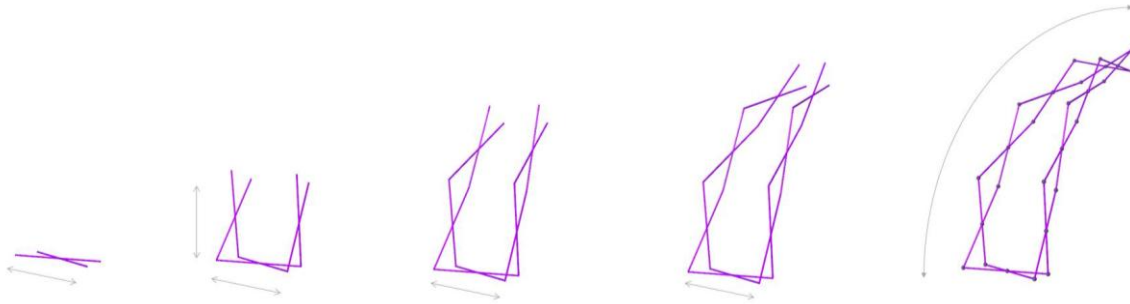


Fig 69. Construcción geométrica biaxial de sección de esfera desplegable con unidades asimétricas.

Este tipo de estructuras desplegables con trayectoria de movimiento radial tienen la característica de separar parte de sus elementos o ejes durante el proceso de despliegue. En esta geometría en particular los arcos de los ejes (z) están separados cuando la estructura está cerrada o plegada. Y es durante el proceso de despliegue que los arcos llegan a encontrarse en sus puntos extremos cuando la estructura llega a su posición de despliegue de uso. Esto implica dos variantes a tener en cuenta. La primera es la inestabilidad del sistema durante el proceso de despliegue, ya que los arcos al momento de separarse entre ellos presentan giros inestables en el eje (z) de cada arco. Y el segundo es la necesidad de un elemento que reciba y conecte los arcos al alcanzar su posición final de uso.

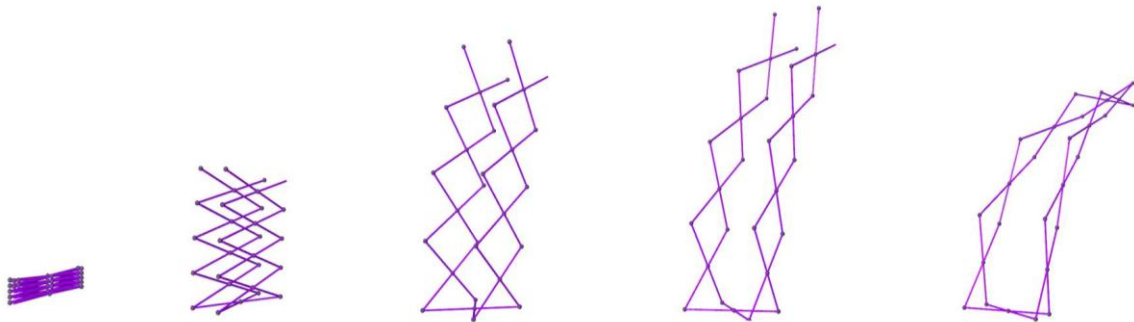


Fig 70. Sección de esfera desplegable biaxial. Proceso de despliegue.

Lo interesante de esta geometría desplegable es que podemos considerar variables geométricas como los polígonos para definir la cantidad de repeticiones radiales en el eje (x). También podemos controlar el ángulo de incidencia de las unidades asimétricas para la construcción geométrica de diferentes domos desplegables con ejes radiales. Y finalmente definir según requerimientos de diseño la cantidad de repeticiones para la sección de esfera desplegable.

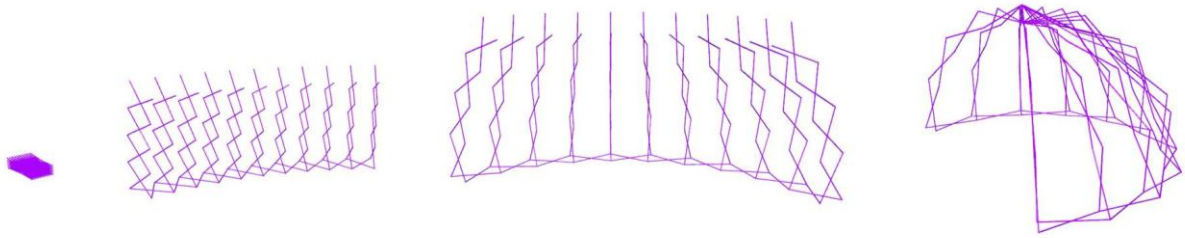


Fig 71. EDBRA. Domo biaxial con ejes radiales desplegables. Proceso de despliegue.

Superficies anticlásticas desplegables biaxiales

Las superficies anticlásticas desplegables son las menos exploradas en los trabajos de investigación, ya que su geometría y morfología las hacen de las más complejas de las estructuras desplegables. Sin embargo el diseño paramétrico no es tan complejo como parece. Como mencionamos anteriormente los módulos cuadrados biaxiales tienen 3 posibles combinaciones. Una de ellas es usando el módulo asimétrico en sus dos direcciones.

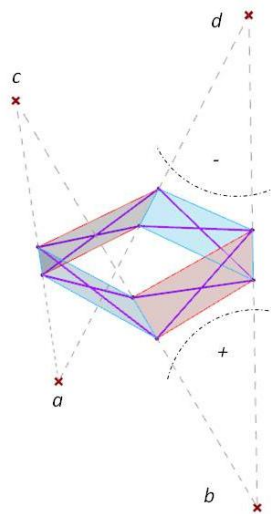


Fig 72. Módulo biaxial anticlástico. Geometría.

Los puntos a y b señalados en el módulo biaxial anticlástico, son la intersección de los planos de color rojo proyectados. Estos indican la orientación de la curvatura y por tanto la asimetría de la unidad simple. Como vemos en la fig. La curvatura de las unidades simples asimétricas en el plano rojo tiene dirección positiva y la curvatura de las unidades simples asimétricas del plano azul dirección negativa.

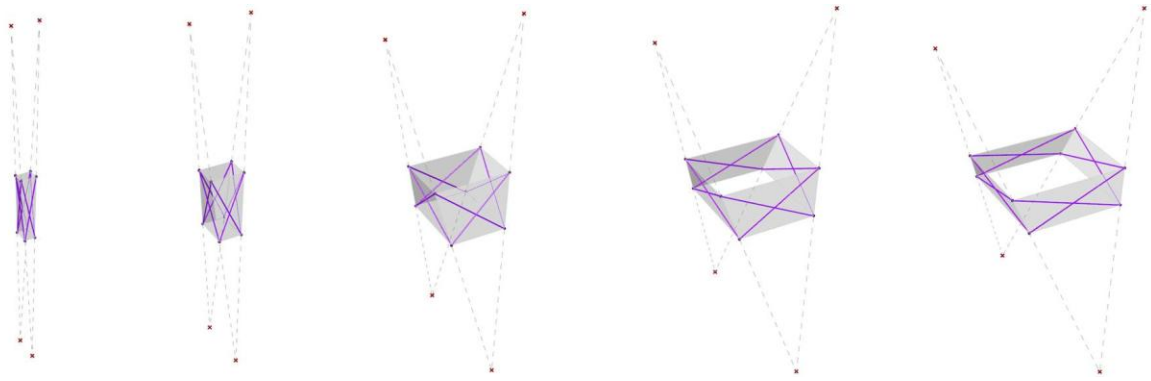


Fig 73. Modulo biaxial anticlástico. Proceso de despliegue.

La agrupación del modulo anticlástico en el eje (x) nos da una superficie de doble curvatura inscrita en un paraboloides hiperbólico. En esta geometría también es necesario calcular la posición final de la estructura para definir el sistema de bloqueo de movimiento y que la estructura este en equilibrio en su estado de uso. También es posible agrupar los módulos y llevar al máximo su despliegue para formar un hiperboloide. En este caso se debe de definir el bloqueo de movimiento cuando los extremos se encuentren al trazar todo el recorrido.

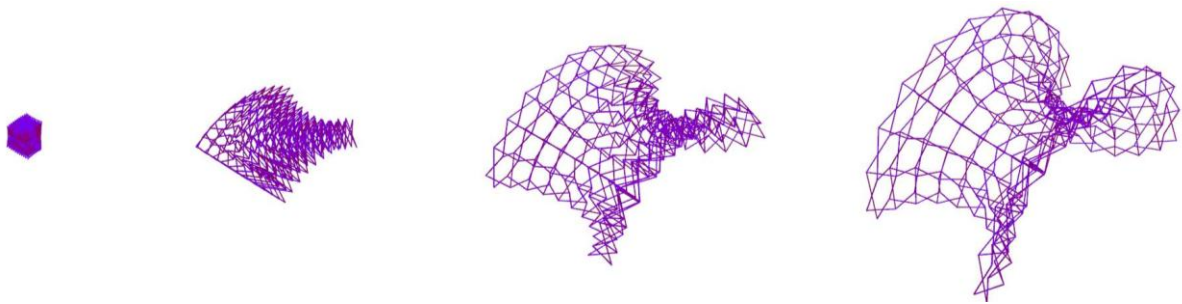


Fig 74. EDBRA. Medio Hiperboloide biaxial. Proceso de despliegue.

Con la agrupación de módulos biaxiales anticlásticos también podemos construir un paraboloides hiperbólico con malla cuadrada. Esta geometría puede resultar interesante si se logra agrupar módulos de tal forma que la estructura al estar abierta tenga más de dos puntos de apoyo.

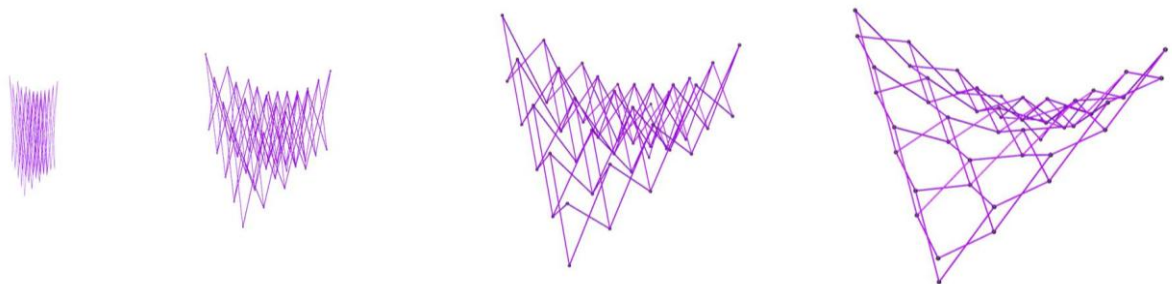


Fig 75. EDBRA. Paraboloides hiperbólico biaxial. Proceso de despliegue.

La agrupación de varios paraboloides puede formar una estructura desplegable con un valor espacial importante para la aplicación en la arquitectura. Al agrupar cuatro paraboloides podemos tener los puntos de apoyo suficientes para que la estructura este en equilibrio en su posición de uso.

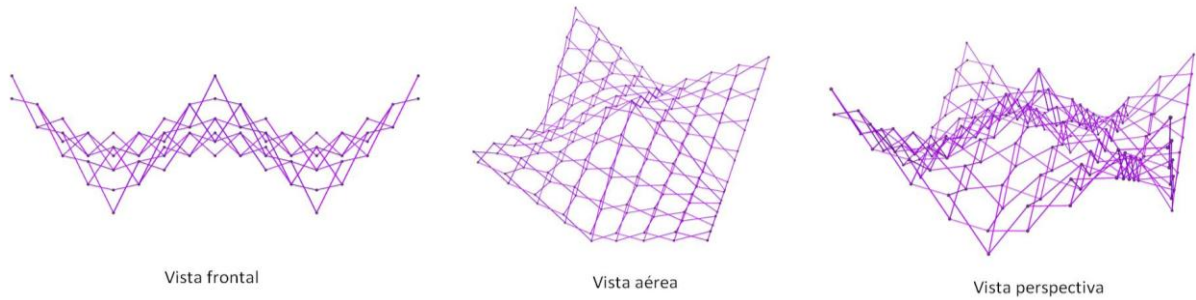


Fig 76. EDBRA. Agrupación de 4 paraboloides hiperbólicos biaxiales. Proceso de despliegue.

Existe una geometría biaxial anticlástica muy singular, que se obtiene de los polígonos desplegable y la rotación de estos las veces que sea necesaria para lograr la forma deseada de un hiperboloide desplegable biaxial. Si bien los polígonos desplegable pueden considerarse sistemas móviles de dos, tres o más vectores de movimiento. El diseño paramétrico resultante de rotar en su eje central un polígono desplegable es una malla biaxial con forma de hiperboloide. Podemos usar cualquier polígono y remplazarlo por unidades simples simétricas o unidades simples asimétricas. Y luego rotarlas sobre su eje central.

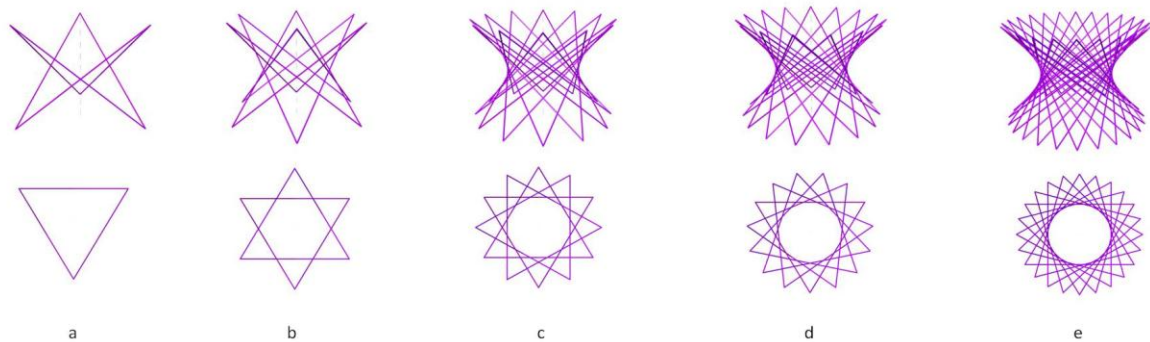


Fig 77. Rotación de modulo de base triangular. (a) 1 modulo. (b) 2 módulos. (c) 4 módulos. (d) 5 módulos. (e) 8 módulos.

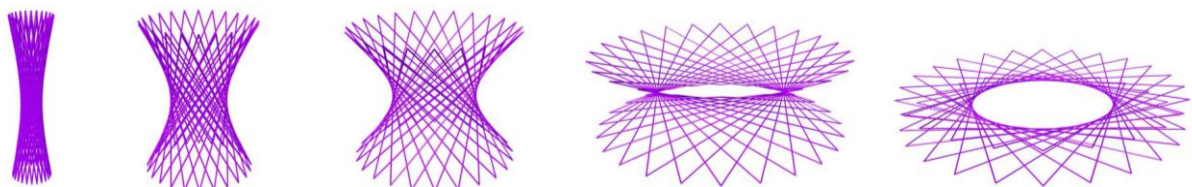


Fig 78. EDBRA. Hiperboloide biaxial de revolución. Proceso de despliegue.

Los hiperboloides biaxiales son mallas desplegables formadas por unidades simples que forman un polígono. Estas unidades pueden ser simétricas o asimétricas. Los polígonos desplegables formados por unidades simples simétricas forman un hiperboloide de revolución regular simétrico. Y los polígonos desplegables formados por unidades asimétricas forman un hiperboloide irregular simétrico.

Para los hiperboloides regulares simétrico la trayectoria de movimiento es fluida y máxima, desde su posición mas cerrada o plegada hasta la más abierta o desplegada. Pero para los hiperboloides irregulares asimétricos esta condición no es general, ya la máxima apertura del sistema dependerá de la asimetría de las unidades simples. Esto quiere decir que entre mas asimetría tenga mas restricción de movimiento tendrá la trayectoria del hiperboloide. También es posible que las barras rígidas tengan deformaciones durante su desplazamiento.

Los hiperboloides biaxiales de revolución pueden agruparse de forma lineal y tener una configuración interesante de explorar desde el punto de vista morfológico para la aplicación de espacios arquitectónicos.

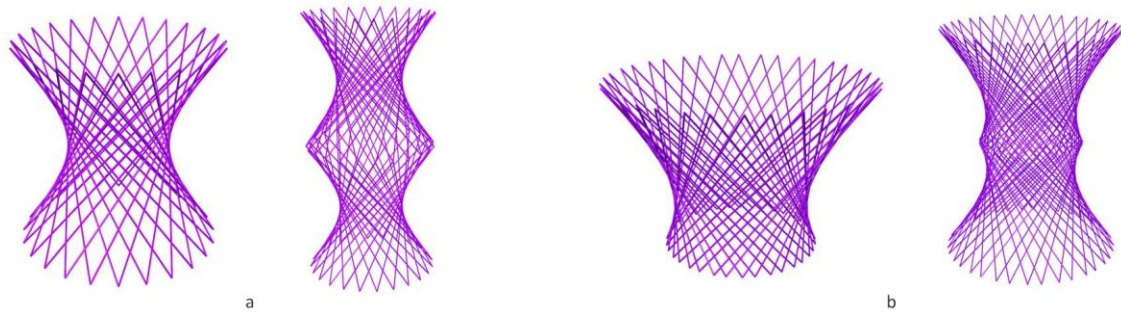


Fig 79. EDBRA. Hiperboloide biaxial de revolución. (a) Hiperboloide biaxial simétrico y agrupación. (b) Hiperboloide biaxial asimétrico y agrupación.

Sistemas Triaxiales.

Los sistemas triaxiales son los formados por unidades simples agrupados en tres direcciones o vectores de movimiento. La trayectoria geométrica que recorren los vectores de movimiento puede ser lineal recto o lineal curvo. Dependerá del patrón de combinación dado por las unidades simples. Los sistemas triaxiales forman superficies planas, monoclásticas, sinclásticas y anticlásticas. Son los sistemas más complejos de agrupar ya que dependiendo del patrón o geometría, pueden tener restricciones parciales o totales de movimiento.

Para definir los parámetros de diseño de las unidades simples debemos partir de los polígonos desplegados y de sus posibles agrupaciones. Para esto partimos del polígono desplegable mínimo que es el triángulo. Si reemplazamos las aristas por unidades simples desplegadas obtenemos un modulo triaxial desplegable con sección triangular.

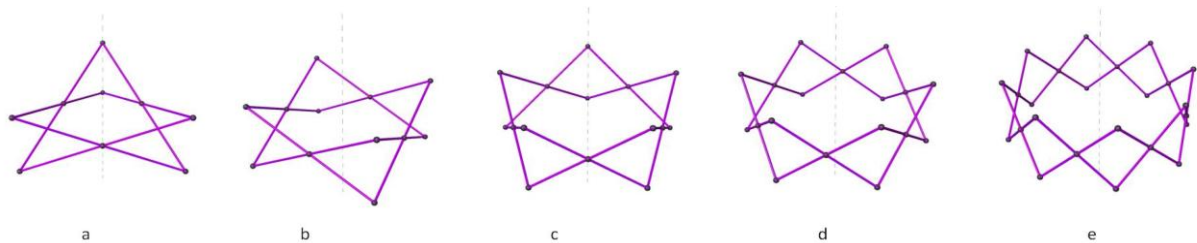


Fig 80. Polígonos desplegados. (a) Polígono Triangular. (b) Polígono cuadrado. (c) Polígono pentagonal. (d) Polígono hexagonal. (e) Polígono octogonal.

Agrupación lineal - Torres desplegadas

Los polígonos desplegados pueden agruparse de forma lineal en el eje (z) configurando torres desplegadas con sección poligonal según los números de aristas usados para el polígono de referencia. Los parámetros para el diseño de las torres desplegadas dependerá del polígono base y de la cantidad de repeticiones que se haga en el eje (z) de cada modulo.

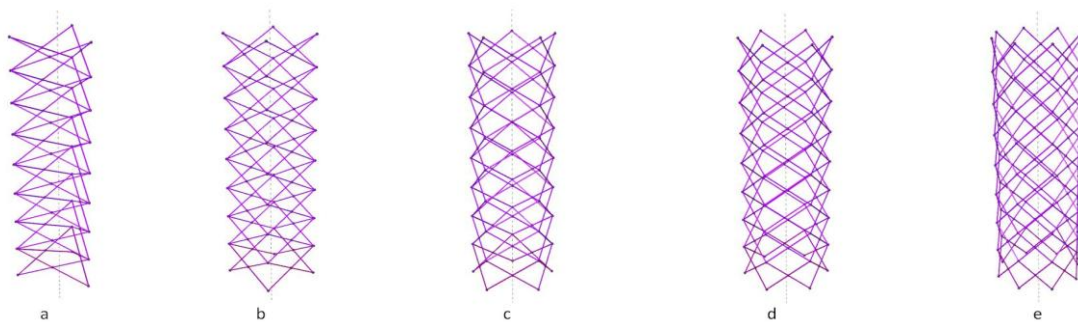


Fig 81. Torres de polígonos desplegados. (a) Polígono Triangular. (b) Polígono cuadrado. (c) Polígono pentagonal. (d) Polígono hexagonal. (e) Polígono octogonal.

La unidad simple mínima triaxial es la formada por el polígono desplegable de base triangular. Este modulo triaxial es la base de todas las agrupaciones triaxiales ya que su agrupación permite formar módulos hexagonales. Y la combinación de ambos módulos al ser agrupados puede resultar ideal para sistemas desplegables complejos.

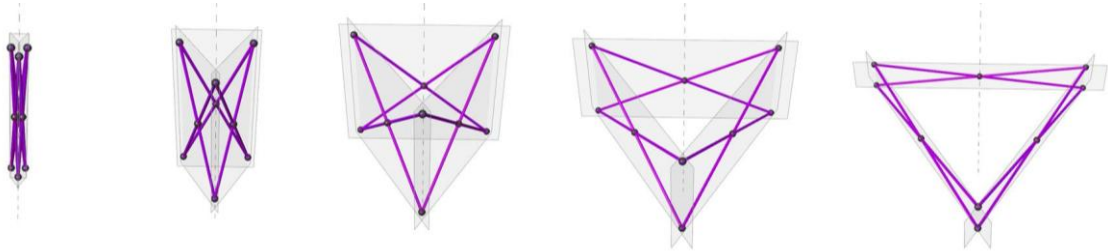


Fig 82. Modulo triaxial simétrico. Proceso de despliegue.

Las primeras agrupaciones posibles para el modulo triaxial simétrico, son la lineal en el eje (z) y la agrupación en (x) y (y) uniendo de forma coplanar las caras del modulo. Como podemos ver la trayectoria de desplazamiento del modulo triaxial simétrico es la misma en las 3 direcciones de cada unidad simple. Así es posible conectar cuantas veces se quiera el modulo en cualquiera de sus caras.

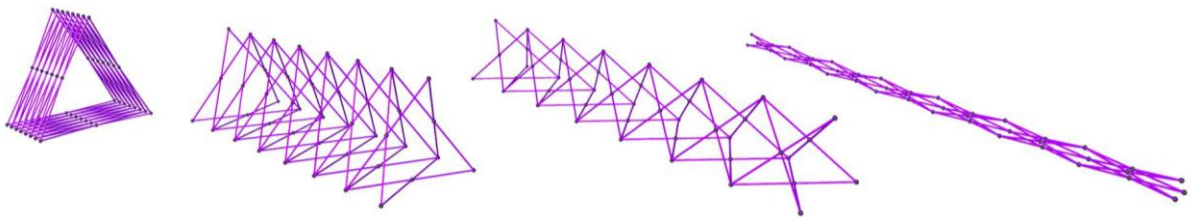


Fig 83. EDBRA. Agrupación lineal del modulo triaxial simétrico. Proceso de despliegue.

Como mencionamos anteriormente la agrupación de módulos triaxiales nos permite construir módulos hexagonales. Y la agrupación de módulos hexagonales es igualmente agrupación de módulos triaxiales. El modulo hexagonal sirve para hacer una exploración muy interesante para futuras propuestas de superficies desplegables curvas con sistemas triaxiales.

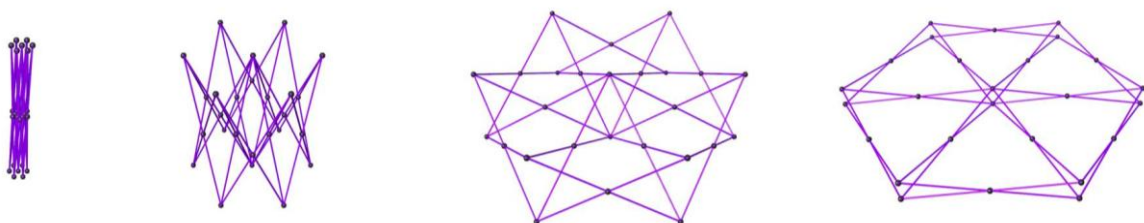


Fig 84. Modulo hexagonal simétrico. Proceso de despliegue.

Superficies triaxiales planas desplegadas

El modulo hexagonal puede ser diseñado con unidades simples simétricas y también con unidades simples asimétricas. Para las tres posibles agrupaciones de unidades simples la trayectoria de movimiento es lineal recto. La primera opción es la agrupación de unidades simples simétricas. La segunda opción es la agrupación de unidades simples asimétricas orientadas al interior. Y la tercera opción son las unidades simples asimétricas agrupadas hacia el exterior. En los tres casos de agrupación para formar el modulo hexagonal las unidades simples perimetrales del modulo son simétricas ya que la trayectoria de recorrido es lineal recta.

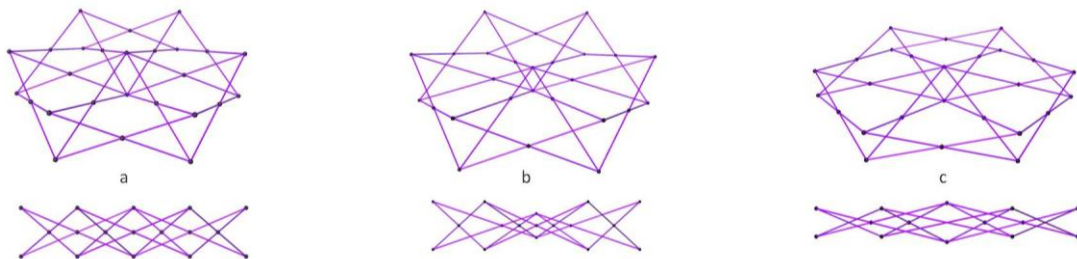


Fig 85. Modulo hexagonal de trayectoria plana. Tipologías. (a) Simétrico. (b) Asimétrico interno. (c) Asimétrico externo.

Para la agrupación de unidades simples asimétricas orientadas al interior, podemos observar que la construcción geométrica del modulo hace que el diamante formado en el interior de modulo sea de menor longitud que los puntos externos del modulo. Esto se debe a que la excentricidad de las unidades simples están orientadas hacia el interior del modulo. Las unidades simples perimetrales del modulo hexagonal son simétricas y estabilizan el sistema. Este modulo hexagonal no tiene ninguna restricción de movimiento ni tampoco bloqueos por incompatibilidad geométrica. Es interesante la exploración de agrupaciones de este modulo hexagonal ya que presenta puntos altos y puntos bajos en sus caras coplanares.

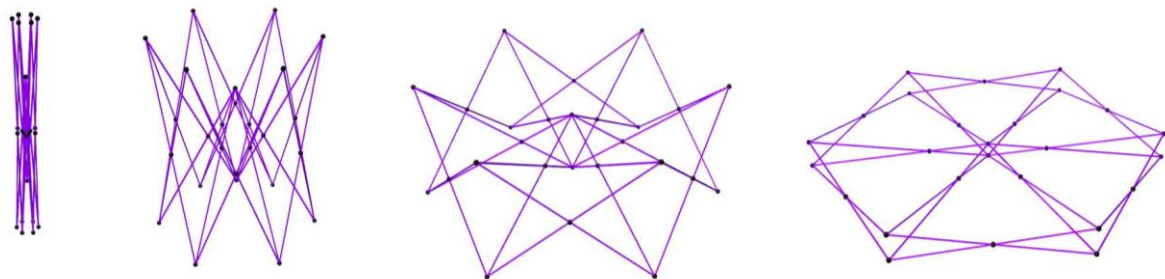


Fig 86. Modulo hexagonal asimétrico interno plano. Proceso de despliegue.

En el caso del modulo hexagonal formado por unidades simples asimétricas orientadas al exterior del modulo, podemos observar que el diamante formado en el interior del modulo es de mayor dimensión que los extremos del modulo. Esto se debe a que la asimetría está orientada hacia el exterior del modulo. Para este caso las agrupaciones del modulo sobre los ejes del plano (x,y) no tienen ninguna restricción ni incompatibilidad geométrica de movimiento. Pero la agrupación en el eje (z) no es posible por incompatibilidad geométrica.

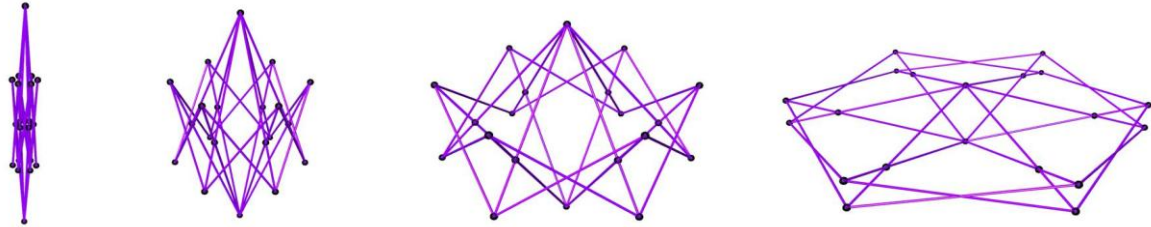


Fig 87. Modulo hexagonal asimétrico externo plano. Proceso de despliegue.

Finalmente la agrupación de módulos hexagonales con trayectoria lineal recta puede llegar a ser una exploración interesante si se combinan los tipos de módulos con diferentes asimetrías y así tener puntos altos y bajos para el control de la curvatura en un recubrimiento textil.

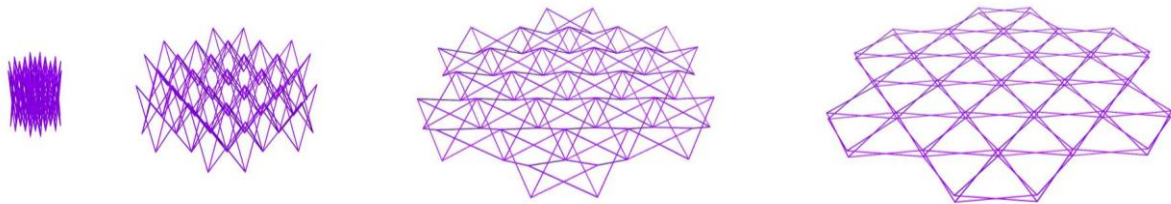


Fig 88. EDBRA. Superficie triaxial plana. Proceso de despliegue.

Para el modulo hexagonal asimétrico orientado hacia el interior, tenemos una geometría singular para agrupar el modulo en el eje (z) formando una torre triaxial desplegable con una espacialidad interesante dependiendo del cambio de escala en su aplicación. Para este modulo y la agrupación podemos eliminar las unidades simples simétricas del perímetro sin perder estabilidad y fluidez en la trayectoria de movimiento de la estructura.

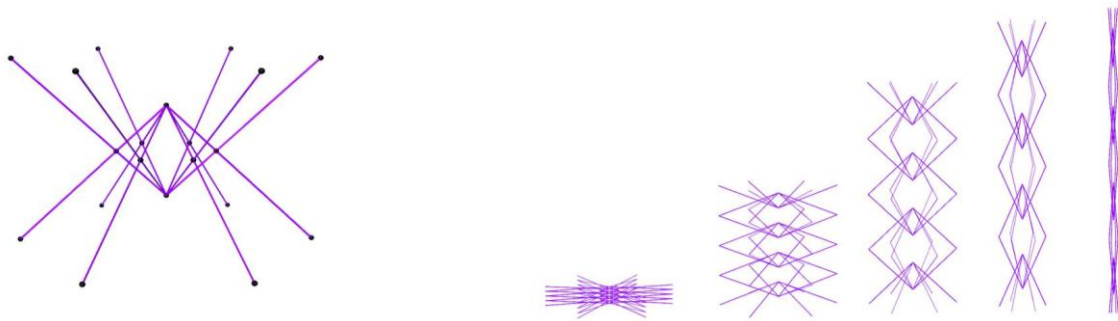


Fig 89. EDBRA. Torre triaxial asimétrica. Proceso de despliegue.

Agrupaciones especiales simétricas

Los sistemas triaxiales desplegables simétricos tienen la característica de agruparse por sus caras perimetrales. Mas específicamente las del modulo triaxial con trayectoria lineal recta. El modulo triaxial de sección triangular se puede agrupar de forma lineal y de forma espacial, teniendo unas exploraciones interesantes como aplicaciones espaciales y arquitectónicas.

La agrupación lineal del modulo triaxial simétrico forma barras desplegables con sección triangular. Estas barras espaciales se pueden agrupar de forma lineal y espacial. Al agrupar las barras espaciales desplegables con sección triangular podemos obtener plataformas desplegables o paneles espaciales rectos desplegables. Las barras desplegables se repiten con giros de 60° para ir formando la superficie espacial plana deseada.

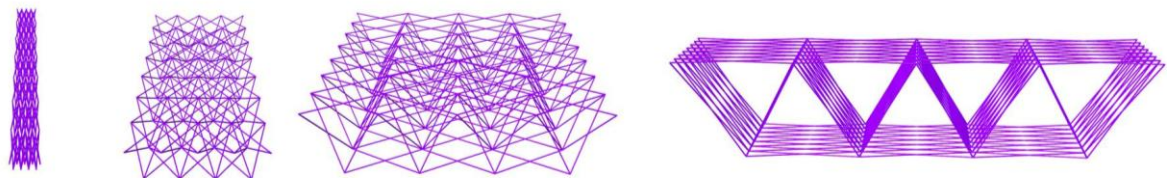


Fig 90. EDBRA. Superficie triaxial plana simétrica con sección triangular. Proceso de despliegue.

Esta agrupación de módulos formados por polígonos desplegables se puede diseñar con todos los polígonos regulares. Pero con polígonos desplegables de más de 5 caras el sistema puede presentar inestabilidad formal. Los módulos adecuados para agrupar son los de polígonos triangular y hexagonal. Así la estructura tendrá mayor estabilidad.

Con estos mismos parámetros podemos agrupar de forma vertical por capas y explorar configuraciones espaciales buscando su aplicación arquitectónica.

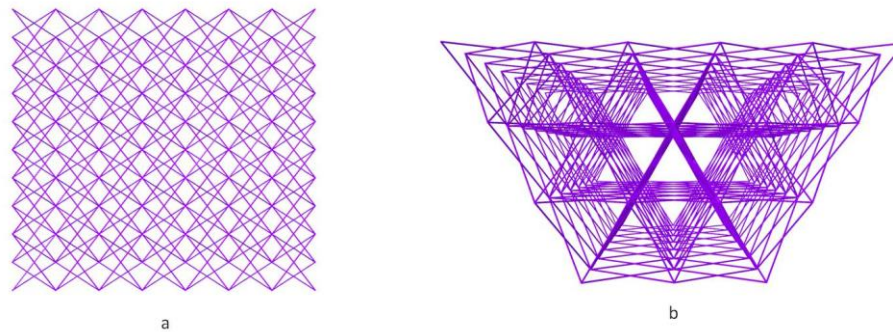


Fig 91. EDBRA triaxial simétrica espacial.

Superficies monoclásticas desplegadas triaxiales

El diseño paramétrico de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas está marcado por la simetría o asimetría de sus unidades simples o pares de barras articuladas. Como hemos visto en las anteriores exploraciones, para el diseño paramétrico de los sistemas axiales y biaxiales es necesario la asimetría en las unidades simples para lograr diseñar un sistema desplegable con trayectoria lineal curva. Los sistemas desplegados triaxiales también dependen de esta simetría para formar superficies curvas.

Las estructuras desplegadas con sistemas triaxiales son las menos exploradas y las que pueden resultar más interesantes de explorar en busca de una geometría compleja con aplicaciones arquitectónicas.

Modulo triaxial asimétrico

Como ya hemos mencionado en el desarrollo y descripción del diseño paramétrico de las EDBRA la asimetría es la que da curvatura y orientación a las unidades simples desplegadas. Para los sistemas triaxiales la asimetría también define el tipo de curvatura y su orientación.

Primero definiremos los parámetros para los módulos triaxiales con curvatura simple y luego con doble curvatura. Para finalmente hacer las exploraciones de agrupaciones posibles de cada módulo. Los sistemas triaxiales son los más apropiados para el diseño de estructuras desplegadas complejas ya que su geometría da la mayor estabilidad posible al sistema cuando está en posición de uso.

Y por último explorar las agrupaciones de sistemas complejos triaxiales como estrategia para el diseño de estructuras desplegadas.

El módulo triaxial asimétrico mínimo es el formado por tres unidades simples, Existen dos posibles configuraciones geométricas para el diseño y agrupación de módulos triaxiales asimétricos. El primero es

con una unidad simple simétrica de mayor longitud y dos unidades simples asimétricas de longitud más corta que las de la unidad simétrica. Y la segunda es con una unidad simple simétrica de menor longitud que las dos unidades asimétricas. En ambos casos la curvatura es hacia la misma dirección. La diferencia está en la posición de las barras. En el primer caso las unidades simétricas quedan al exterior de la curva. Y el segundo caso las unidades simétricas quedan al interior de la curva trazada por el sistema desplegable.

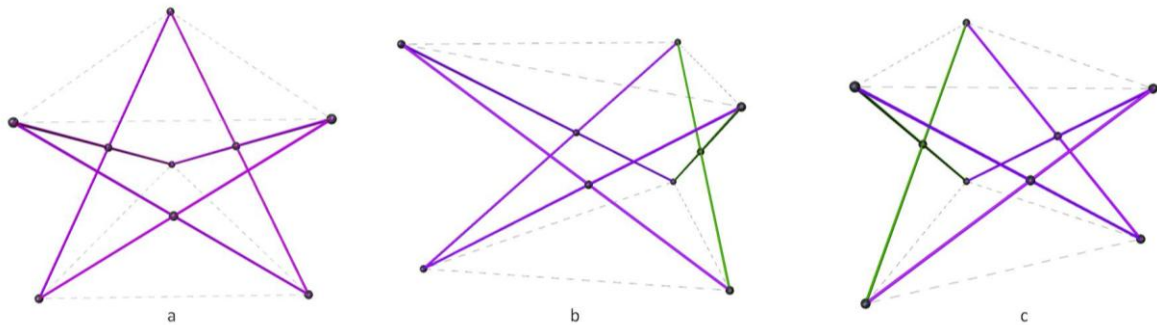


Fig 92. Modulo triaxial. (a) Simétrico. (b) Asimétrico interior. (c) Asimétrico exterior.

Arco triaxial asimétrico

La agrupación de módulos triaxiales asimétricos nos da como resultado un sistema triaxial de trayectoria lineal curva. En ambos casos la proyección de la curva dependerá de la asimetría de las unidades simples asimétricas. La trayectoria de despliegue es circular y su máximo nivel de apertura será cuando choquen sus extremos. Para diseñar un arco triaxial desplegable es indispensable definir su posición final de despliegue para bloquear o frenar su movimiento en su estado de uso. Es importante mencionar que este sistema de arco triaxial asimétrico requiere de elementos adicionales al sistema para rigidizar su posición final de uso.

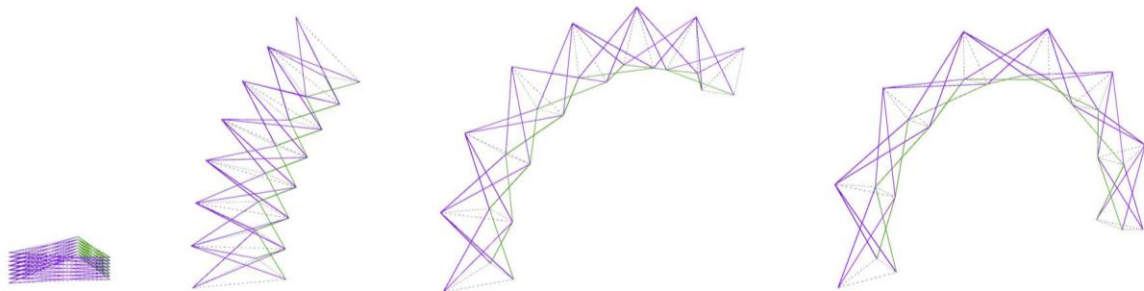


Fig 93. EDBRA. Arco triaxial asimétrico interno. Proceso de despliegue.

Los arcos triaxiales desplegados pueden cambiar su curvatura con los mismos números de módulos agrupados. Para el caso de la exploración se han agrupado 7 módulos. El cambio de la asimetría hace que cambie la trayectoria de su curva. Si la asimetría es muy cercana a su centro la curvatura será más abierta. Y si la asimetría se aleja más del centro la curvatura será más cerrada.

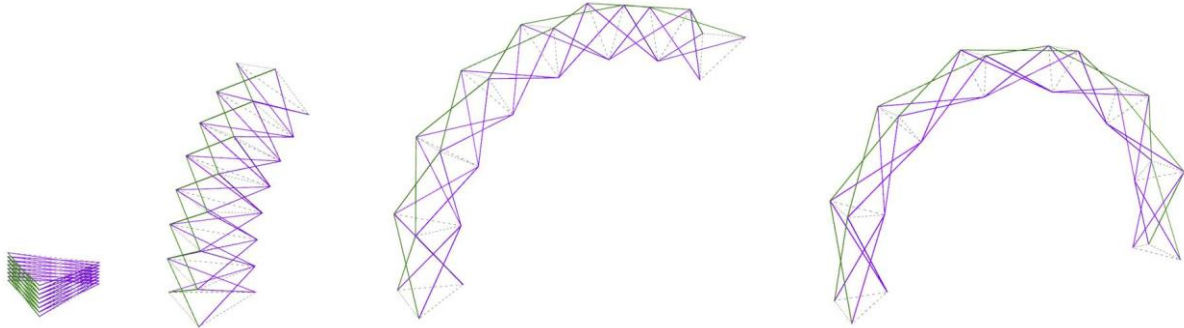


Fig 94. EDBRA. Arco triaxial asimétrico externo. Proceso de despliegue.

La proyección perpendicular en el plano de las unidades simples simétricas nos define una superficie monoclástica desplegable o bóveda de cañón. La unión entre uno o más arcos desplegables será por los extremos de la unidad simple simétrica. Que en tal caso tendrá 8 puntos de articulación. Una característica singular del arco desplegable triaxial es su posición de cerrado en forma triangular.

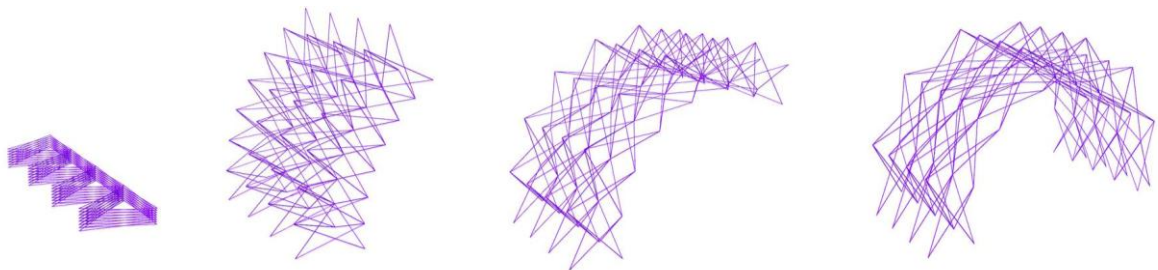


Fig 95. EDBRA. Bóveda triaxial asimétrico interno. Proceso de despliegue.

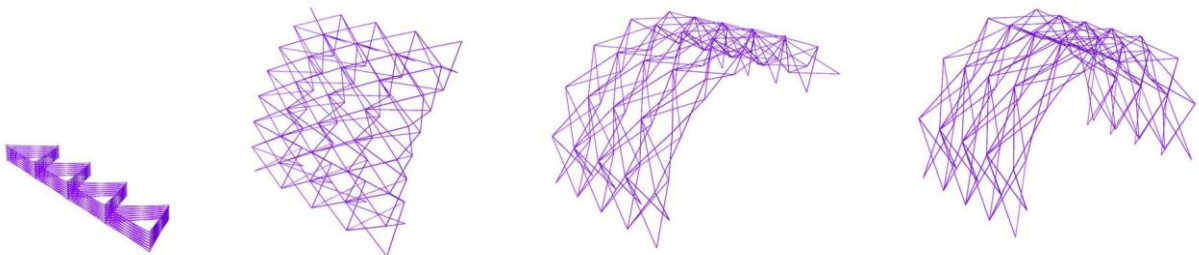


Fig 96. EDBRA. Bóveda triaxial asimétrico externo. Proceso de despliegue.

La bóveda triaxial asimétrica también requiere de un diseño para su posición final de uso o despliegue, y el diseño de elementos adicionales al sistema desplegable para bloquear o frenar el movimiento máximo o límite de la estructura.

La proyección perpendicular de arcos desplegables también pueden tener una trayectoria de movimiento parcial que es el caso de los arcos, y una trayectoria de movimiento total que es cuando el sistema desplegable ha completado el giro de 360° y sus extremos hacen contacto. Para este caso la estructura necesita garantizar el contacto de los extremos para estar en equilibrio.

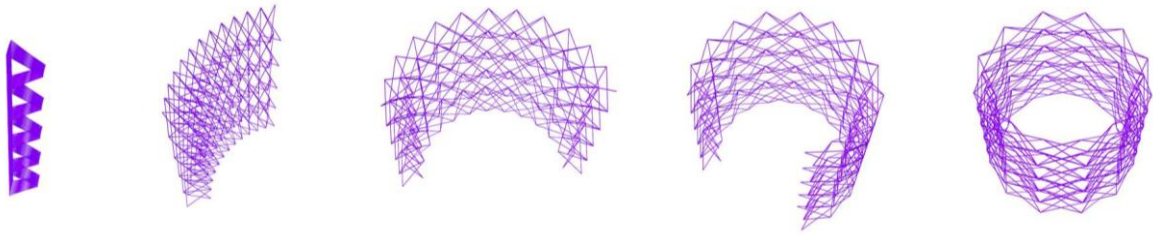


Fig 97. EDBRA. Bóveda triaxial asimétrico externo. Torre desplegable. Proceso de despliegue.

Modulo triaxial hexagonal asimétrico

Continuado con la exploración de los sistemas triaxiales, las unidades simples asimétricas se pueden agrupar de tal forma que los tres ejes de movimiento tengan la trayectoria de la curva en el mismo sentido. Y si rotamos este modulo triaxial 6 veces para completar los 360° sobre un mismo eje de contacto obtendremos el modulo hexagonal asimétrico.

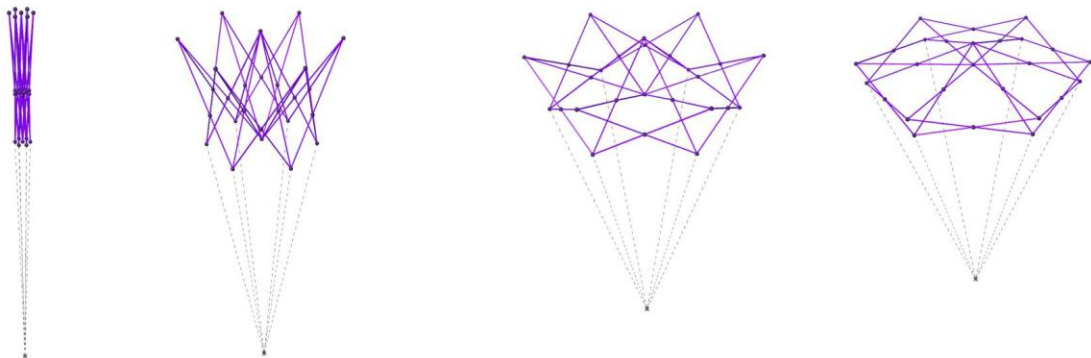


Fig 98. Modulo triaxial hexagonal. Proceso de despliegue.

En este modulo hexagonal todos sus ejes trazan una trayectoria lineal curva en la misma dirección, incluyendo las unidades simples perimetrales. Esta característica hace imposible conectar en paralelo los

módulos hexagonales, por incompatibilidad geométrica. La unión de módulos es posible siguiendo la trayectoria curva, hasta recorrer los 360° y completar el giro.

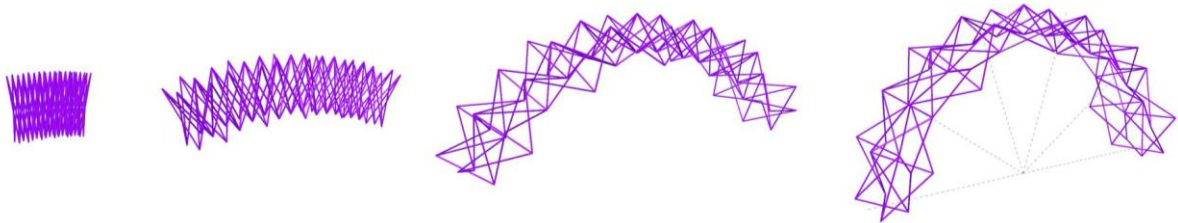


Fig 99. EDBRA. Arco triaxial hexagonal asimétrico. Proceso de despliegue.

Para el ejemplo de exploración que tomamos, se ha repetido el módulo triaxial hexagonal 5 veces, siendo el ángulo de incidencia para la trayectoria de despliegue. En este caso también es necesario el cálculo de la asimetría de las unidades simples y la posición final de uso de la estructura, con el fin de tener los extremos del arco con superficie de apoyo y poder bloquear el movimiento.

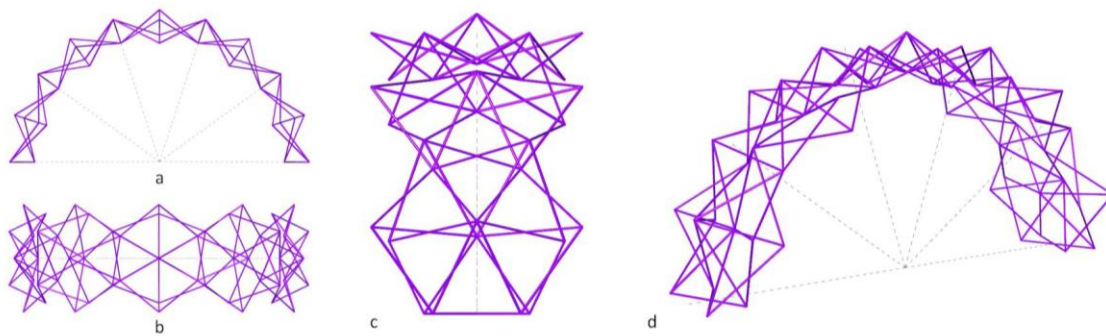


Fig 100. Arco triaxial hexagonal. (a) Vista lateral. (b) Vista aérea. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.

Si bien es posible hacer una proyección perpendicular de los arcos desplegados para formar una geometría monoclástica, los puntos de contacto para unir los arcos son parciales debido a la geometría hexagonal del módulo. La forma de unión de los arcos hexagonales crea unos espacios vacíos en forma de rombos que dan una geometría interesante para ser explorada como aplicación arquitectónica.

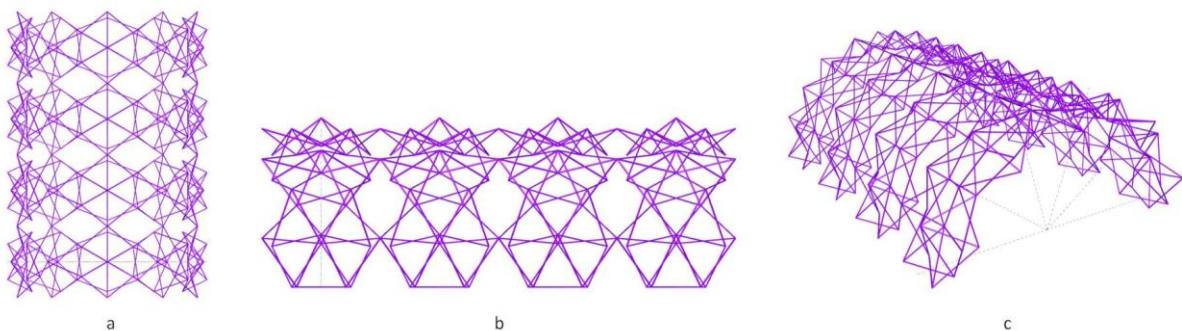


Fig 101. EDBRA. Bóveda triaxial hexagonal asimétrico. (a) Vista aérea. (b) Vista frontal. (c) Vista isométrica.

Y continuado con la exploración de diseño, al incrementar el número de módulos y definir el despliegue máximo del sistema, podemos obtener un anillo desplegables con módulos hexagonales. El despliegue máximo será al tener contacto los extremos de la estructura. Para el caso de estudio se unieron 9 módulos hexagonales.

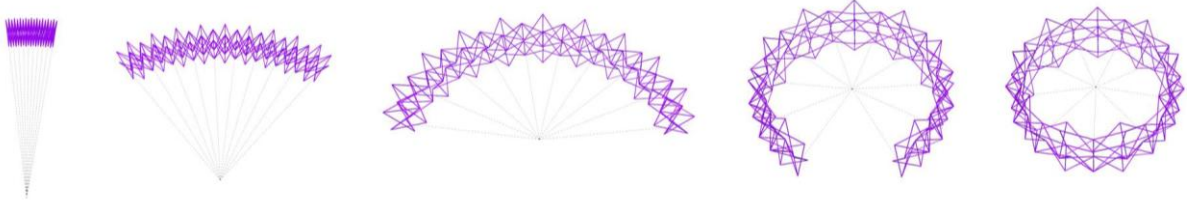


Fig 102. EDBRA. Arco triaxial hexagonal asimétrico. Proceso de despliegue completo con 9 módulos.

Superficies sinclásticas desplegables triaxiales

En la exploración de superficies sinclásticas definiremos los parámetros para el diseño y su agrupación. Como primera condición de diseño, se usara el modulo triaxial hexagonal completo o parcial, con el fin de regularizar la geometría con la misma longitud o dimensión de sus elementos. Las superficies sinclásticas desplegables describen una trayectoria de doble curvatura en la misma dirección, esto quiere decir que están inscritas en una esfera o geometría geodésica. En tal circunstancia se tomará como condición de diseño la discretización de la superficie por módulos hexagonales según la frecuencia de subdivisión del icosaedro y el dodecaedro. Por último se explorara las posibles agrupaciones discontinuas del modulo hexagonal para el diseño de aplicaciones arquitectónicas.

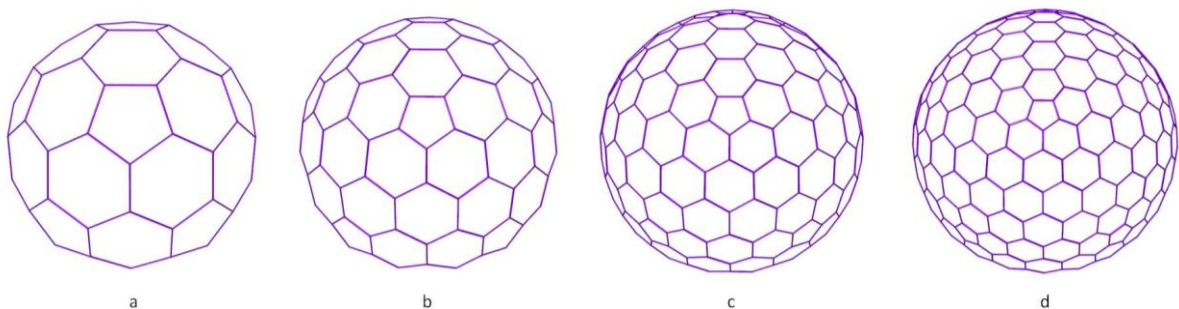


Fig 103. Frecuencias del icosaedro para domos geodésicos. (a) Frecuencia 2. (b) Frecuencia 3. (c) Frecuencia 4. (d) Frecuencia 5.

A partir de estas condiciones y parámetros de diseño se proponen dos agrupaciones de módulos hexagonales para iniciar el tejido de una estructura geodésica desplegable. Ambas agrupaciones definen

su geometría desde su centro. En la primera se toma como centro el modulo triaxial hexagonal, y en la segunda se toma como centro el vacio pentagonal formado por la agrupación de 5 módulos hexagonales.

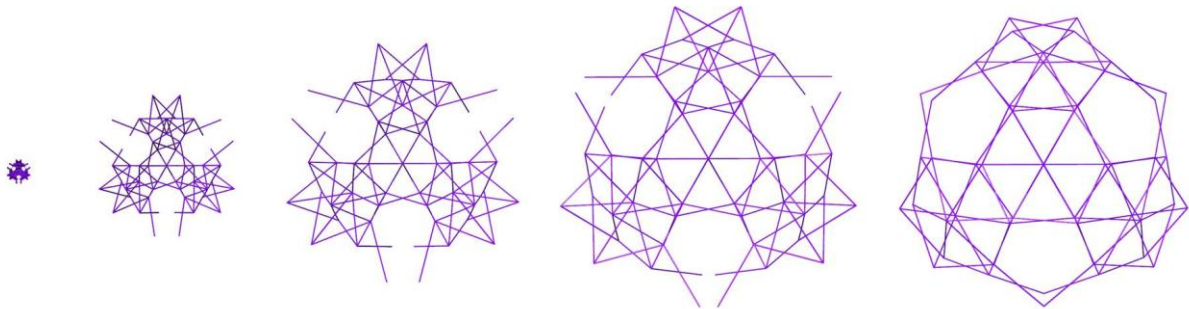


Fig 104. EDBRA. Agrupación triaxial hexagonal asimétrico. Modulo hexagonal central. Proceso de despliegue.

En el diseño paramétrico de las EDBRA con geometría geodésica el sistema sufre una separación de sus elementos durante la trayectoria de movimiento. Esta rotura del sistema se debe a que geoméricamente los elementos lineales o barras son incompatibles con la trayectoria curva. Como la exploración para el diseño paramétrico no incluye variables de deformación, la trayectoria de movimiento del sistema sufre rotura. En las exploraciones de modelos físicos esta rotura del sistema o separación de sus elementos no existe ya que las barras sufren una pequeña deformación durante su trayectoria de movimiento y regresan a su posición inicial al terminar el recorrido.

Este comportamiento estructural de las EDBRA ya había sido analizado anteriormente en los trabajos del arquitecto Félix Escrig, haciendo mención a la deformación del sistema cuando tiene una geometría geodésica. Y como es necesario introducir un fuerza adicional durante el proceso de despliegue para hacer un análisis estructural del sistema. Esta fuerza o energía que necesita la estructura es devuelta cuando el sistema pasa de su estado cerrado a abierto, dando rigidez a la estructura y estabilidad. (Escrig F. , 2012)

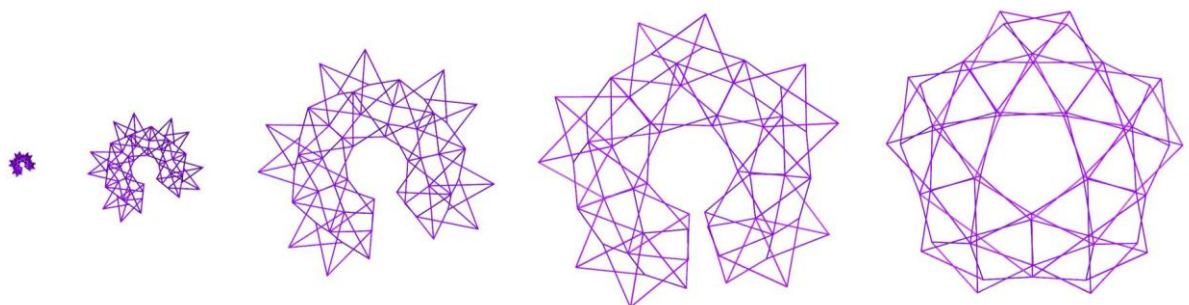


Fig 105. EDBRA. Agrupación triaxial hexagonal asimétrico. Modulo hexagonal con centro pentagonal. Proceso de despliegue.

Esta incompatibilidad geométrica también ocurre en la segunda opción de tejido del para el modulo triaxial hexagonal. Para este caso la separación de sus elementos ocurre en un solo eje. Dependerá del patrón de agrupación, la localización de rotura del sistema en el diseño paramétrico. Si bien geoméricamente esta rotura puede llegar a ser un problema, en la construcción de modelos físicos puede llegar a ser una ventaja la flexión que tienen los elementos rígidos ya que no solo proporcionan rigidez al sistema en su posición de uso o abierta, sino que también frena el sistema y controla su movimiento.

Para esta investigación hablaremos de flexión activa a este fenómeno geométrico que tienen los elementos rígidos de los sistemas desplegados. Flexión activa que está presente en casi todas las EDBRA en mayor o menor medida.

Domos desplegables

A partir de los dos tipos de agrupación del modulo triaxial hexagonal, podemos construir domos desplegables. Los domos desplegables con barras rectas articuladas pueden variar su trayectoria y ángulo de curvatura según el control de los parámetros deseados. Es necesario explorar la asimetría adecuada de las unidades simples para tener un domo desplegable sin restricciones de movimiento y estable.

La construcción geométrica del primer domo desplegable se hace usando el tejido con modulo hexagonal central. Continuando con el patrón de agrupación la idea es conectar los módulos hasta cerrar el tejido por niveles. Para esta primera exploración de agrupación se conectaran los 3 primeros anillos. El primer anillo es el mismo modulo hexagonal central, el segundo anillo es la continuación del patrón geométrico formado por 3 módulos hexagonales y 3 vacios pentagonales. Y un tercer anillo formado por 3 módulos hexagonales y 3 medios vacios pentagonales.

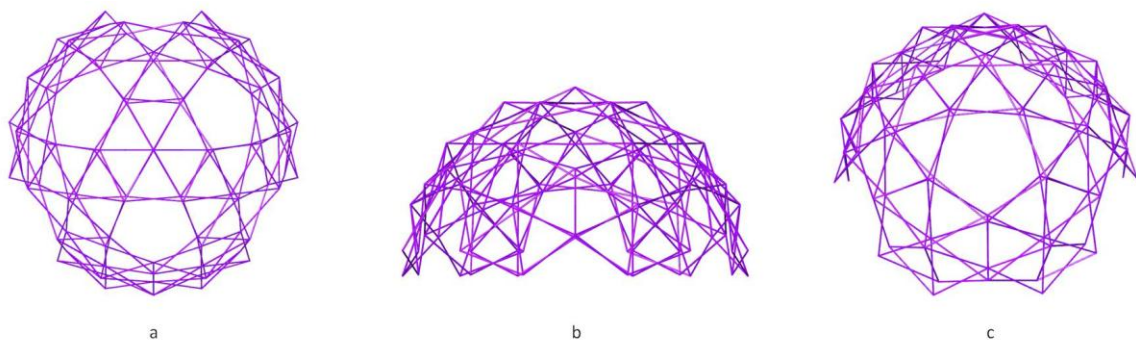


Fig 106. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.

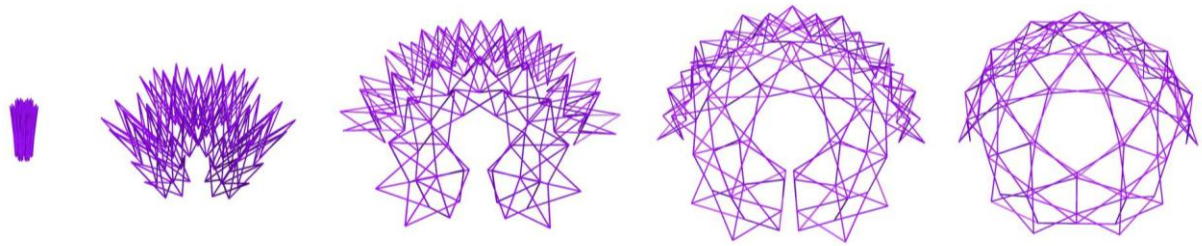


Fig 107. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. Proceso de despliegue.

En el proceso de despliegue geométrico la estructura sufre rotura en tres ejes de movimiento, los mismos que el patrón de agrupación con el modulo hexagonal central. Esta geometría también permite tener 3 accesos al interior del domo cuando esta es su posición de despliegue o abierto. Como característica particular el domo en su estado de uso, tiene sus puntos de apoyo en las esquinas de los módulos hexagonales del último anillo. La geometría resultante del domo desplegable está inscrita en un icosaedro truncado.

La construcción geométrica del segundo domo desplegable se hace usando el patrón de tejido hexagonal con centro pentagonal. Para este caso de exploración también continuaremos el patrón de tejido hasta completar 3 niveles de anillos. Un primer anillo es el formado por el perímetro desplegable de forma pentagonal. El segundo anillo está formado por 5 módulos hexagonales. Y el tercer anillo está formado por 5 medios módulos hexagonales y 5 vacios pentagonales. Para este caso hay que cerrar los vacios pentagonales con unidades simples asimétricas. La geometría formada por los módulos hexagonales está inscrita en un icosaedro truncado.

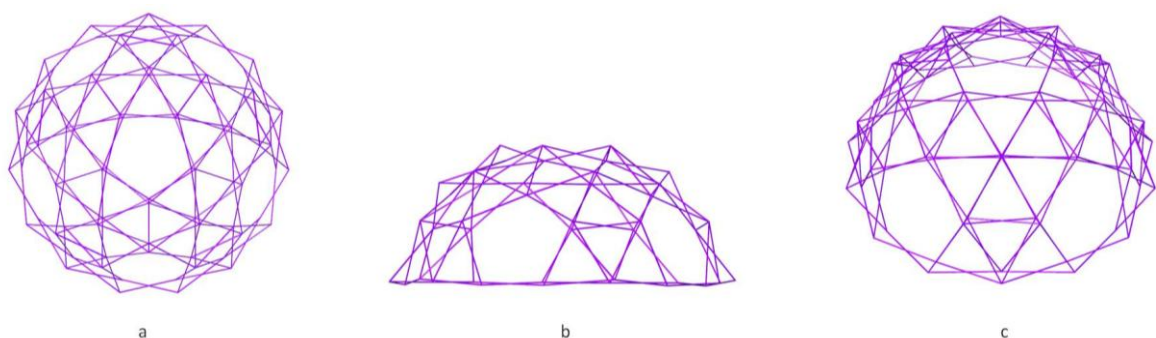


Fig 108. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 2 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.

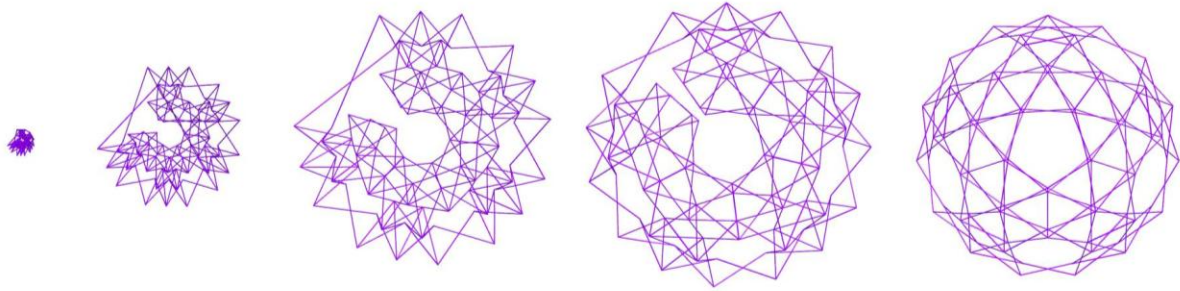


Fig 109. EDBRA. Domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. Proceso de despliegue.

El proceso de despliegue geométrico del domo también sufre rotura, en este caso por un solo eje. Como podemos observar en la figura. La deformación de la unidad simple asimétrica nos indica el máximo punto de rotura del sistema durante el proceso de despliegue. Recordemos que esta rotura ocurre en la construcción geométrica, en un modelo físico esta rotura no se presenta. En el modelo físico tendremos una flexión activa de las barras durante el proceso de pliegue y despliegue que impedirá que el sistema se separe o presente rotura. En esta geometría de agrupación por módulos hexagonales, el domo se apoya sobre el tercer anillo casi coplanar formado por unidades simples asimétricas.

Como parte de la exploración paramétrica de sistemas desplegable tipo domo, podemos diseñar medios domos si seguimos las líneas geodésicas trazadas por la agrupación de módulos triaxiales. Para tal caso debemos asegurarnos de la estabilidad de la estructura, garantizando que las líneas geodésicas cierren completamente el sistema. Debido a la reducción de la curvatura sinclástica y de módulos hexagonales el proceso de despliegue de los medios domos puede resultar inestable hasta lograr la apertura total de la estructura.

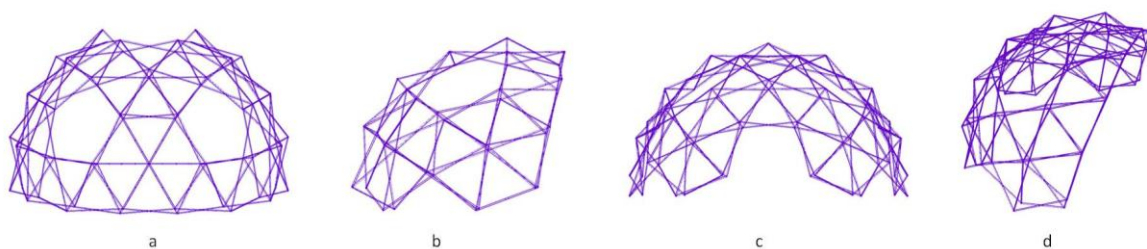


Fig 110. EDBRA. Medio domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.

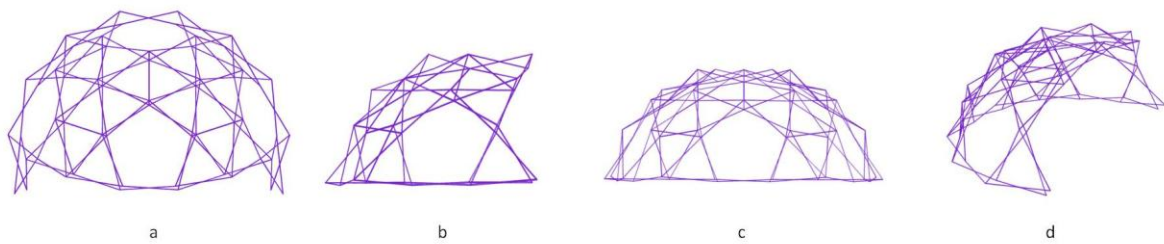


Fig 111. EDBRA. Medio domo desplegable con patrón de tejido 1 formado por 3 anillos. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.

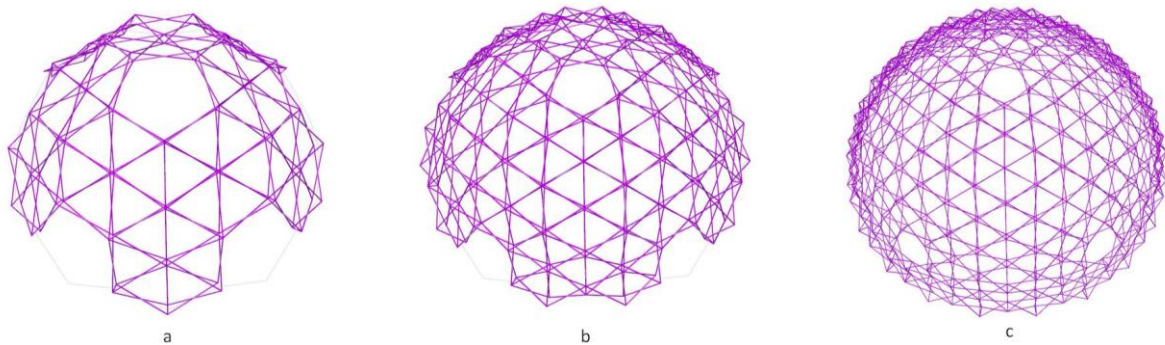


Fig 112. EDBRA. Domos despleables. (a) Domo desplegable frecuencia 2. (b) Domo desplegable frecuencia 3. (c) Domo desplegable frecuencia 4.

Luego de hacer la parametrización con la segunda frecuencia del icosaedro para diseñar domos despleables con módulos triaxiales asimétricos, también es posible hacer las mismas exploraciones en diseño paramétrico con las siguientes frecuencias de sub división del icosaedro. Como ejercicio de exploración quedan abiertas las posibilidades para diseñar patrones o agrupaciones con módulos hexagonales asimétricos en diferentes frecuencias.

Para finalizar con la exploración del diseño paramétrico de los domos despleables o superficies sinclásticas, se puede discretizar y hacer agrupaciones de módulos hexagonales despleables no continuos. Esto quiere decir que es posible obtener patrones o geometrías que no sigan las frecuencias de sub división del icosaedro, o que no siempre cierren los anillos que garantizan su estabilidad formal. Como ejercicio de exploración geométrica es interesante la búsqueda de posibles agrupaciones con aplicaciones arquitectónicas.

La primera exploración geométrica propuesta es la agrupación de 3 módulos hexagonales formando un arco desplegable, y a ambos extremos unir dos módulos hexagonales rotados 30° respecto al eje de trayectoria de movimiento del arco hexagonal. Estos últimos módulos servirán de apoyo a la estructura y estabilidad al arco.

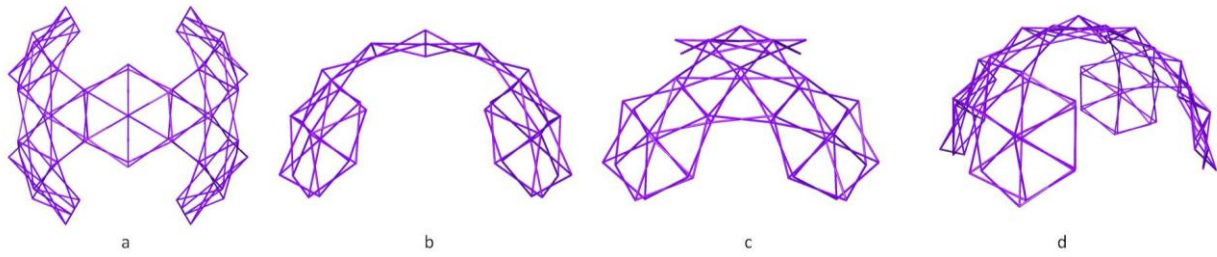


Fig 113. EDBRA. Domo tipo H (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.

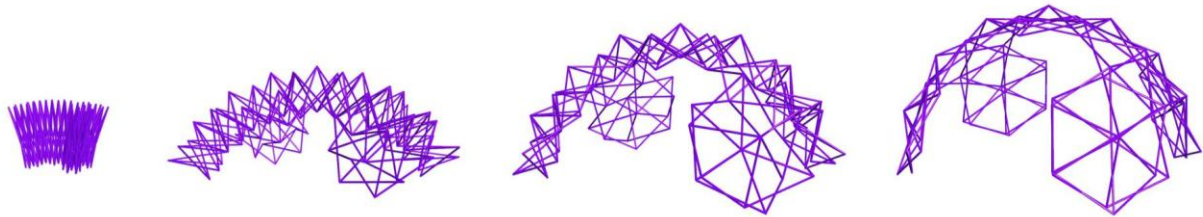


Fig 114. EDBRA. Domo tipo H. Proceso de despliegue.

La segunda exploración desarrollada en esta investigación parte de la agrupación de 3 módulos hexagonales a uno central y continuar el tejido hasta formar una esfera o cerrar el sistema. La idea es no cerrar el segundo anillo como en los tejidos anteriormente descritos, sino prolongar la agrupación lineal de los tres ejes de módulos centrales y luego si cerrar el sistema. Esta agrupación propuesta deja unos vacíos en forma de (x). Como exploración geométrica es interesante la relación entre los ángulos de incidencia de las unidades simples desplegables y las caras hexagonales de cada modulo.

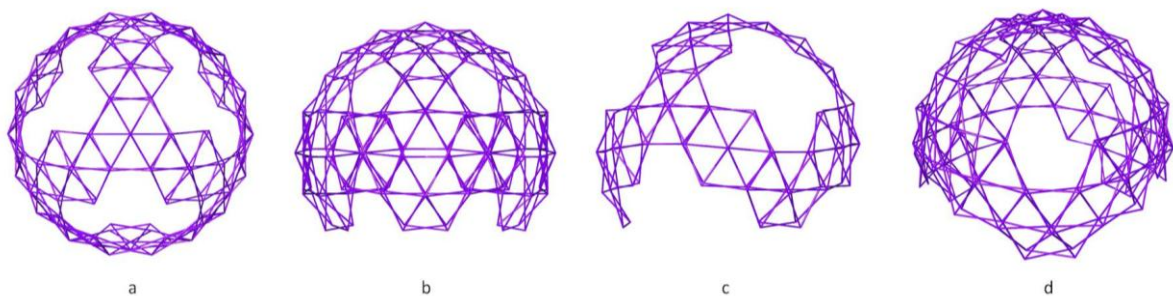


Fig 115. EDBRA. Domo tipo H extendida (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal. (d) Vista isométrica.

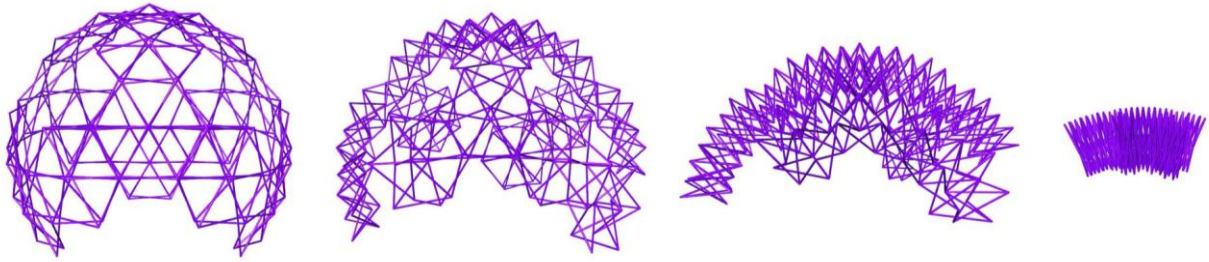


Fig 116. EDBRA. Domo tipo H extendida. Proceso de despliegue.

Superficies anticlásticas desplegables triaxiales

Las superficies anticlásticas triaxiales son las más complejas de parametrizar como sistemas desplegables. Pero al mismo tiempo son las más interesantes de explorar con el fin de definir parámetros y patrones geométricos compatibles con el despliegue de movimiento inscrito en una superficie anticlástica. Para esta exploración vamos definir primero el tipo de superficie anticlástica para luego usar el método de optimización de malla por polígonos para buscar la iteración geométrica adecuada que usaremos para convertir en un sistema desplegable.

En este punto es necesario el uso de *Kangaroo*, un motor de simulaciones físicas e interactivas para optimización y búsqueda de la forma en *Grasshopper*. Primero definimos el tipo de superficie anticlástica para optimizar por polígonos con *Kangaroo*. Y luego usamos el algoritmo para reemplazar las aristas de los polígonos por unidades simples asimétricas y obtener una estructura desplegable optimizada de la superficie anticlástica inicial.

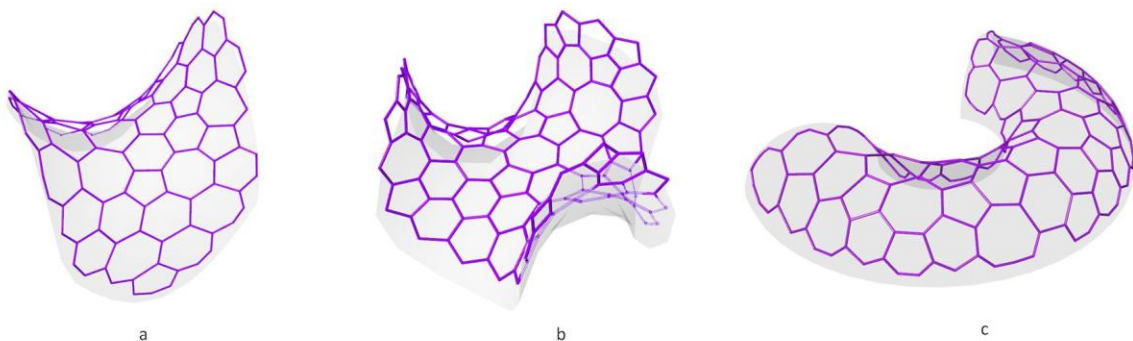


Fig 117. Optimización de superficies anticlásticas usando Kangaroo + Grasshopper + Rhinoceros.
(a) Paraboloides hiperbólico. (b) Enneper. (c) Torus, sección.

La optimización de la superficie por polígonos permitirá trazar la curvatura más aproximada y así evitar deformaciones o incompatibilidades de movimiento. Para explorar los parámetros definidos para las

superficies anticlásticas, tomamos un paraboloides hiperbólico y le aplicamos el algoritmo de optimización y luego el de despliegue.

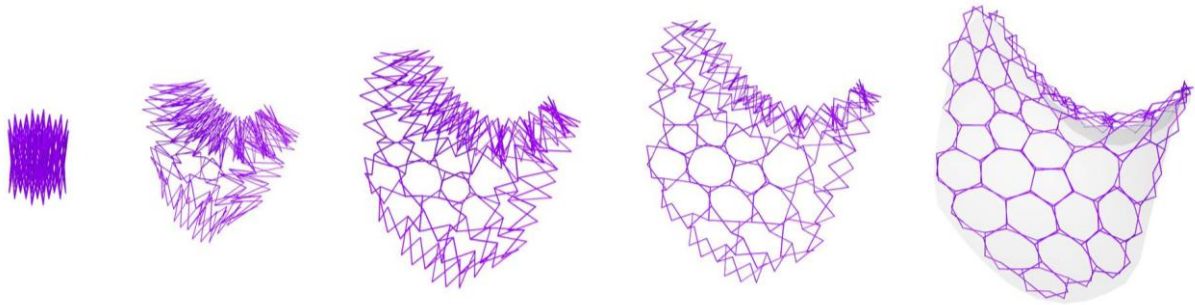


Fig 118. EDBRA. Paraboloides hiperbólico triaxial. Proceso de despliegue.

La optimización de malla por polígonos para las superficies anticlásticas es una buena estrategia de diseño para convertirlos en sistemas desplegables, y amplía la posibilidad de explorar nuevas geometría y aplicaciones. La optimización de malla con polígonos de igual número de lados deforma la superficie final y se aleja de la curvatura y trayectoria de la superficie original. También es posible encontrar incompatibilidades geométricas y de movimiento. Durante el desarrollo de esta investigación se propone explorar la optimización de malla, regularizando los polígonos y acotándolos a pentágonos, hexágonos y heptágonos. La optimización de malla usando solo estos tres polígonos dará resultados mas aproximados a la malla inicial.

Sistemas desplegados especiales

Después de explorar el diseño paramétrico de las EDBRA con sistemas axiales, biaxiales y triaxiales; y permitir tener un panorama global y detallado de las posibles configuraciones geométricas y agrupaciones por módulos desplegables, veo necesario para esta investigación la exploración de EDBRA compuestas por sistemas desplegables. La idea es definir alguno de los sistemas desplegables vistos anteriormente en este capítulo y usarlo como un modulo compuesto o elemento constructivo para agrupar.

Lo primero sería definir las EDBRA como un sistema compuesto. Esto quiere decir que la estructura estará formada por dos, tres o más sistemas desplegables con compatibilidad de movimiento y se modularán según geometría y búsqueda de la forma, siempre buscando una aplicación arquitectónica. El objetivo es usar los sistemas desplegables como elementos constructivos y modularlos para formar una estructura desplegable compuesta. La estructura no tendrá un despliegue o movimiento único, y serán necesarios el uso de elementos adicionales a los sistemas desplegables para estabilizar o conectar la estructura final.

La idea de una estructura desplegable compuesta que se pliegue o despliegue por partes según la cantidad de sistemas desplegables agrupados, abre un abanico de posibilidades y agrupaciones espaciales para explorar. Como mencione anteriormente la idea es diseñar estructuras desplegables espaciales con aplicaciones arquitectónicas, y el sistema desplegable ideal para iniciar esta exploración es el arco desplegable. Recordemos que tenemos tres tipos de arcos desplegables, uno biaxial y dos triaxiales.

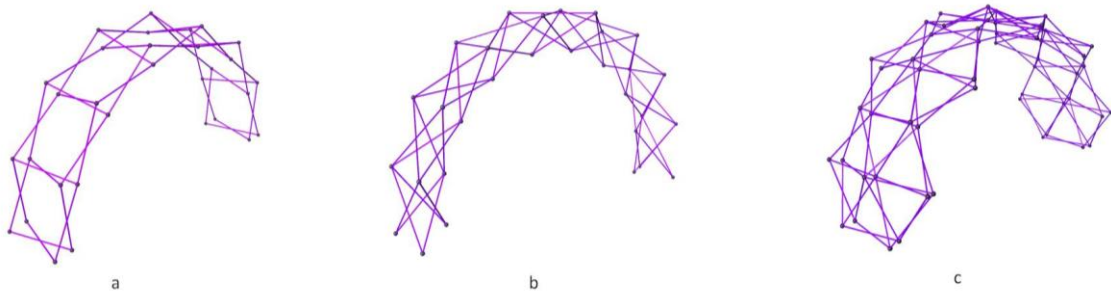


Fig 119. EDBRA. Tipos de arcos desplegables. (a) Arco biaxial. (b) Arco triaxial triangular. (c) Arco triaxial hexagonal.

Los arcos son elementos constructivos que traen rápidamente referentes de agrupación en la arquitectura convencional. La idea de agrupar arcos desplegables tiene como objetivo proponer una especie de sistema constructivo transformable que permita explorar nuevas formas y garantizar la estabilidad de la estructura. El arco desplegable seleccionado para esta exploración es el triaxial triangular, por su menor número de elementos para construir un modulo [modulo biaxial; 8 barras -modulo triaxial triangular; 6 barras -modulo triaxial hexagonal; 24 barras] y por su estabilidad formal.

Para esta investigación exploraremos tres agrupaciones con arcos desplegables, siendo un campo abierto para más geometrías y agrupaciones. Teniendo en cuenta que se puede usar otro sistema desplegable diferente al arco desplegable triangular. Los tres diseños están enfocados a la configuración de espacios habitables como posibles aplicaciones arquitectónicas.

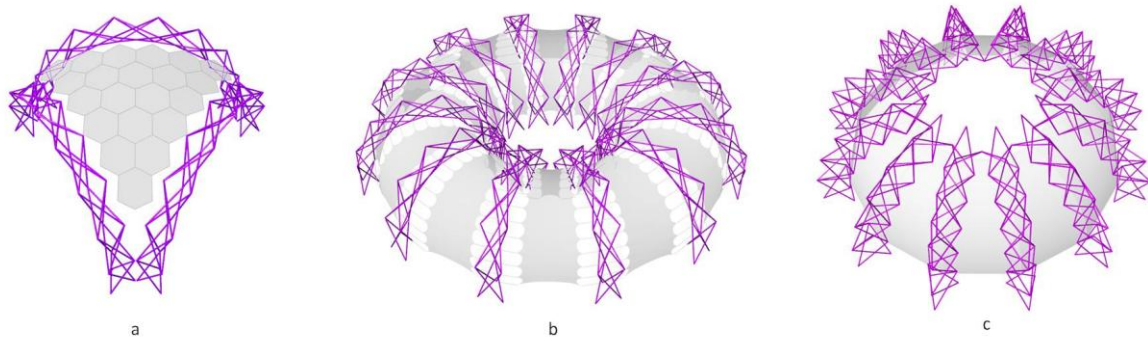


Fig 120. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales. (a) Vertex. (b) Torus. (c) Boom.

Diseño Vertex

Desde el punto de vista geométrico y de la estabilidad formal un solo arco desplegable no configura un espacio construido, y es inestable en su sentido transversal. Si proyectamos el arco en su sentido transversal, obtenemos una superficie monoclástica desplegable. Pero si agrupamos 3 arcos desplegados formando un triángulo con sus apoyos, tenemos una configuración geométrica estable, y con un espacio construido. Al unir las bases o módulos extremos de los tres arcos da una mayor rigidez y estabilidad al sistema.

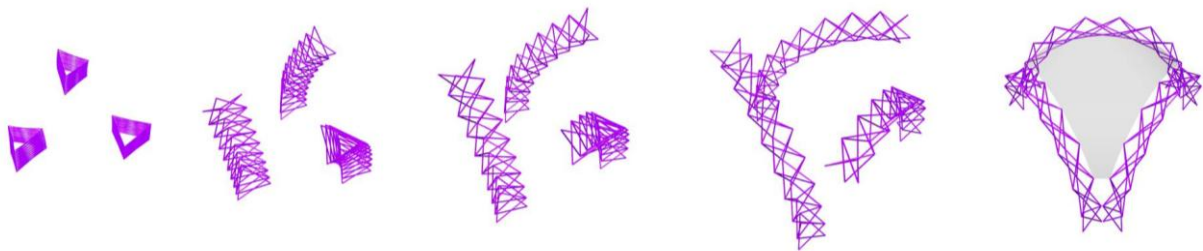


Fig 121. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Vertex. Proceso de despliegue.

Como continuación de la estrategia de diseño es se pueden proyectar los arcos desplegables a 120° del eje central del sistema, añadiendo mas arcos bien sean de iguales parámetros o variarlos incrementando su número de módulos o cambiando las dimensiones de los del núcleo central. Esta agrupación es interesante como diseño de un espacio construido. Para este caso la agrupación central de los arcos actuarían como núcleo de toda la estructura y aportando estabilidad.

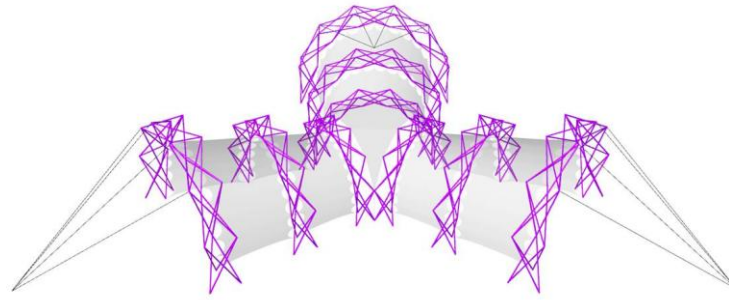


Fig 122. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Vertex extendido.

Analizando la estabilidad formal de la estructura extendida, y presumiendo que el material usando para cubrir el espacio es un textil arquitectónico, se proponen cables en los extremos de cada túnel de la estructura para garantizar la estabilidad del sistema desplegable cuando está en su estado de uso.

Diseño Torus12

La siguiente estrategia de agrupación es por geometría radial, ubicando un centro de rotación fuera de la curvatura del arco. La rotación del arco entre más veces se haga, se aproxima a la geometría de un torus. Para el ejercicio de exploración paramétrica, se usan 12 arcos desplegables. Igualmente entre mas arcos rotados tenga el sistema desplegable, tendrá mas estabilidad la estructura en su estado de uso.

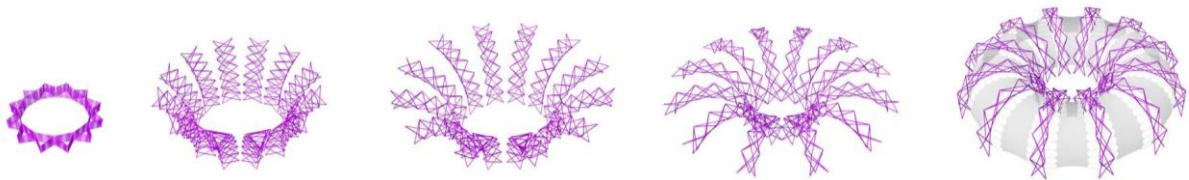


Fig 123. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Torus. Proceso de despliegue.

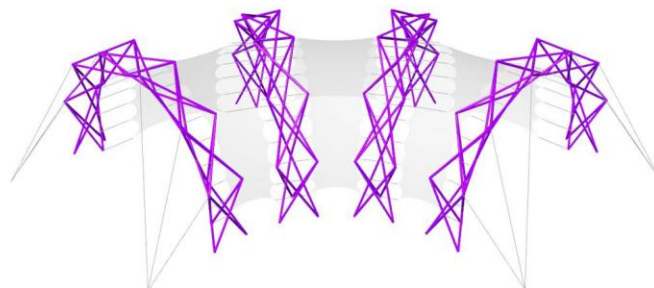


Fig 124. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Torus. Sección formada por 4 arcos desplegables.

Si tomamos solo algunas unidades de los arcos desplegados rotados obtenemos una sección del torus, sistema desplegable con dos accesos laterales. Para la exploración paramétrica tomamos 4 arcos desplegados proyectados de la geometría radial del torus. Igual que en la propuesta anterior, por estabilidad formal se ve necesario el uso de elementos adicionales al sistema desplegable para garantizar el equilibrio del sistema. En este caso se usan cables en los extremos del túnel, asumiendo un cerramiento textil para la estructura.

Diseño Boom

La tercera exploración de agrupación geométrica con arcos desplegados tiene como geometría intrínseca una sección de un domo geodésico. Para este caso tomaremos la rotación de los arcos del caso anterior, pero esta vez el despliegue es de afuera hacia dentro de la estructura. El proceso de despliegue de los arcos tendrá su máximo despliegue, en el punto alto de contacto con los otros arcos desplegados. Este tipo de geometría propuesto tiene dos parámetros particulares. El primero es la definición del número de rotaciones de arcos desplegados o polígono base. Y el segundo el problema a resolver que plantea la geometría de movimiento al estabilizar la estructura en el punto de contacto alto de los arcos.



Fig 125. EDBRA. Sistemas triaxiales especiales Boom. Proceso de despliegue.

Para el algoritmo de movimiento se introdujo el parámetro para la base de la estructura por polígonos regulares. Según cambia el polígono cambian los números de arcos y la distancia entre ellos para garantizar el contacto de los arcos en su posición de máximo despliegue o uso. En la figura anterior se describe el proceso de despliegue de una estructura de doce arcos, logrando su equilibrio cuando todos los arcos están desplegados y en contacto por los vértices formados de las unidades simples simétricas. También hay que mencionar que para los dos primeros ejercicios de exploración de diseño se usaron arcos desplegados con asimetría interna. Para este último caso se usó arcos desplegados con asimetría externa. En cualquier caso esto dependerá de la respuesta constructiva y de diseño que se quiera tomar. Las posibilidades de agrupación de arcos desplegados como módulos o elementos constructivos permite explorar nuevas geometrías y ampliar el espectro de diseño paramétrico para las estructuras desplegadas con barras rectas.

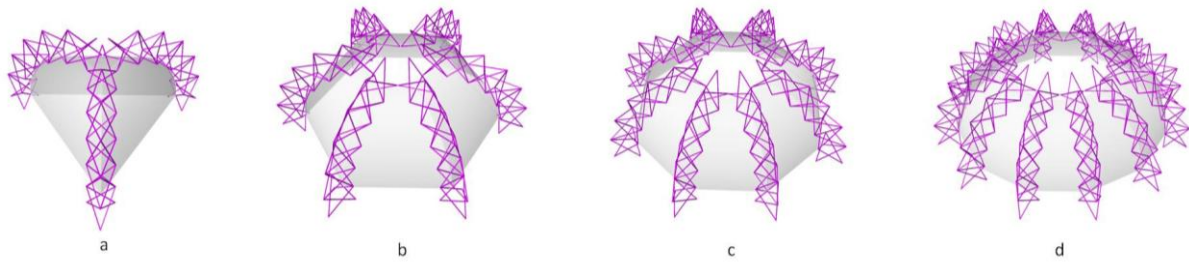


Fig 126. EDBRA. Boom triaxial desplegable. Tipos por número de arcos según polígono. (a) Boom base triangular. (b) Boom base hexagonal. (c) Boom base octagonal. (d) Boom base dodecágono.

Prismas y sólidos desplegables

Después de analizar los parámetros de diseño y posibles agrupaciones geométricas de los sistemas desplegables axiales, biaxiales y triaxiales se tienen las bases solidas para proponer el diseño geométrico y parámetros de un sistema mixto de polígonos desplegables con barras rectas articuladas. Siendo este proceso de diseño los principios básicos para los prismas desplegables y sólidos desplegables con barras rectas articuladas.

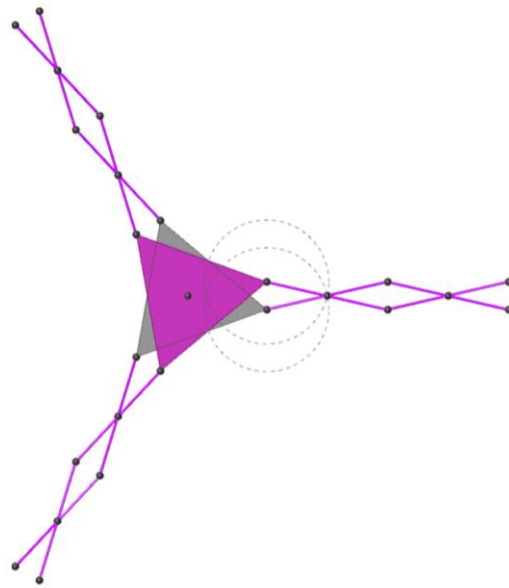


Fig 127. EDBRA. Polígono desplegable triangular con unidades simétricas.

Si tomamos un polígono de base (n) siendo n el número de lados de un polígono regular, y duplicamos el polígono en su centro, tenemos un sistema de placas desplegables si los articulamos en su centro y rotamos en dirección contraria cada placa. Realmente las aristas de cada placa son elementos lineales, que hacen de media unidad simétrica desplegable en cada arista. De este modo podremos tejer o conectar unidades simples desplegables simétricas o asimétricas en los vértices de las placas.

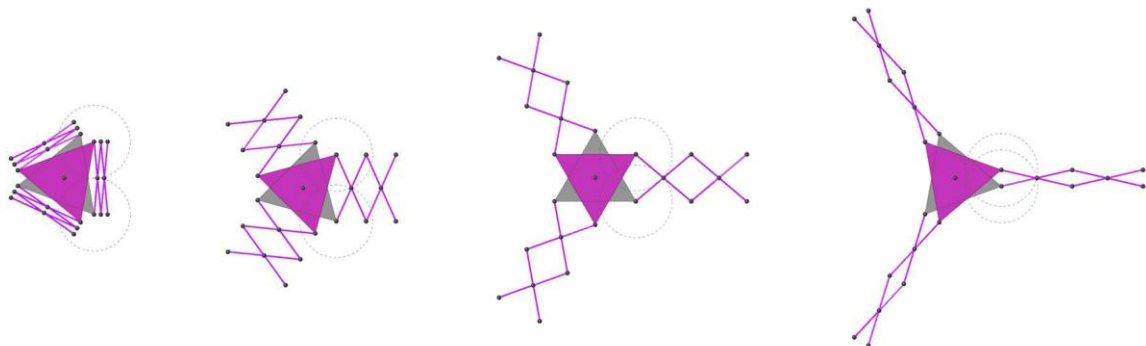


Fig 128. EDBRA. Polígono desplegable triangular con unidades simétricas. Proceso de despliegue.

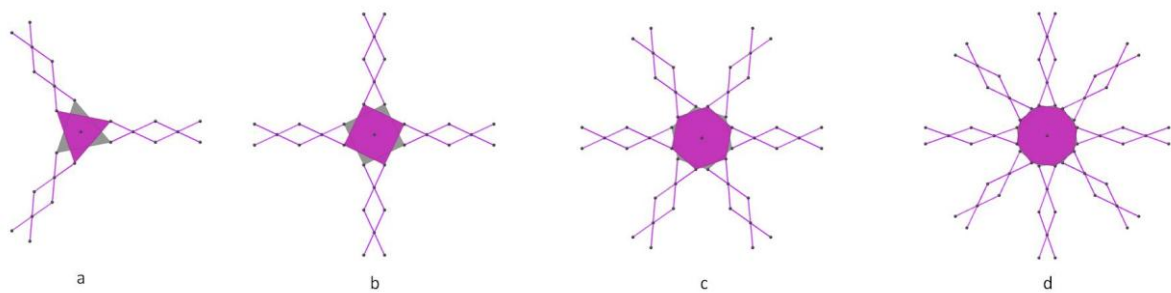


Fig 129. EDBRA. Prismas desplegados con unidades simétricas. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.

Para las unidades simples simétricas y asimétricas, hay que calcular la longitud de las barras con respecto a la longitud de las aristas del polígono si se quiere tener una trayectoria de movimiento hasta su máximo pliegue y despliegue de las unidades simples. Si la longitud de las barras son superior o inferior a la dimensión de las aristas del polígono, habrá una restricción de movimiento.

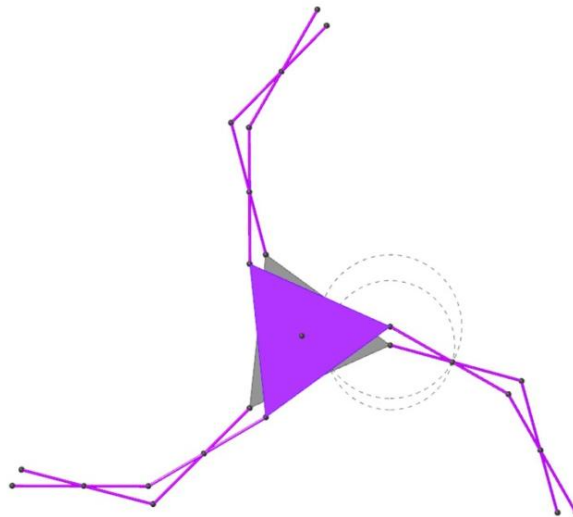


Fig 130. EDBRA. Polígono desplegable triangular con unidades asimétricas.

Los parámetros para la construcción geométrica de las unidades simples es la misma que las vistas en el inicio de este capítulo, solo hay que tomar como centro de los círculos los vértices de las placas de los polígonos. La asimetría está en las unidades simples desplegadas, se podría plantear explorar la asimetría en las placas de los polígonos, lo más probable es que habría que tener control de la asimetría para evitar restricciones de movimiento o incompatibilidades geométricas que bloqueen el sistema desplegable.

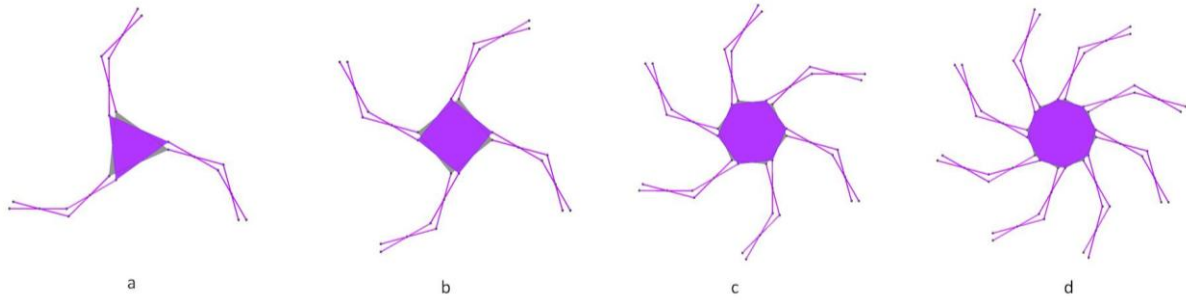


Fig 131. EDBRA. Prismas desplegables con unidades asimétricas. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.

La trayectoria de movimiento de los polígonos desplegables con unidades simétricas es lineal recto, lo cual podría explorarse la conexión con mas polígonos y así tejer una red de polígonos con unidades simples simétricas.

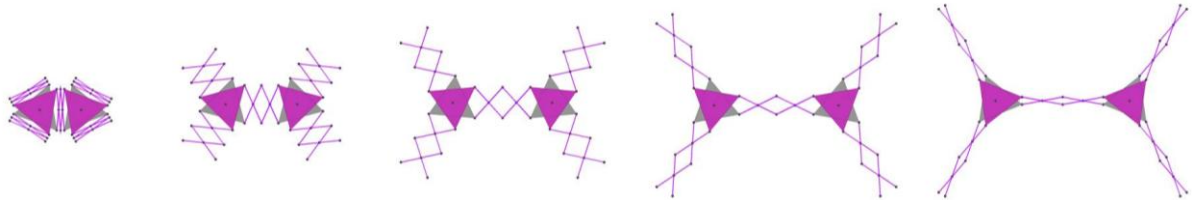


Fig 132. EDBRA. Red de polígonos desplegable triangular con unidades simétricas. Proceso de despliegue.

Los parámetros de tejido para las unidades simples que se han propuesto para los polígonos desplegables están sobre el plano (x, y) pero si cambiamos el eje de conexión de las unidades simples al plano (x, z) o (y, z) podremos construir prismas desplegables. La construcción de prismas desplegables permite explorar nuevas configuraciones geométricas con aplicaciones arquitectónicas. Los prismas también pueden ampliar su distancia entre cada nivel según la repetición de unidades simples simétricas. Para el ejercicio de exploración se definieron dos unidades simples por nivel.

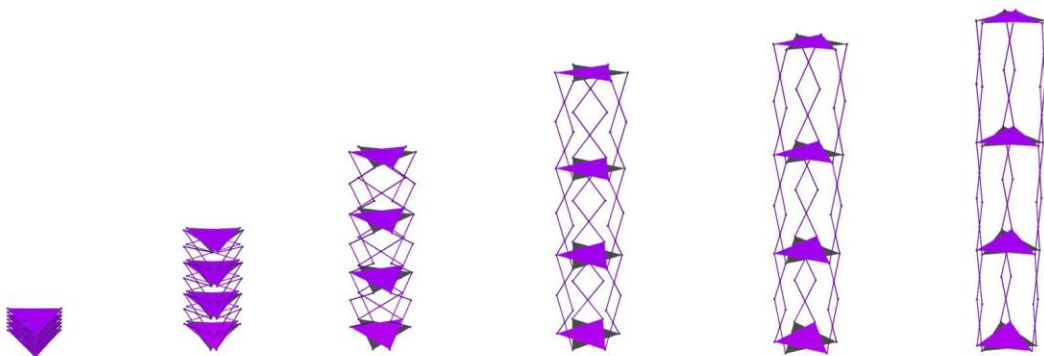


Fig 133. EDBRA. Prisma desplegable triangular con unidades simétricas. Proceso de despliegue.

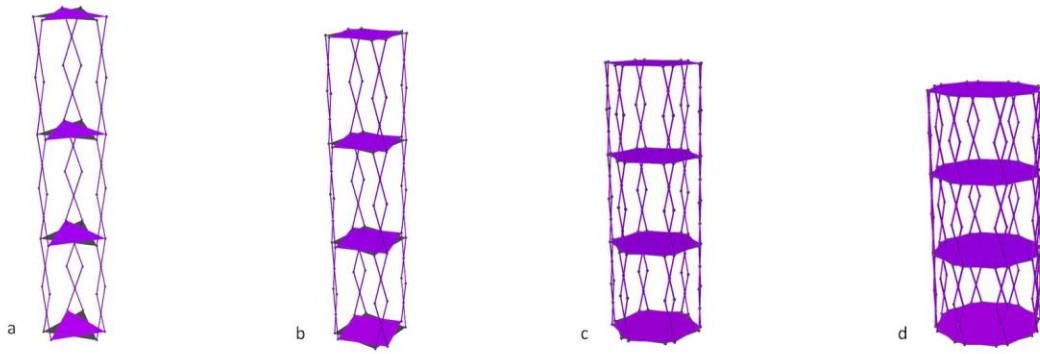


Fig 134. EDBRA. Prismas despletables con unidades simétricas. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.

Como puro ejercicio de exploración geométrica, también es posible diseñar polígonos despletables con niveles de unidades simétricas y brazos con unidades asimétricas. Estas variables dejan abierta la posibilidad de explorar geometrías con prismas despletables para su aplicación arquitectónica. Como ejemplo se tomo un prisma de base triangular para probar su trayectoria de movimiento y geometría de despliegue.

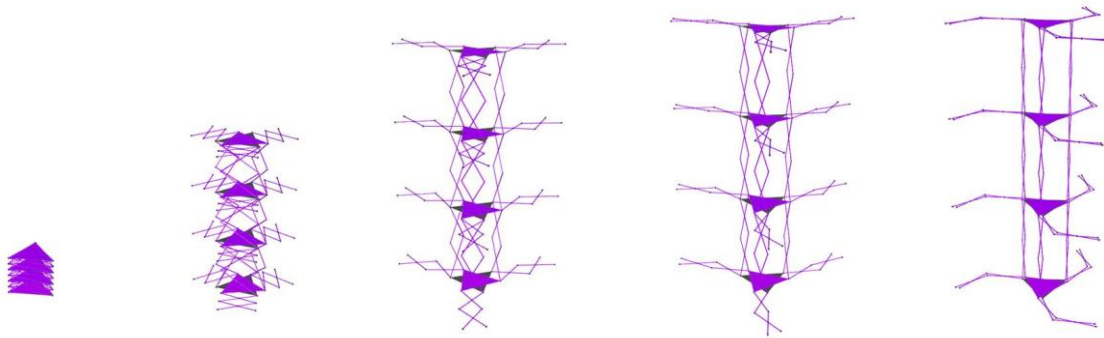


Fig 135. EDBRA. Prisma despletable triangular con unidades simétricas y brazos asimétricos. Proceso de despliegue.

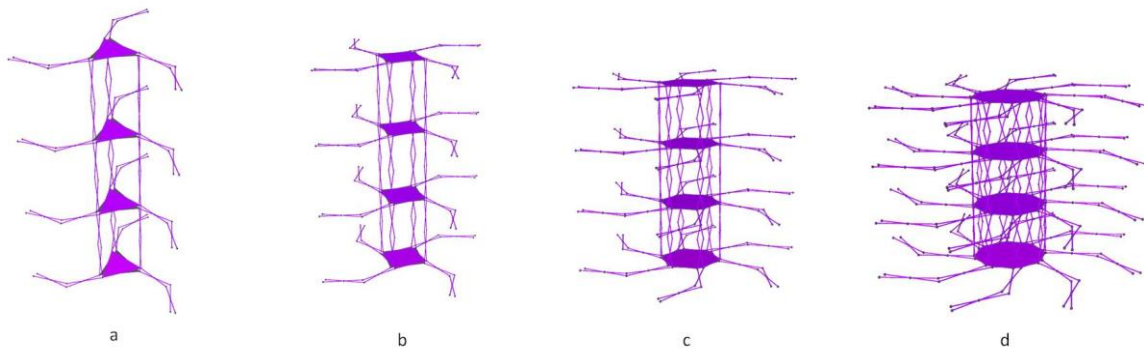


Fig 136. EDBRA. Prismas despletables con unidades simétricas y brazos asimétricos. (a) Prisma triangular. (b) Prisma cuadrado. (c) Prisma hexagonal. (d) Prisma octogonal.

La exploración geométrica de los prismas despleables también es la base para la construcción geométrica y paramétrica de los sólidos despleables con unidades simples simétricas. Los sólidos despleables tiene la particularidad de ser contenedores espaciales, lo que hace de su análisis de movimiento un recorrido interesante de hacer.

Usando el mismo criterio geométrico de los polígonos despleables con unidades simétricas, definimos el sólido y descomponemos la geometría por caras. Luego del centro de cada cara, la desplazamos sobre el eje de la normal para cada superficie a fin de calcular la máxima distancia de recorrido. Esta distancia de recorrido está determinada por la longitud de las aristas del solido regular. Después se duplican las superficies del sólido para que roten y proyectar las unidades simples simétricas de los vértices de cada cara.

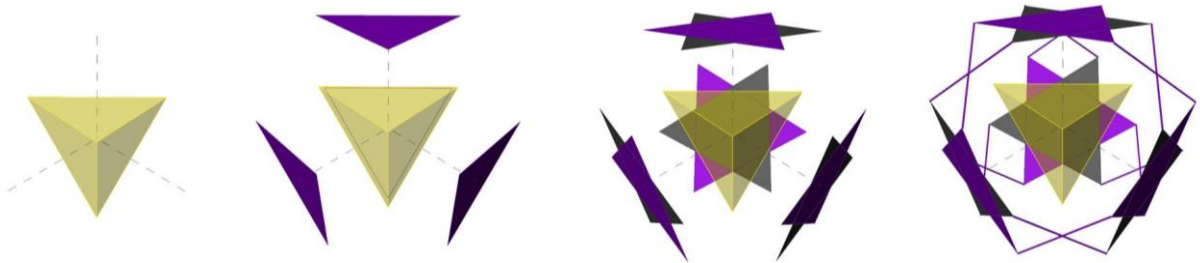


Fig 137. EDBRA. Geometría y parámetros de un sólido despleable con unidades simétricas despleables.

Para que los sólidos despleables tengan una máxima trayectoria de movimiento la longitud de sus unidades simples simétricas deben ser la misma que las aristas del sólido. Este mismo proceso geométrico se puede aplicar a cualquier solido regular.

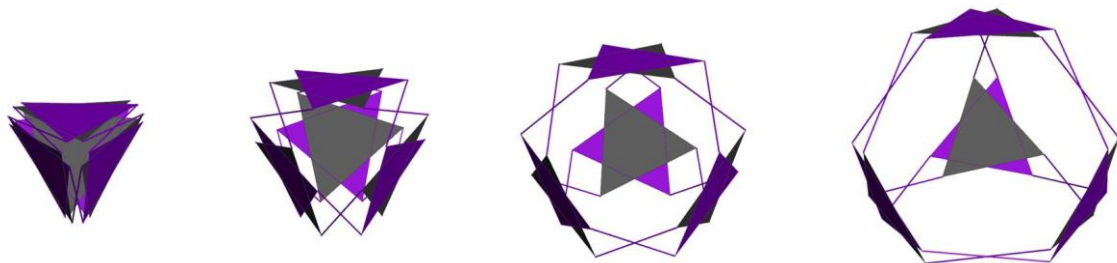


Fig 138. EDBRA. Tetraedro despleable con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.

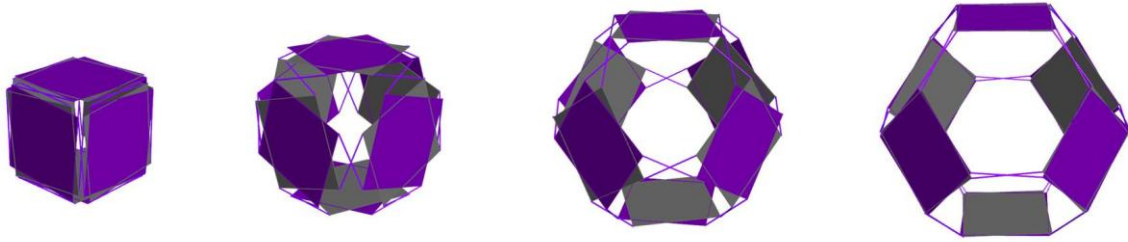


Fig 139. EDBRA. Cubo desplegable con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.

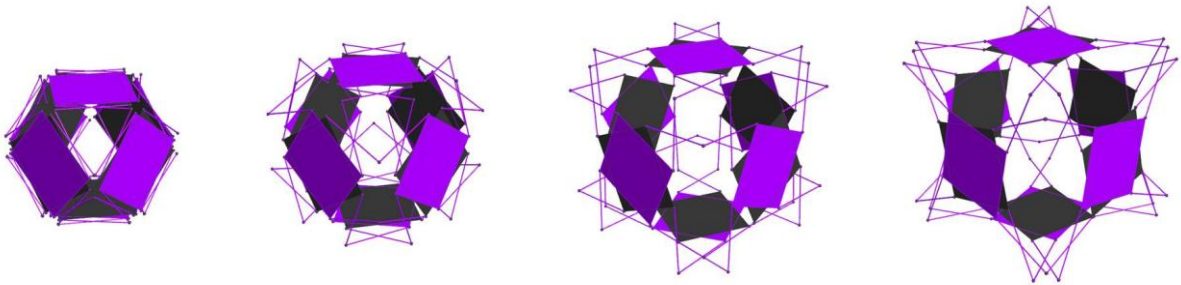


Fig 140. EDBRA. Cuboctaedro desplegable con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.

Las posibilidades de exploración geométrica para los sólidos desplegable pasa por hacer un análisis de los sólidos platónicos, sólidos de Arquímedes, y todas las transformaciones como truncación de sólidos o estalaciones. Además de explorar las agrupaciones entre ellos. Las agrupaciones espaciales de los sólidos desplegable también es otro campo de exploración para posibles aplicaciones arquitectónicas. Durante el desarrollo de esta investigación se exploró la agrupación de dos geometrías básicas. El tetraedro y el cubo.

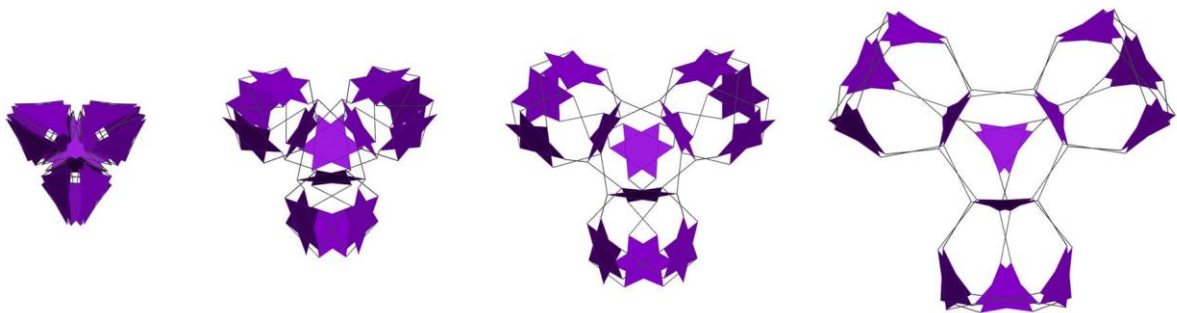


Fig 141. EDBRA. Agrupación de tetraedros desplegable con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.

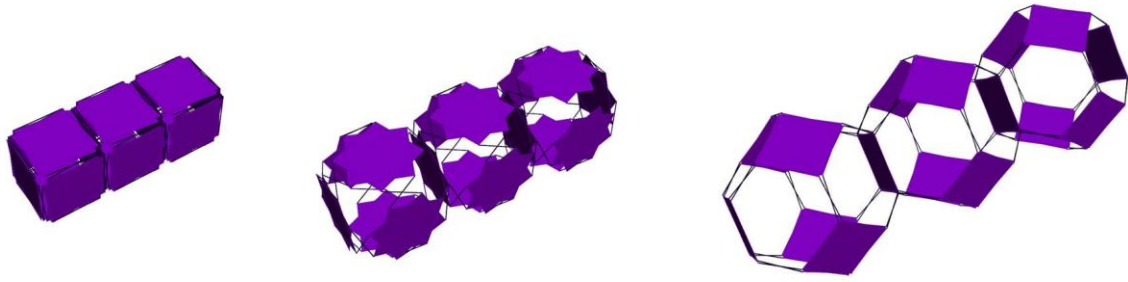


Fig142. EDBRA. Agrupación de cubos desplegables con unidades simples simétricas. Proceso de despliegue.

Clasificación de las EDBRA

Después de hacer la exploración y análisis geométrico de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas, se tienen las bases necesarias para proponer una clasificación de las EDBRA por geometría y trayectoria de movimiento. Clasificación que servirá de base para desarrollar y proponer el control límite de movimiento para las estructuras desplegadas. Según su geometría las clasificamos en lineales rectas y lineales curvas, las primeras al ser proyectadas forman un plano. Las lineales curvas pueden formar tres tipos de superficies, monoclásticas, sinclásticas y anticlásticas. Y por otro lado tenemos sus vectores de movimiento que describimos como axiales, biaxiales y triaxiales. Finalmente un apartado para los prismas y sólidos desplegados, como un camino por explorar para la búsqueda de nuevas geometrías desplegadas.

Si bien esta clasificación pretende abarcar lo máximo posible de las geometrías desplegadas con barras rectas articuladas, es solo un punto de partida para continuar con la búsqueda de nuevos diseños y geometrías. Las desplegadas triaxiales con optimización de malla y las agrupaciones de poliedros desplegados con unidades simples desplegadas son dos caminos a seguir. El propósito de continuar con la exploración de nuevas geometrías es encontrar posibles y potenciales aplicaciones en la arquitectura.

Esta clasificación de las EDBRA pretende dar otra mirada a los sistemas desplegados con la posibilidad de continuar la exploración de agrupaciones más complejas con la ayuda del diseño paramétrico. Por otro lado también quiere dar un panorama general de los sistemas desplegados con barras rectas articuladas y estimular futuras investigaciones enfocadas en la aplicación arquitectónica.

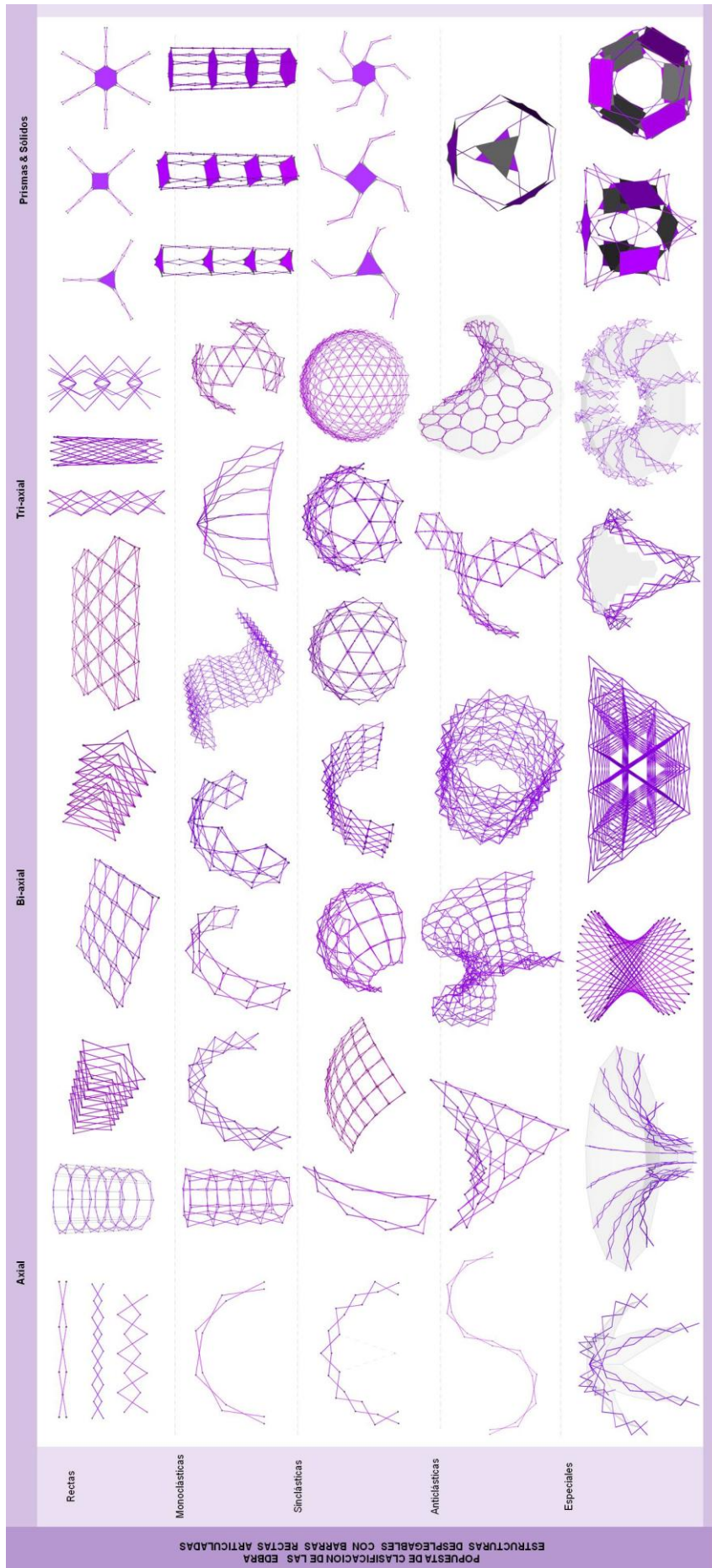


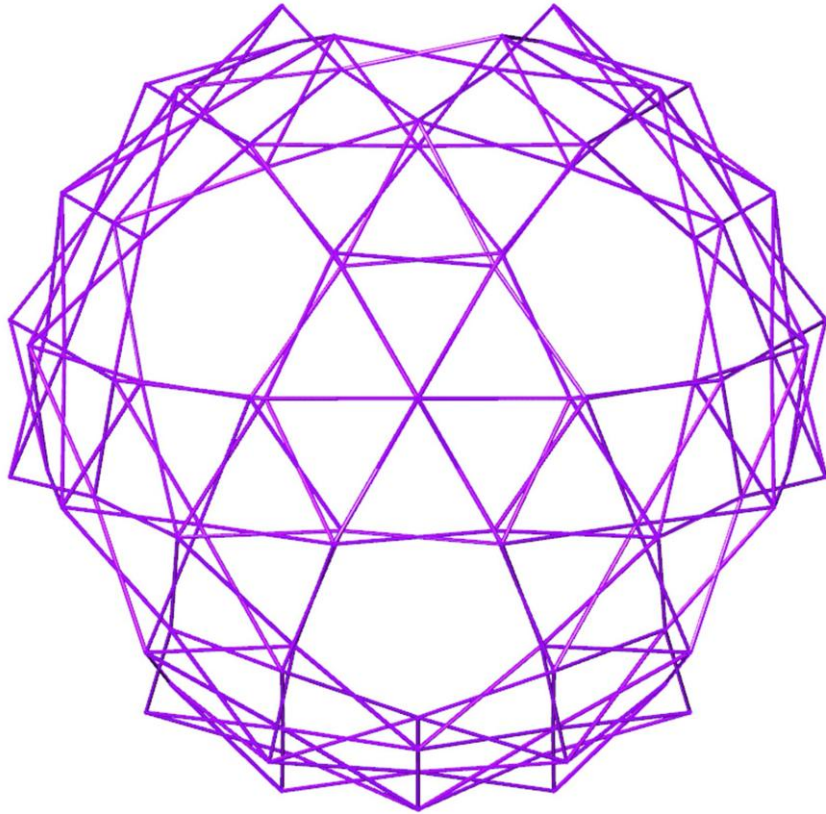
Fig 143. Propuesta de Clasificación de las EDBRA.

Discusión del Diseño Paramétrico de las EDBRA

Hacer el recorrido del diseño paramétrico de las EDBRA, permite descubrir las relaciones geométricas que hay entre sus elementos y las que existen detrás de cada sistema desplegable. Salir de la geometría tradicional (euclidiana) y explorar nuevos caminos fue la estrategia a seguir. Igualmente la complejidad de diseñar movimiento, requiere una base teórica de geometría que fue necesaria explorar y que es el resultado de cada uno de los sistemas desplegables presentados. El uso de un software de diseño paramétrico en este caso en particular Rhinoceros + Grasshopper, facilitó el desarrollo de geometrías desplegables más complejas y variaciones de ellas.

Está claro que el recorrido de diseño paramétrico hecho de las EDBRA en este capítulo, está propenso a ser mejorado. Queriendo sin duda ser un punto de partida analítico de la geometría y búsqueda de la forma de los sistemas desplegables. El avanzar en el diseño de algoritmos más complejos también permitió descubrir incompatibilidades geométricas y bloqueos de movimiento.

A partir de este punto quedan líneas de interés para seguir explorando en el campo del diseño paramétrico de las EDBRA. Una de las de mayor atención por parte del autor es la de parametrizar superficies complejas con doble curvatura usando el método de optimización de malla por polígonos, el cual puede ser de gran ayuda para el caso de las superficies mínimas. También otra línea de interés es la de continuar la exploración de prismas y sólidos desplegables usando planos y barras desplegables.



Capítulo 04

Control de Movimiento Límite y Prototipado de las EDBRA

Los sistemas desplegables con barras rectas articuladas tienen tres estados de posicionamiento. El cerrado o de transporte, que es cuando la estructura está ocupando el menor espacio posible. El abierto o de máximo despliegue que es cuando la estructura está totalmente desplegada y ocupa el mayor espacio posible. Y un último que es el de movimiento, esta posición es la que toma el sistema durante todo el recorrido de pliegue o despliegue, y puede tomar múltiples formas. Pero existe otra posición o estado de posicionamiento del sistema y es el de uso o función.

El estado de uso o función puede estar en la posición de máximo despliegue de la estructura o en algún punto de su trayectoria de movimiento. Y es en este último donde vamos a analizar cómo controlar ese movimiento para lograr el equilibrio del sistema, desde el punto de vista geométrico y teórico.

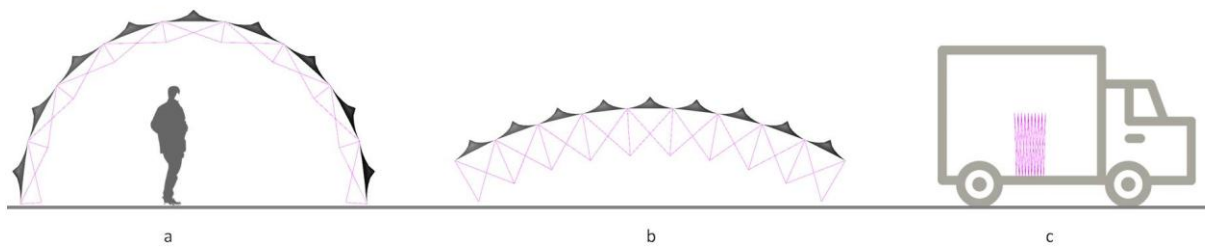


Fig 144. Estados de posicionamiento de las EDBRA.
(a) Estado abierto de uso. (b) Estado de movimiento. (c) Estado cerrado o de transporte

Las estructuras desplegables con barras rectas articuladas son en su mayoría sistemas con un solo grado de libertad, salvo casos especiales con agrupaciones en diferentes niveles o capas. Recordemos que por definición los grados de libertad de una estructura móvil o sistema desplegable se consideran al número de elementos necesarios para detener y controlar el movimiento de la estructura o sistema.

Para desarrollar nuestro análisis consideraremos las EDBRA con un solo grado de libertad. En un sistema desplegable con agrupaciones de unidades simples basta con añadir al sistema un elemento lineal para el bloqueo o freno del conjunto o estructura.

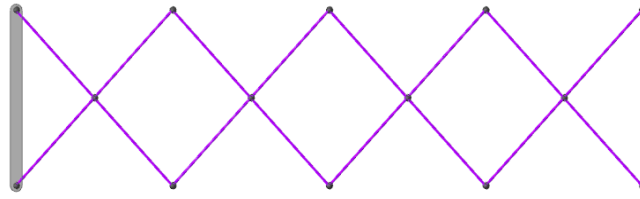


Fig 145. Esquema de agrupación lineal de unidades simples con articulación simétrica con un grado de libertad.

El elemento lineal de bloqueo puede ser rígido o flexible, es decir el movimiento puede ser bloqueado por una barra rígida o por un cable o banda elástica que ejerza una tracción o fuerza contraria al movimiento del sistema, e impida continuar su despliegue. El elemento rígido bloquea el movimiento en ambas direcciones de movimiento, tanto para pliegue como despliegue. En cambio el elemento elástico bloquea el movimiento solo en un sentido, permitiendo plegar o desplegar según sea el caso la estructura con libertad en un sentido, pero con restricción de movimiento en el otro.

En este capítulo se desarrollara una metodología de diseño paramétrico y análisis por tracción de las EDBRA, que busca dimensionar los posibles sistemas de control de movimiento límite del sistema desplegable. Para la comprobación física se elaboraran maquetas y prototipos de trabajo y de estudio con el uso de técnicas de fabricación digital como el corte laser y la impresión 3D.

Método de Control de Movimiento por Tracción

En la explicación teórica y gráfica del control de movimiento límite de un sistema desplegable con barras rectas articuladas se usará el rombo. Esta geometría es la que está inscrita por la unión de dos unidades simples, y la que tiene los dos ejes de movimiento posibles del sistema. Usando herramientas de diseño digital (Rhino + Grasshopper) le aplicaremos *Kangaroo*, motor activo con propiedades físicas para simulaciones. *Kangaroo* es un motor de simulaciones físicas interactivo que busca la optimización y resolución de restricciones. (www.foodrhino.com/app/kangaroo-physics) 2019.

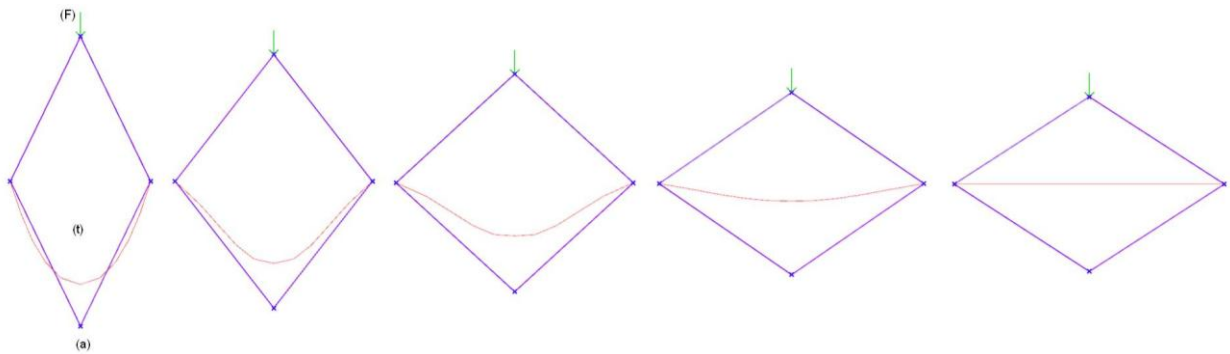


Fig 146. Esquema de control límite de movimiento por tracción. *Grasshopper + Kangaroo*.

Antes de aplicar comportamiento físico a un sistema desplegable, definimos la relajación y tracción para una línea, que en nuestro caso actuará de cable ejerciendo tracción en el sistema para bloquear el movimiento. Para el ejemplo usaremos una línea recta definida por dos puntos. Aplicaremos una fuerza (F) y una tracción (t) para finalmente incorporar la geometría y las variables a *Kangaroo*. El resultado final es una línea con una curvatura definida por la relajación y tracción asignada.

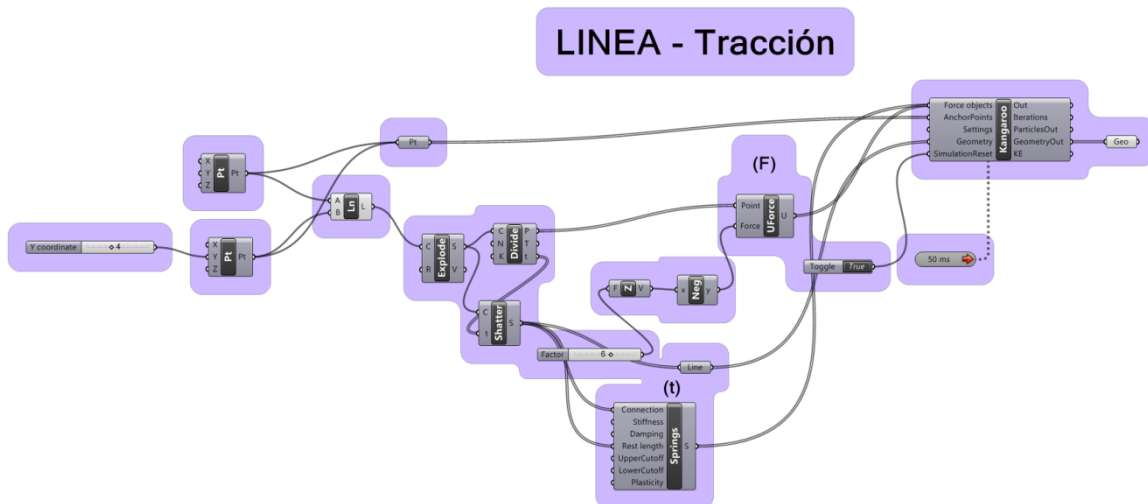


Fig 147. Algoritmo (Grasshopper + Kangaroo) para esquema por tracción de una línea.

Primero tomamos un rombo y de definimos todos sus elementos geométricos, las cuatro líneas y los 4 vértices o puntos de articulación. También definimos como punto de anclaje (a), y aplicamos una fuerza (F) y una tracción (t) a una cable que definimos previamente. El algoritmo nos permite controlar la fuerza aplicada y la tracción del cable para controlar el máximo punto de apertura deseada.

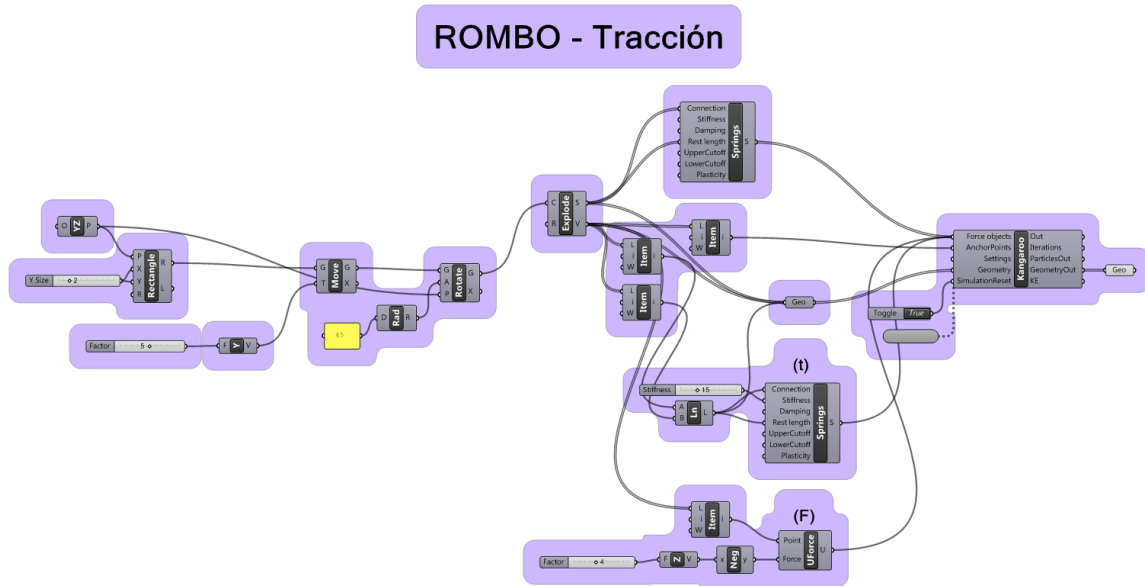


Fig 148. Algoritmo (Grasshopper + Kangaroo) para esquema de control limite de movimiento por tracción de un rombo desplegable.

Con este algoritmo podemos aplicarlo a la geometría de las EDBRA y tener un control límite teórico y geométrico de los sistemas desplegables con barras rectas, con el propósito de controlar el movimiento de las estructuras desplegables y poder tener una herramienta digital para calcular las dimensiones y longitudes de sus elementos y la posición óptima de uso.

El algoritmo permite controlar el desplazamiento máximo teórico del sistema según la tracción y relajación aplicada al cable. En el ejemplo anterior tenemos dos ejes de movimiento para introducir el algoritmo, dependiendo de donde tengamos la fuerza aplicada. Puede ser en el eje (x) como en el ejemplo o en el eje (y) si la fuerza aplicada esta en el eje (y).

Una vez comprobado el algoritmo para sistemas lineales rectos, se hace la comprobación para sistemas lineales curvos. Para este caso definimos una agrupación de unidades simples asimétricas y la cantidad de repeticiones. El objetivo de tener un control límite de movimiento es determinar la posición de uso adecuada y óptima para el sistema desplegable. Para el ejemplo agrupamos seis unidades simples asimétricas y definimos una base o límite con el cual se quiere que el sistema detenga el movimiento. También se definen una fuerza (F) y una tracción (t) para frenar el sistema. El objetivo es lograr que los cuatro puntos extremos de las barras sean coplanares al plano de apoyo, para dar el máximo de equilibrio al sistema desplegable.

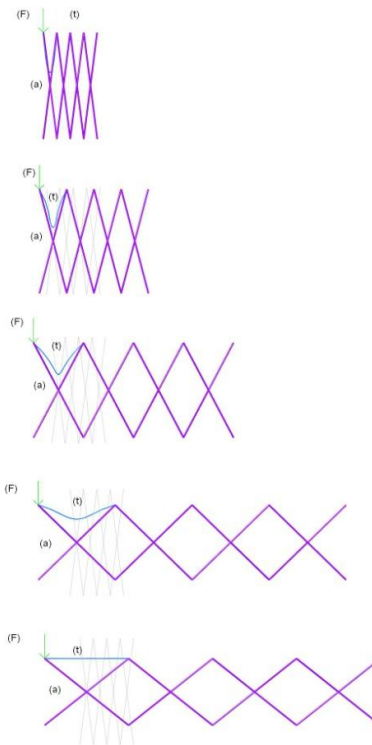


Fig 149. Aplicación de algoritmo para el control límite de movimiento de un sistema desplegable con unidades simétricas axiales. *Grasshopper + Kangaroo*.

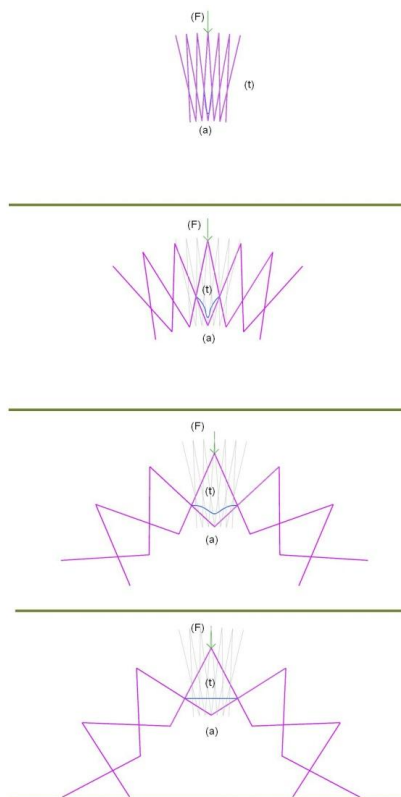


Fig 150. Aplicación de algoritmo para el control límite de movimiento de un sistema desplegable con unidades asimétricas axiales y plano de referencia. *Grasshopper + Kangaroo*.

Usar un plano de referencia para hacer el control límite de movimiento de forma teórica tiene varias utilidades. Por un lado se puede calcular la cantidad de repeticiones de unidades simples o módulos, y el ángulo de incidencia en su asimetría. Y por otro lado se puede dimensionar la longitud de los elementos rígidos o barras, y con esto diseñar las articulaciones y sistemas de control de movimiento en el modelo físico o prototipo. También se puede calcular la distancia de recorrido entre dos puntos extremos de cada unidad o módulo a fin de dimensionar los elementos de bloqueo o control de movimiento.

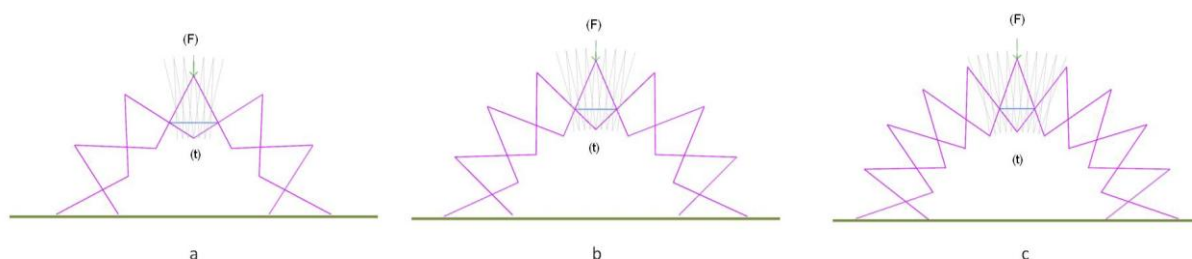


Fig 151. Esquema de control límite de movimiento por Tracción. *Grasshopper + Kangaroo*.
(a) 6 unidades asimétricas. (b) 8 unidades asimétricas (c) 10 unidades asimétricas.

	Unidades Asimétricas	Fuerza (F)	Tracción (t)	Rigidez (s)	Asimetría	Angulo de uso	Distancia (cable)
a	6	10	36.500	1110	0,6	30°	2,386
b	8	10	30.500	1110	0,6	22,8°	2,038
c	10	10	24.600	1110	0,6	17,9°	1,71

Fig 152. Datos del esquema de control límite de movimiento por tracción. (a) 6 unidades asimétricas. (b) 8 unidades asimétricas (c) 10 unidades asimétricas.

De esta manera podemos aplicar un control de movimiento teórico por tracción a cualquier sistema desplegable y definir variables que nos permitan tener un diseño muy aproximado al comportamiento de un modelo físico. Esto facilita en términos de tiempo hacer cuantas pruebas sean necesarias y definir una geometría ideal antes de invertir tiempo y costos en un modelo físico, sin que esto no sea necesario siempre para las estructuras desplegables. Pero si es una estrategia que nos ayuda a tener mayor aproximación de la estructura desplegable.

La aplicación de elementos a tracción a las EDBRA también sirve para definir la geometría teórica del sistema desplegable y tener las longitudes aproximadas para diseñar los elementos adicionales al sistema que permitan bloquear o limitar el movimiento. Para tal caso cuando la geometría del sistema desplegable lo requiera. Podemos encontrarnos con casos donde las EDBRA no requieran de la aplicación de un control de movimiento por tracción, como en los sistemas desplegables cerrados. Ahora aplicaremos el control de movimiento por tracción a un módulo triaxial desplegable para ver su comportamiento en los

tres ejes de trayectoria de movimiento. El módulo triaxial hexagonal está formado por seis unidades asimétricas simples con trayectoria lineal curva en la misma dirección o superficie sinclástica.

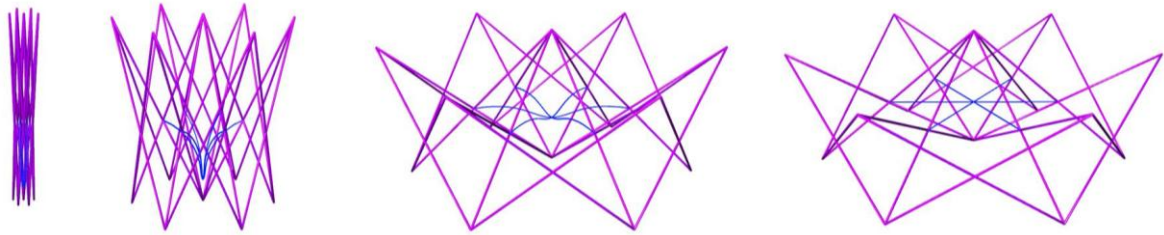


Fig 153. Control limite de movimiento por tracción. Módulo triaxial hexagonal asimétrico.

Tomaremos un arco desplegable triaxial con módulos hexagonales y aplicaremos a la geometría el algoritmo de control de movimiento por tracción. El arco está formado por seis módulos hexagonales asimétricos y aplicaremos una fuerza (F) con una tracción del cable (t) que permita frenar la estructura logrando que las caras de los módulos hexagonales de sus extremos sean coplanares con la base de apoyo, garantizando la estabilidad formal de la estructura.

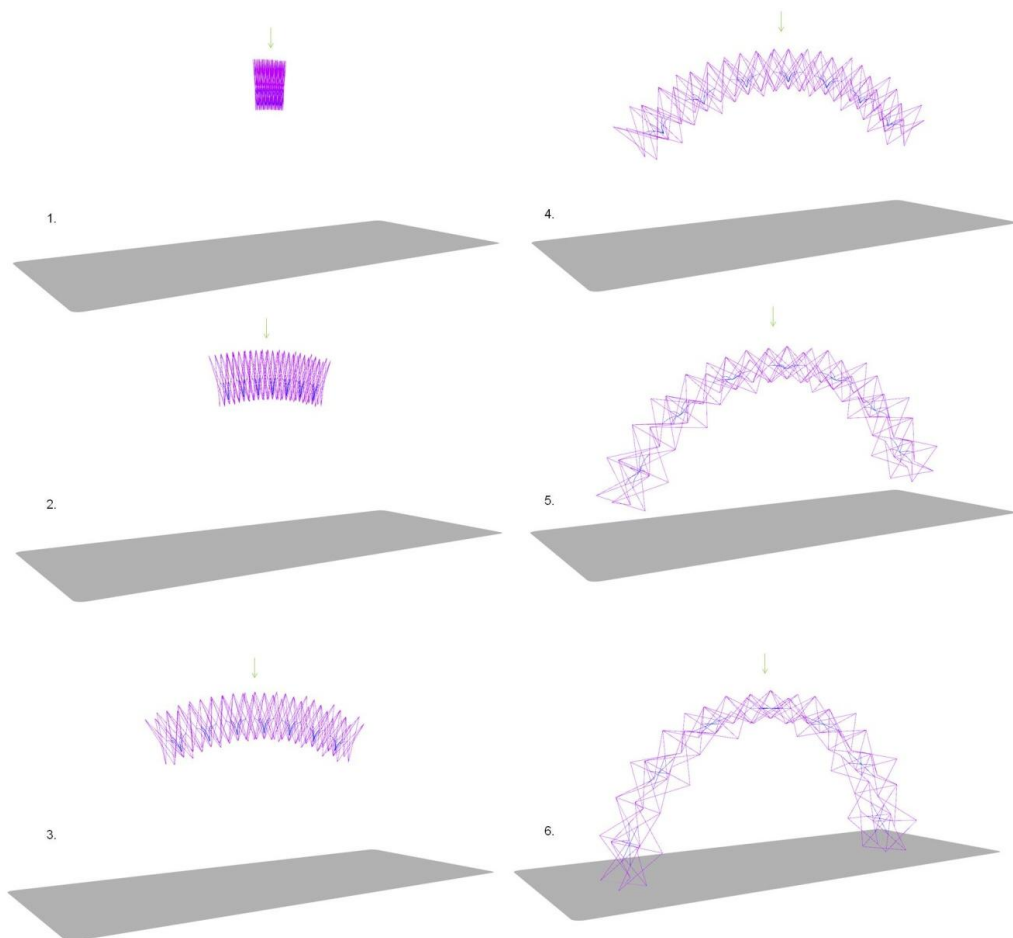


Fig 154. Aplicación de algoritmo para el control limite de movimiento por tracción de un arco desplegable con módulos triaxiales hexagonales y plano de referencia.

Estabilidad y Equilibrio de las EDBRA

Los sistemas desplegados con barras rectas articuladas son estructuras que podemos describir como estructuras nerviosas. Entre más compleja sea la geometría y más elementos rígidos o barras compongan el sistema, la estructura tendrá más articulaciones. Son las articulaciones la que hacen de los sistemas desplegados estructuras nerviosas, es decir que durante su despliegue o movimiento el sistema es inestable y sus múltiples articulaciones dificultan el control de su movimiento.

Algunas geometrías hacen que el sistema desplegable cuando llega a su estado de uso o máximo despliegue, la estructura adquiera equilibrio y estabilidad, llegando a ser auto portante. En estos casos la estructura desplegable no requiere de elementos adicionales al sistema para su estabilidad y equilibrio. Mientras que existen otras geometrías que al llegar a su estado de uso el sistema no se encuentra en equilibrio y necesiten de elementos adicionales a la estructura como barras, cables o anclajes para estar en equilibrio. Estas estructuras no son auto portantes en sí mismas en su estado de uso.

A las estructuras desplegadas que en su estado de uso sean auto portante y no requieran elementos adicionales al sistema, los llamaremos sistemas desplegados cerrados. Y a las estructuras desplegadas que en su estado de uso no estén en equilibrio y requieran elementos adicionales para ser estables las llamaremos sistemas desplegados abiertos.

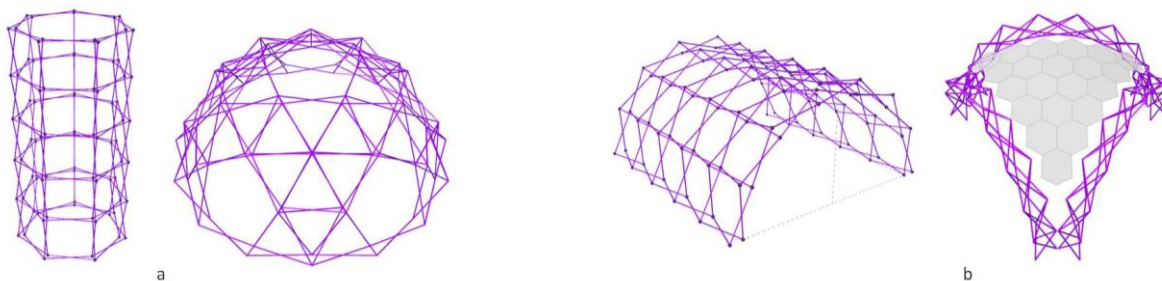


Fig 155. (a) Sistemas desplegados cerrados. (b) Sistemas desplegados abiertos.

Sistemas Desplegados Cerrados

Los sistemas desplegados cerrados son aquellos que están formados por agrupaciones de unidades simétricas y/o asimétricas y que en su estado de uso alcanzan su máximo despliegue garantizando la estabilidad y equilibrio de la estructura, sin elementos adicionales al sistema como barras o cables.

La geometría de los sistemas desplegados cerrados es siempre radial y cierra un circuito. Es el caso de los domos geodésicos desplegados. Su agrupación radial por módulos hace que su construcción geométrica esta trazada por anillos o niveles que cierran un circuito. Además los domos desplegados tienen una

flexión activa durante su proceso de despliegue que sirve como freno cuando la estructura está abierto o en su estado de uso. Recordemos que esta flexión activa es causada por esa rotura geométrica que se presenta en la trayectoria de movimiento teórico de los domos geodésicos en el diseño paramétrico hecho por computadora. En el modelo físico esta rotura no se presenta, lo que tenemos es la flexión activa del sistema desplegable, deformando las barras durante el movimiento.



Fig 156. EDBRA. Sistema desplegable cerrado. Domo desplegable con barras rectas articuladas. Maqueta de trabajo. Proceso de despliegue.

Como vemos en la maqueta, las barras no se separan nunca del sistema ni hay rotura durante el proceso de despliegue. Pero si es necesario durante la etapa intermedia de movimiento ejercer una fuerza adicional para superar la flexión activa de las barras y llegar a la posición final o de uso de la estructura.

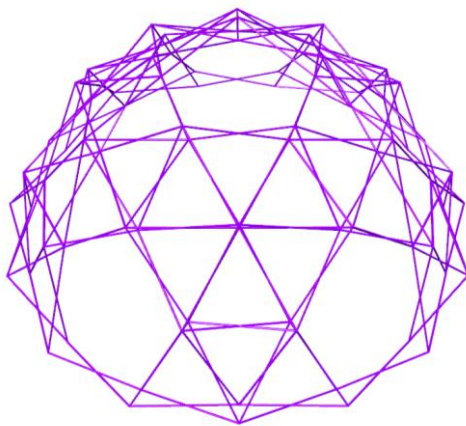


Fig 157. Domo desplegable con barras rectas articuladas. Diseño paramétrico y Maqueta presentada en el Maker Faire Barcelona 2017.

Para el pliegue o cerrado del domo desplegable también es necesario aplicar una fuerza adicional para superar la fuerza de flexión activa de las barras y cerrar el sistema. Las barras regresan a su estado de reposo cuando el sistema esta plegado. Los domos desplegables son estables cuando su geometría es completa, si usamos una sección o parte de la estructura, pierde su estabilidad y equilibrio. Por lo que sería necesario elementos adicionales para lograr el equilibrio. Sería un sistema desplegable abierto.

Hablando de estabilidad formal, en las EDBRA con sistemas desplegados cerrados al aplicar una fuerza en su estado o posición de uso esta podrá deformarse pero siempre será estable y no cambiara su geometría.

Otro tipo de sistema desplegable cerrado son los que tienen una geometría monocástica o de una sola curvatura. Para estos casos es necesario que el máximo despliegue del sistema complete un giro de 360° . Quiere decir que los puntos extremos de cada unidad simple asimétrica deben de estar en contacto. La estructura debe de cerrar el circuito o geometría. Si esta condición no se cumple el sistema será desplegable abierto. Los ejemplos más claros de sistemas desplegables cerrados monocásticos son los que inscriben una geometría dentro de un cilindro.

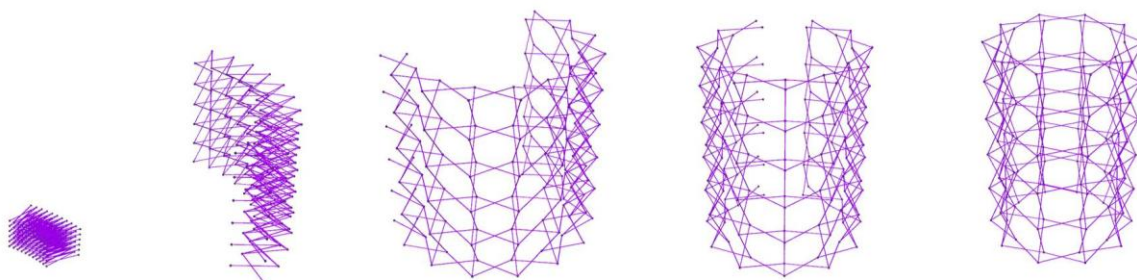


Fig 158. EDBRA. Sistema desplegable cerrado. Cilindro desplegable. Diseño paramétrico.

Recordemos que los sistemas desplegables monocásticos cerrados pueden ser con trayectoria de movimiento en un solo eje o en dos. En la figura se muestran los dos tipos de agrupaciones. Los sistemas desplegables cerrados con formas cilíndricas presentan una estabilidad formal óptima y una rigidez importante, ideal para su uso como agrupación de sistemas desplegables compuestos, como lo es el arco desplegable. Siempre pensando en una aplicación arquitectónica.

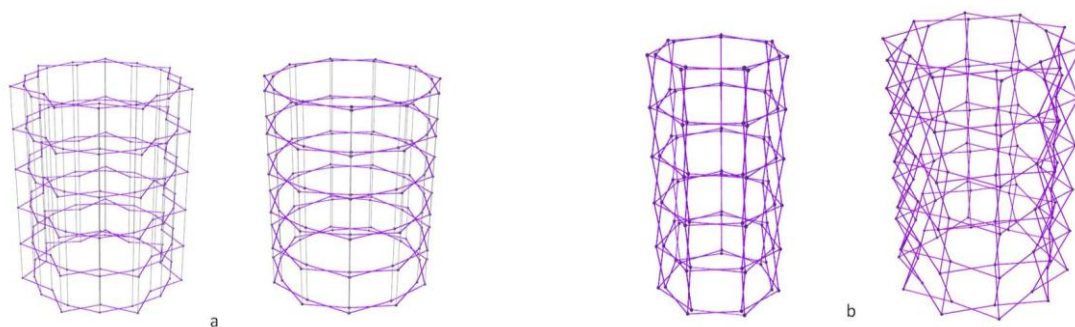


Fig 159. EDBRA. Sistema desplegable cerrado. (a) Con un eje de trayectoria de movimiento. (b) Con dos ejes de trayectoria de movimiento.

Sistemas Desplegables Abiertos

Los sistemas desplegados abiertos son aquellos que están formados por agrupaciones de unidades simétricas y/o asimétricas y que en su estado de uso no alcanzan su máximo despliegue, sin garantizar la estabilidad y equilibrio de la estructura, por tanto es necesario el uso de elementos adicionales al sistema como barras o cables para estabilizarlo.

La geometría de los sistemas desplegados abiertos puede ser lineal o en cualquier tipo de superficie; monocástica, sinclástica y anticlástica. Su inestabilidad está marcada por su posición final de uso. Pueden existir dos tipos de posiciones finales, la primera que la estructura este en su máximo despliegue y aun así no tenga la estabilidad necesaria y regrese su movimiento o pliegue por su propio peso. La segunda es que la posición de uso del sistema desplegable este en algún punto de la trayectoria de movimiento antes de alcanzar su máximo despliegue posible. En este caso el sistema puede continuar su trayectoria o despliegue o regresar su movimiento y plegarse por su peso propio.

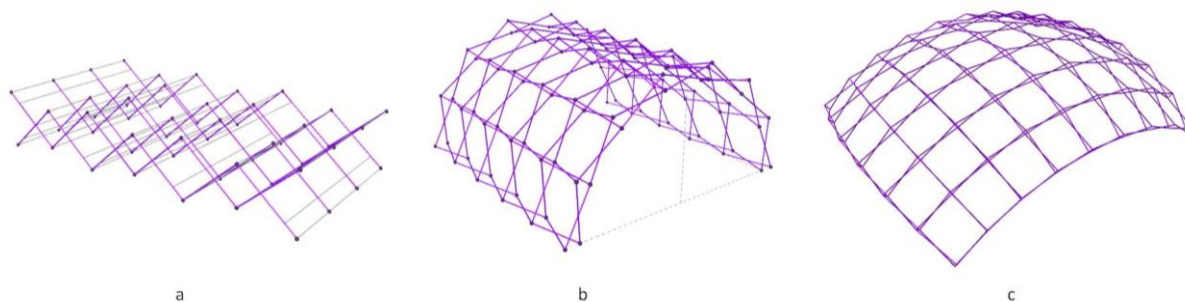


Fig 160. EDBRA. Sistemas desplegados abiertos. Posición de uso de las EDBRA. (a) Sistema desplegable plano. (b) Sistema desplegable monocástico. (c) Sistema desplegable sinclástico.

Para los ejemplos mencionados en la Fig. 160, todas están en su posición de uso y si analizamos su estabilidad formal vemos como la estructura en cada caso necesita un elemento adicional que bloquee el movimiento o lo restrinja. En el primer caso bastaría con un elemento vertical rígido, una barra; o uno horizontal a tracción como un cable. Los elementos adicionales al sistema garantizarían la estabilidad en su posición de uso.

Para el segundo y tercer caso, no solo necesitamos bloquear o frenar el movimiento, sino que también será necesario usar como mínimo 4 puntos extremos de anclaje para mantener la geometría en forma de bóveda y garantice su estabilidad. Hay que mencionar que los sistemas desplegados requieren de coacciones con su entorno de uso, como las bases donde se apoyan. Solo en el caso que la estructura se use como un elemento colgante de un punto central estará en equilibrio sin necesidad de elementos adicionales. El peso propio garantiza la geometría y estabilidad.

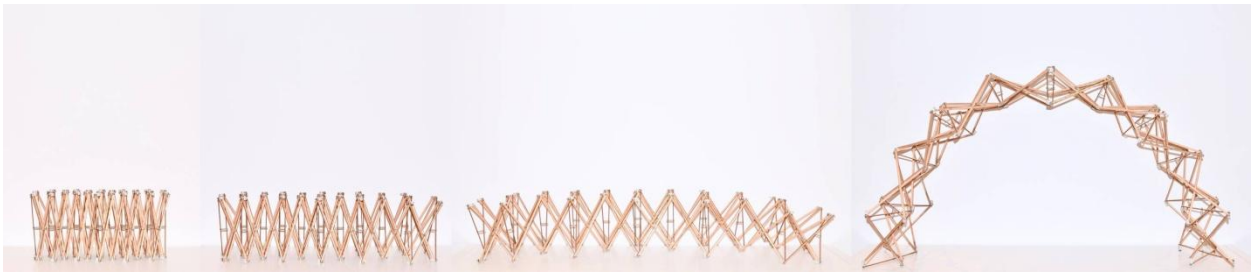


Fig 161. Arco hexagonal desplegable con barras rectas articuladas.
Maqueta presentada en el Maker Faire Barcelona 2017.

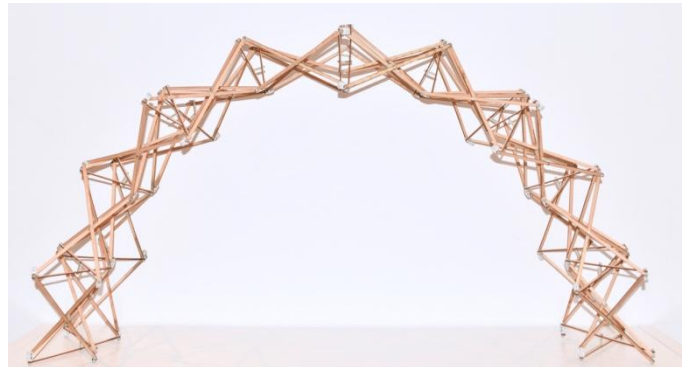
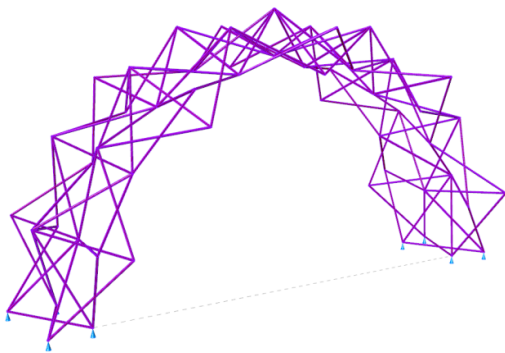


Fig 162. Arco hexagonal desplegable con barras rectas articuladas. Diseño paramétrico y
maqueta presentada en el Maker Faire Barcelona 2017.

Maquetas de trabajo y modelos físicos

Después de hacer un análisis de movimiento geométrico y digital de las EDBRA y de probar agrupaciones simples, módulos y sistemas desplegables complejos con el método de control de movimiento por relajación dinámica y tracción, el siguiente paso es la comprobación física con modelos a escala. Hay que tener en cuenta que los análisis de movimiento geométrico están hechos con algoritmos generativos o códigos en *Grasshopper 3D* y por tanto son vectoriales. Los algoritmos sirven para analizar el movimiento geométrico y sus posibles restricciones o bloqueos. Pero es necesario el uso de maquetas a escala para comprobar la geometría, el movimiento, y los límites o restricciones.

En el diseño paramétrico de las EDBRA la articulación de las unidades simples comparten el mismo eje que los elementos rectos o barras. Igualmente pasa con las uniones de los extremos de cada barra, donde la articulación de dos o más unidades simples se conecta en un punto, y comparten el mismo eje de movimiento. Por tanto el diseño paramétrico de las EDBRA en esta investigación es vectorial.

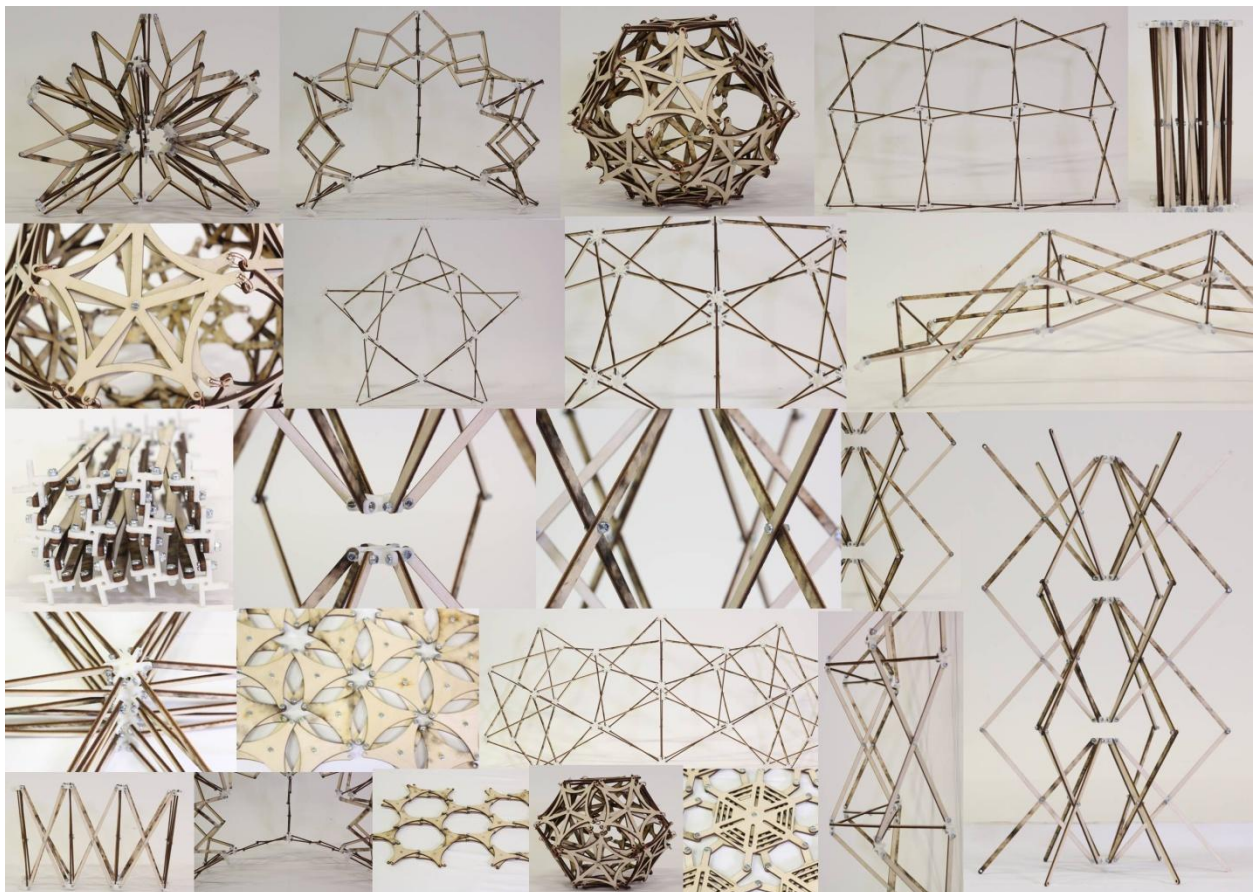


Fig 163. Maquetas desarrolladas por los estudiantes del Máster en Arquitectura de la Universidad Nottingham Trent. UK. En el taller sobre estructura desplegables impartidos en los cursos 2018 y 2019.

Lo anterior quiere decir que al construir un modelo a escala o maqueta de un sistema desplegable debemos tener en cuenta el espacio y volumen que ocupan las uniones entre barras de cada unidad simple, con el fin de conservar el eje de movimiento. También ocurre con los nudos o articulaciones entre unidades simples. Hay que diseñar en proporcionalidad con las barras, las uniones de los extremos de las barras que conectan dos, tres o más unidades simples. De igual forma que en la articulación central de las unidades simples, las articulaciones de los extremos deben de conservar los ejes de movimiento entre las unidades simples que conecta.

La construcción de maquetas de trabajo es fundamental para la comprobación de movimiento de los diseños paramétricos por computadora, así como del análisis de movimiento y sus posibles restricciones según la configuración geométrica y el diseño físico de las articulaciones. En el modelo físico también podemos observar las posibles deformaciones de las barras y sus bloqueos. La comprobación permanente entre el modelo físico y el digital son el camino para el desarrollo de prototipos a escala humana en las estructuras desplegables.

En esta investigación se usaron dos tipos de maquetas y modelos a escala. Un primer tipo de maquetas que son las de trabajo y con las cuales se exploraban diferentes uniones y articulaciones de bajo costo y barras de madera. La idea era hacer comprobaciones de movimiento y resolver con materiales de fácil acceso las complejas articulaciones. También explorar las posibles configuraciones de módulos y sus agrupaciones en los 3 ejes de movimiento.

Muchas de las maquetas de trabajo fueron elaboradas en colaboración con los estudiantes y participantes de los talleres sobre estructuras desplegables impartidos por el autor. Talleres realizados por invitaciones de las escuelas de arquitectura en España, Reino Unido, Turquía, Colombia y Monterrey. Como parte de las prácticas del taller los estudiantes exploraban posibles agrupaciones y geometrías con previa plantilla de instrucciones elaboradas por el autor.



Fig 164. Taller sobre estructuras desplegables en la Fundación Eric Miralles, Barcelona. 2017
A los estudiantes de la Universidad Javeriana de Colombia del programa de estudios internacionales PEI.

Materiales y detalles constructivos

Para las maquetas de trabajo se exploraron múltiples opciones especialmente con materiales de fácil acceso. La idea era hacer comprobaciones de agrupación por módulos y de movimiento, y compararlos con los modelos paramétricos hechos por computadora. El modelo físico presenta restricciones de movimiento que el modelo vectorial paramétrico no define.



Fig 165. Maquetas flexibles. Exploración de agrupaciones y movimiento.

Como primera exploración de modelos físicos, se usaron barras de madera (pinchos de cocina), bandas elásticas para las articulaciones de las unidades simples, y tubos de pvc flexible (recubrimiento de cableado eléctrico) para las articulaciones o nudos compuestos. Esta primera aproximación con materiales blandos y flexibles permitió establecer el patrón de tejido y agrupación de los módulos biaxiales y triaxiales. También se identificaron restricciones de movimiento máximo, limitados por el tipo de articulación compuesta usada para las maquetas.

Como segundo nivel de maquetas se usaron materiales más rígidos, que podían ser mecanizados manualmente para dar mayor precisión a los puntos de articulación y uniones compuestas. Para las barras se usaron listones de cedro de 7x3x25mm, con articulaciones simples de tornillos pasadores M3 y delatadores plásticos para las unidades simples. Y anillos con tubos de pvc de 16mm de diámetro y 7mm de alto para las articulaciones compuestas.



Fig 166. Maquetas rígidas. Exploración de agrupaciones y movimiento.

El módulo hexagonal con unidades simples asimétricas presenta una restricción de movimiento máximo, al usar las unidades simples perimetrales. Su limitación para el máximo despliegue está dada por la distancia de las barras y por el tipo de articulación compuesta. En definitiva esto puede ser usado como una ventaja para el bloqueo de movimiento máximo, y usar las articulaciones compuestas como elementos de control máximo de movimiento.

Por otro lado se podría plantear la misma estrategia para la articulación de las unidades simples. Es decir que no solo se use un pasador simple para articular el par de barras, sino que este diseñado de tal manera que bloquee el máximo despliegue en su posición de uso.



Fig 167. Maquetas rígidas. Módulo hexagonal asimétrico.

Las maquetas rígidas permitieron analizar los ejes de movimiento y los patrones de unión que deben de conservar cada extremo de barra con las articulaciones compuestas para que el módulo y sus agrupaciones conserven un movimiento fluido. Para las agrupaciones lineales o axiales, los módulos logran su máximo recorrido de movimiento tanto en abierto como en estado cerrado. En el caso de las agrupaciones asimétricas y con curvatura en su eje de movimiento la maqueta presenta ligeras deformaciones y tensiones en su estado máximo de despliegue. Esto indica que el movimiento del sistema está limitado por la distancia máxima de las barras.



Fig 168. Maquetas rígidas. Agrupaciones asimétricas módulo hexagonal.

El uso de maquetas de trabajo con materiales domésticos sirvió para explorar los diferentes módulos desplegables. Y definir el uso del modelado mecánico 3d con el fin de diseñar una unión estándar para los sistemas desplegables con barras rectas articuladas.

Modelado mecánico 3d

El modelado mecánico 3d se hace con el fin de definir la geometría y dimensionamiento de las uniones articuladas compuestas. El objetivo es diseñar una unión estándar para los sistemas desplegados biaxiales y triaxiales, comprobando el movimiento para los módulos simples de base triangular, cuadrada y hexagonal. La unión articulada compuesta debe permitir el movimiento fluido de los módulos, conservando los ejes de movimiento de cada barra.

Para el diseño de la unión articulada compuesta se usó *Solidworks*, programa de diseño mecánico que permite hacer el modelado 3d con ensamblajes de piezas y estudios de movimiento. También permite agregar propiedades de materiales a las piezas y crear análisis estáticos para la comprobación de tensiones y deformaciones.

La idea es diseñar una unión articulada estándar para los módulos desplegados de base triangular, cuadrada y hexagonal. Comprobar su movimiento mecánico y hacer para cada uno un análisis estático simple. Con estos resultados se quiere dar el siguiente paso en la comprobación física de modelos, construyendo prototipos a escala con fabricación digital. Este nivel de maquetas nos dará mayor precisión para la construcción de prototipos.

Unión articulada compuesta

La construcción de maquetas de trabajo y el análisis de movimiento, dio las pautas necesarias para el diseño de un tipo de unión estándar. Es fundamental para la construcción de sistemas desplegados articulados conservar los ejes de movimiento. La construcción física de un módulo EDBRA debe de conservar los ejes de movimiento en las tres direcciones de agrupación x,y,z . Esto dependerá que la estructura tenga un movimiento fluido y sin bloqueos.

Por otra parte también se necesita tener un patrón de tejido entre las unidades simples para formar el módulo, y mantener el mismo sentido de giro en los módulos agrupados. Manteniendo estas reglas geométricas se diseñó una unión estándar para sistemas biaxiales, y otra para sistemas triaxiales. Para ambas uniones los brazos de articulación para las barras están desplazados a un costado del eje radial central de la unión. De esta manera al articular las barras rígidas y manteniendo el mismo sentido de giro en el tejido del módulo, conservamos los ejes de movimiento en todos sus elementos.

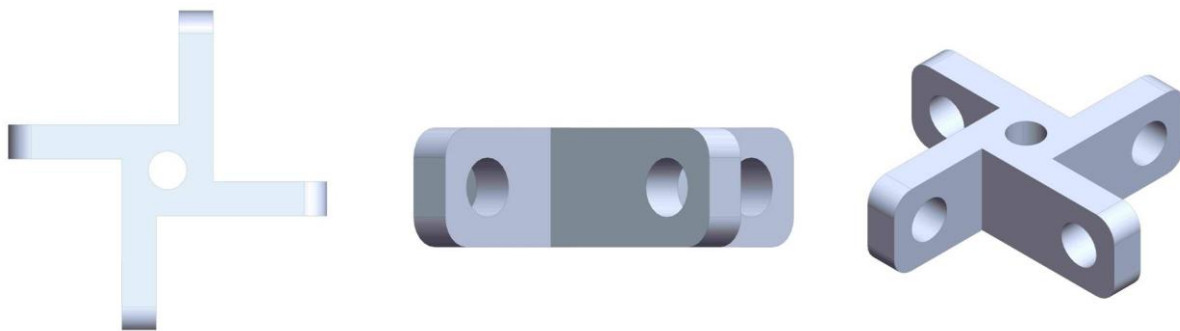


Fig 169. Unión compuesta biaxial. Pieza 3d. vistas.

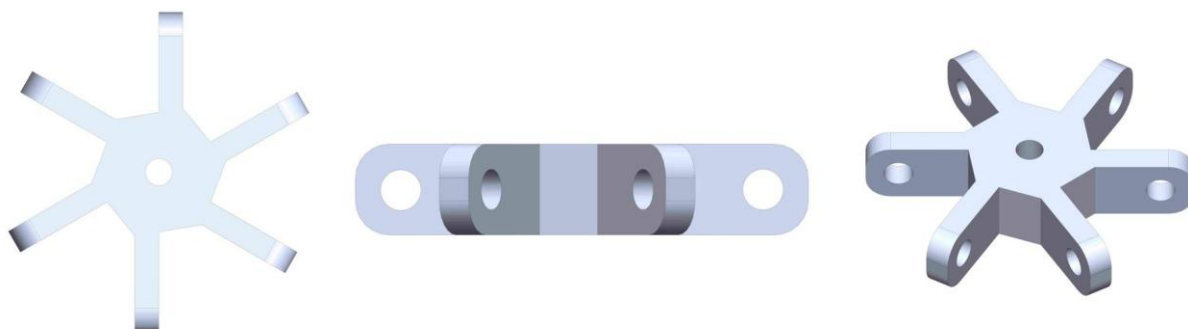


Fig 170. Unión compuesta triaxial. Pieza 3d. vistas.

El diseño de las uniones estándar está pensado para módulos biaxiales y triaxiales, permitiendo hacer combinaciones como sean posibles. También cuenta con un hueco central que permite pensar en la unión mecánica de la cubierta textil de la estructura. O para nuestro caso en particular el uso de elementos rígidos que sirvan como elementos de bloqueo de movimiento límite.

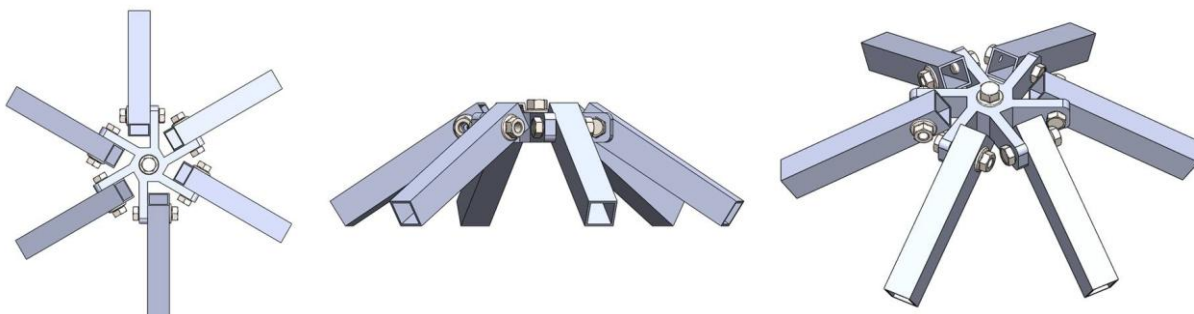


Fig 171. Unión compuesta triaxial. Ensamblado estándar con barras. Vistas.

Módulo Triangular

El modelado 3d mecánico del módulo triangular se hace con las siguientes condiciones geométricas. Primero las barras rígidas tienen una longitud de 1 como unidad métrica. Y las uniones compuestas tienen un diámetro de 0,08 de una unidad métrica. La articulación entre barras es tipo pivote que permite la rotación simple. Igual para la articulación entre barra y unión compuesta.

El módulo triangular está formado por 6 barras rígidas, que forman tres unidades simples. Y 6 uniones compuestas estándar para unir las unidades simples y hacer el ensamblado del módulo triangular simétrico. Es necesario mantener el patrón de tejido de las unidades simples así como la dirección de unión entre barras y unión compuesta estándar. El cambio de dirección puede causar bloqueo de movimiento o restricciones.

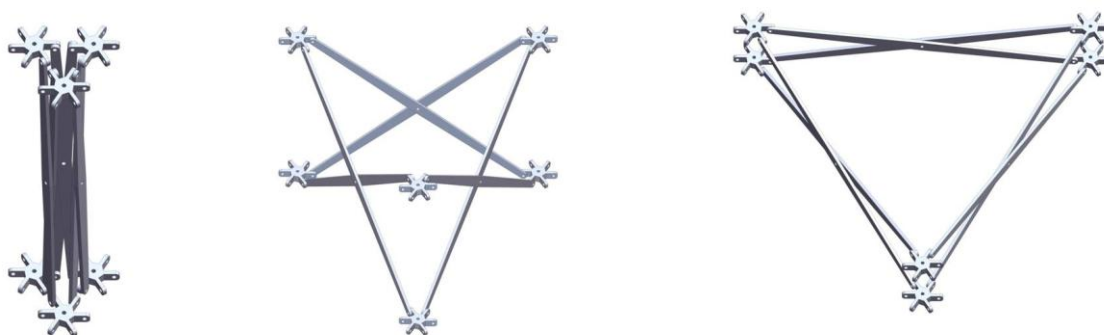


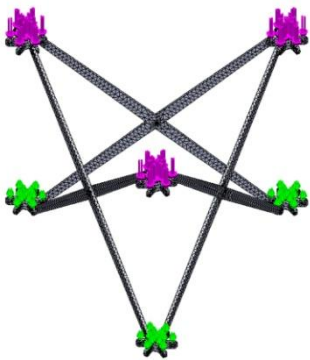
Fig 172. Módulo triangular. Ensamblado estándar con barras y uniones compuestas. Prueba de movimiento.

Para el módulo triangular se usaron condiciones de contorno simples con el fin de hacer un análisis estático teórico y comprobar las tensiones y deformaciones, estableciendo así parámetros de seguridad para la fabricación de las uniones en 3d. Para las bases de contacto con la superficie de apoyo se uso una sujeción con control deslizante (color verde). Una fuerza aplicada en las articulaciones compuestas de la parte superior de 1N (color lila). Y un mallado triangular con una tolerancia de 0,2mm.

Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Presión/Tensión	N/mm ² (MPa)

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades
	<p>Nombre: ABS</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises</p> <p>Límite elástico: N/mm²</p> <p>Límite de tracción: 30 N/mm²</p> <p>Módulo elástico: 2000 N/mm²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.394</p> <p>Densidad: 1020 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 318.9 N/mm²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 2.4e-005 /Kelvin</p>

Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	8.88577e-006 N/mm ² (MPa) Nodo: 18669	1.282 N/mm ² (MPa) Nodo: 14865
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0.0234019 mm Nodo: 10975	0.0755342 mm Nodo: 20758
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.7738e-010 Elemento: 6829	1.1607e-005 Elemento: 6258

Las tensiones y deformaciones obtenidas permiten hacer correcciones geométricas y de dimensionamiento de las uniones compuestas estándares, a fin de obtener un modelo con archivo de impresión STL para la impresión en 3d y fabricación de modelos a escala.

Nombre de modelo: Modulo-Triangular
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 450.029

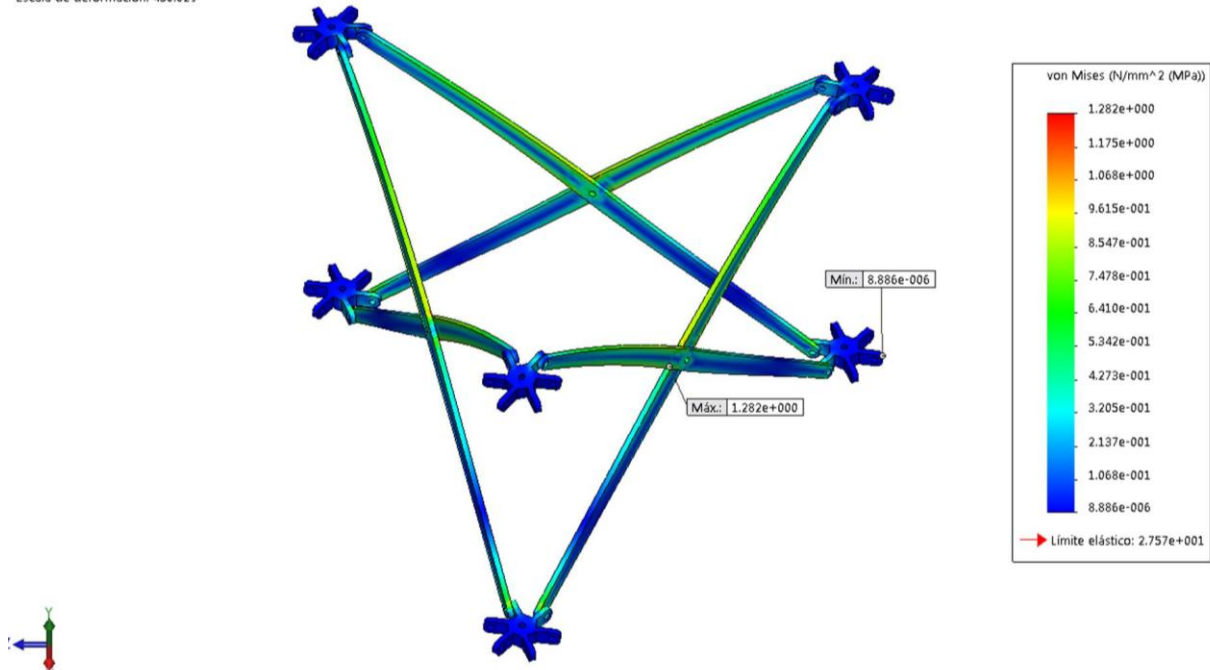


Fig 173. Análisis estático módulo triangular. Tensiones.

Nombre de modelo: Modulo-Triangular
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 450.029

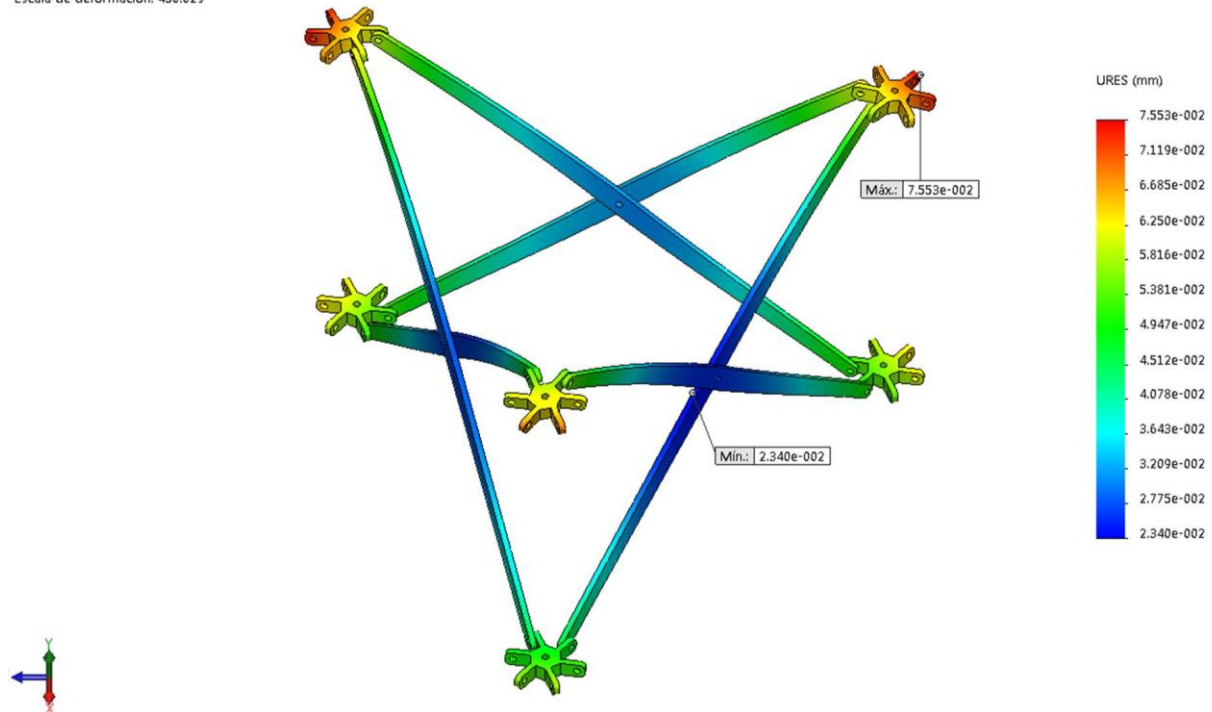


Fig 174. Análisis estático módulo triangular. Desplazamientos.

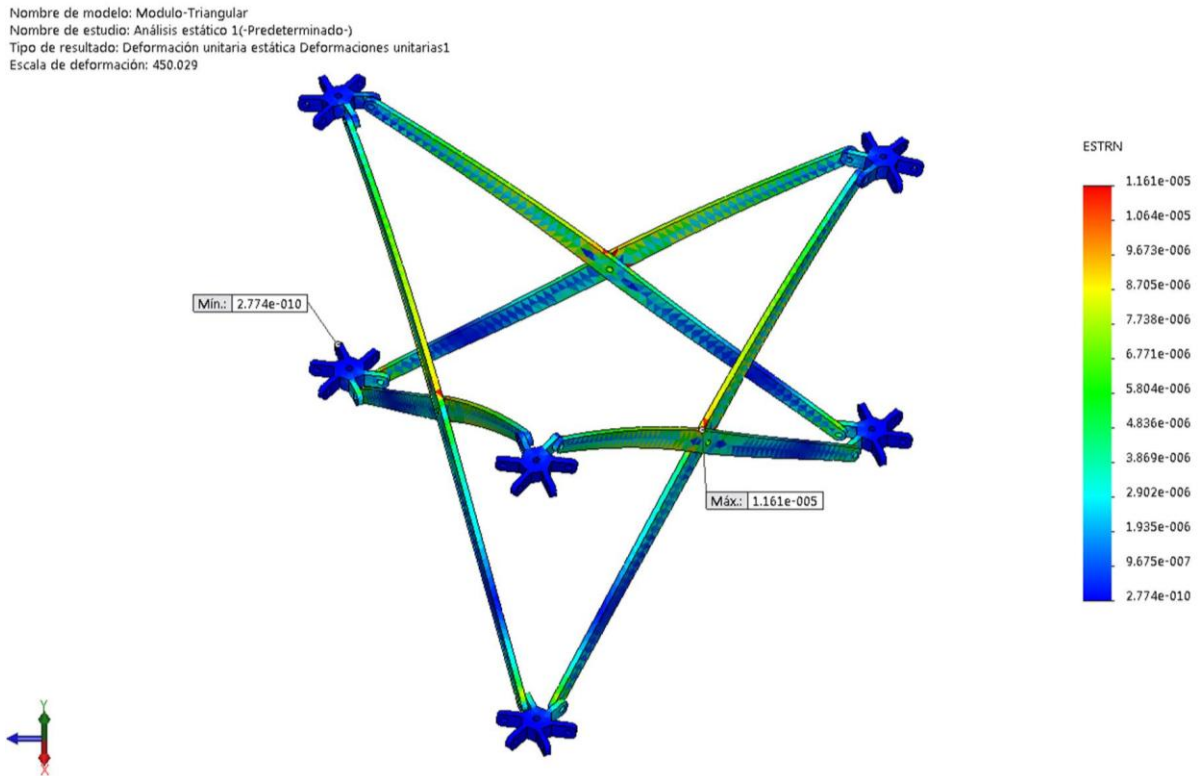


Fig 175. Análisis estático módulo triangular. Deformaciones.

Módulo Cuadrado

El modelado 3d mecánico del módulo cuadrado se hace con las siguientes condiciones geométricas. Primero las barras rígidas tienen una longitud de 1 como unidad métrica. Y las uniones compuestas tienen un diámetro de 0,06 de una unidad métrica. La articulación entre barras es tipo pivote que permite la rotación simple. Igual para la articulación entre barra y unión compuesta.

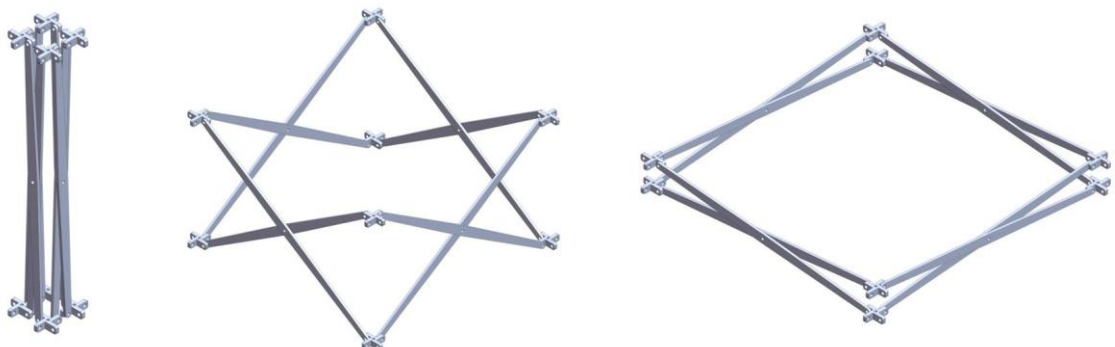


Fig 176. Módulo cuadrado. Ensamblado estándar con barras y uniones compuestas. Prueba de movimiento.

El módulo desplegable cuadrado está formado por 8 barras rígidas, que forman cuatro unidades simples. Y 8 uniones compuestas estándar para unir las unidades simples y hacer el ensamblado del módulo cuadrado simétrico. Es necesario mantener el patrón de tejido de las unidades simples así como la dirección de unión entre barras y unión compuesta estándar. El cambio de dirección puede causar bloqueo de movimiento o restricciones.

Para el módulo cuadrado se usaron las mismas condiciones de contorno simples que el modelo anterior con el fin de hacer un análisis estático teórico y comprobar las tensiones y deformaciones, estableciendo así parámetros de seguridad para la fabricación de las uniones en 3d. Para las bases de contacto con la superficie de apoyo se uso una sujeción con control deslizante (color verde). Una fuerza aplicada en las articulaciones compuestas de la parte superior de 1N (color lila). Y un mallado triangular con una tolerancia de 0,2mm. Las unidades de medición fueron las mismas que el modelo anterior.

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades
	Nombre: ABS
	Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal
	Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises
	Límite elástico: N/mm ²
	Límite de tracción: 30 N/mm ²
	Módulo elástico: 2000 N/mm ²
	Coefficiente de Poisson: 0.394
	Densidad: 1020 kg/m ³
	Módulo cortante: 318.9 N/mm ²
	Coefficiente de dilatación térmica: 2.4e-005 /Kelvin

Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.000251237 N/mm ² (MPa) Nodo: 24625	1.23485 N/mm ² (MPa) Nodo: 15549
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0.00590303 mm Nodo: 7680	0.113084 mm Nodo: 20820
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	4.26618e-009 Elemento: 10217	1.07566e-005 Elemento: 6073

Para las barras del módulo desplegable cuadrado los resultados presentan mayor deformación que el triangular, esto se debe a la geometría de agrupación, el cuadrado es mas inestable y deformable que el triangulo, por tanto hay mas deformación en las barras.

Nombre de modelo: Modulo-Cuadrado
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 294.285

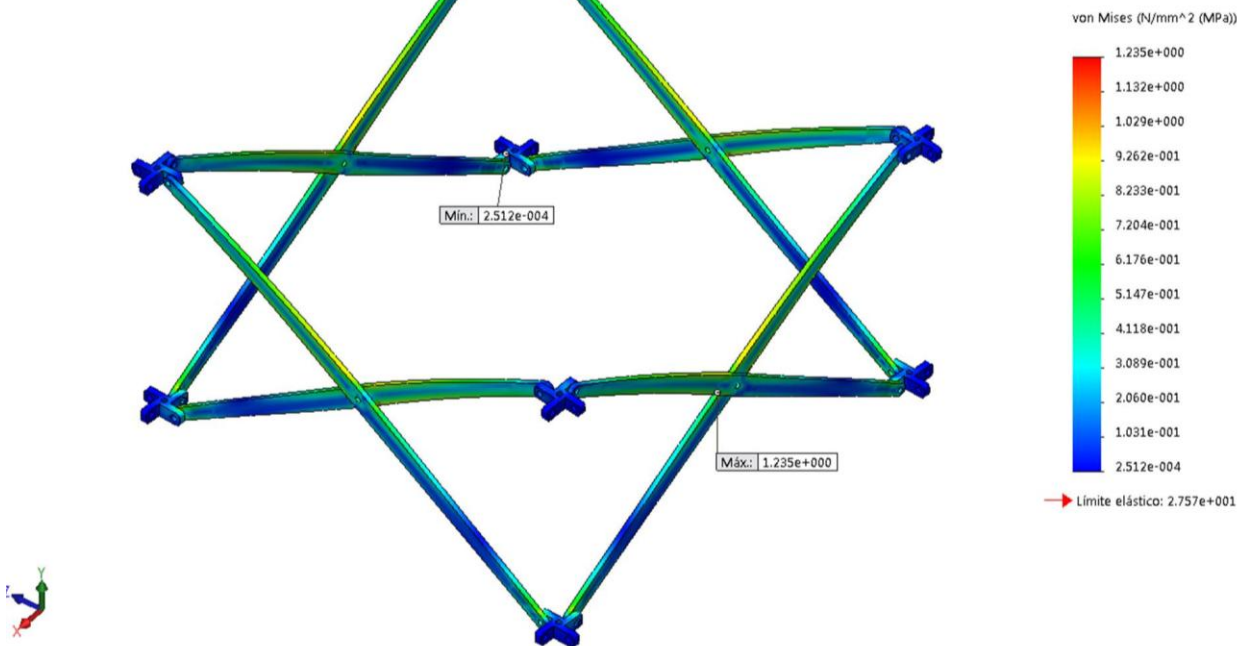


Fig 177. Análisis estático módulo cuadrado. Tensiones.

Nombre de modelo: Modulo-Cuadrado
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
 Escala de deformación: 294.285

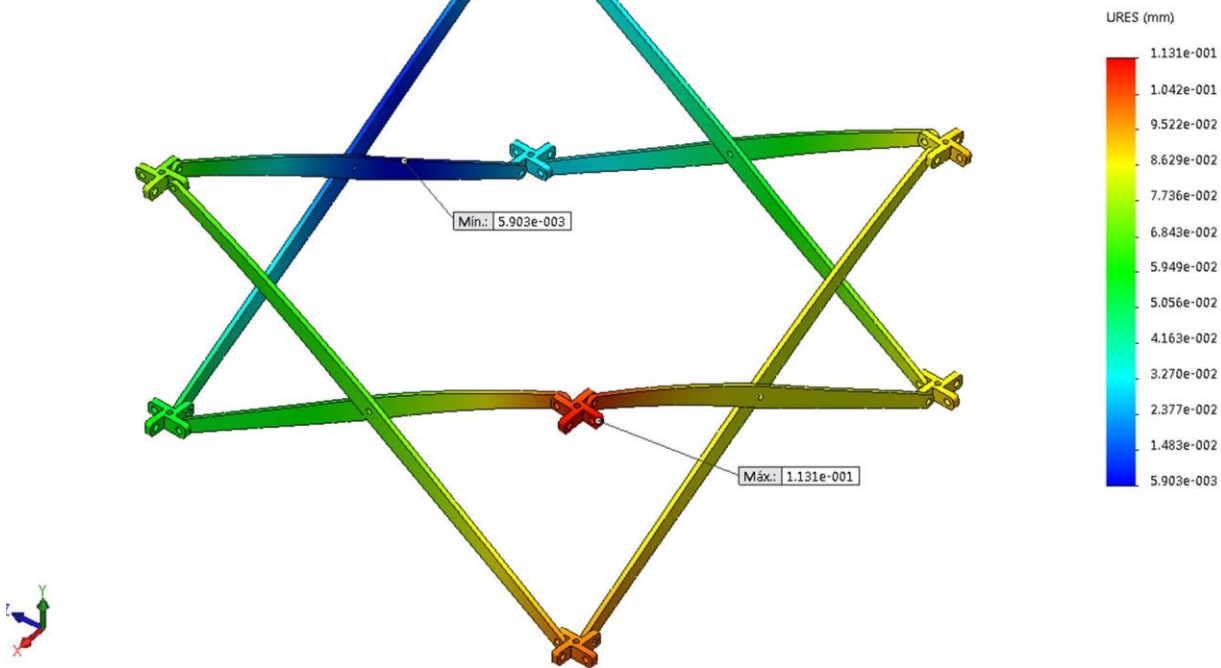


Fig 178. Análisis estático módulo cuadrado. Desplazamientos.

Nombre de modelo: Modulo-Cuadrado
Nombre de estudio: Análisis estático 1-(Predeterminado)
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
Escala de deformación: 294.285

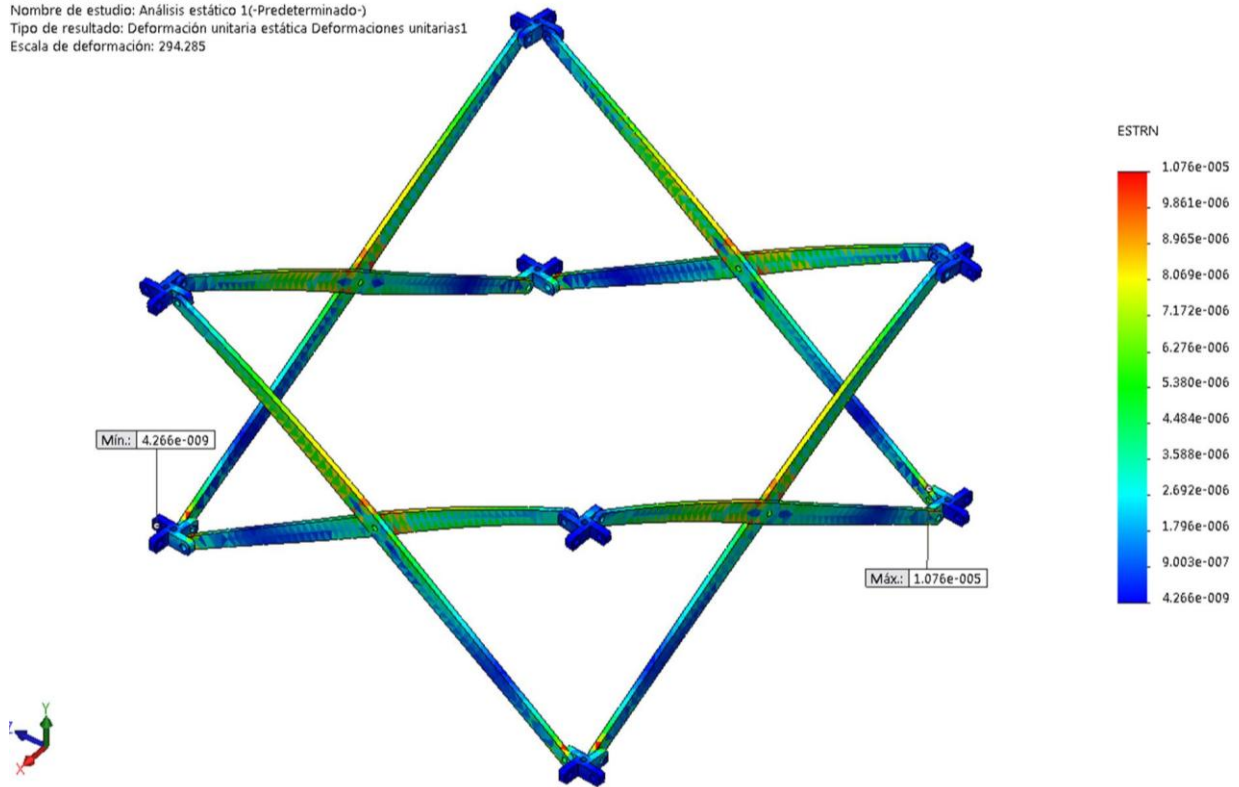


Fig 179. Análisis estático módulo triangular. Deformaciones.

Módulo Hexagonal

El modelado 3d mecánico del módulo hexagonal se hace con las mismas condiciones geométricas del módulo triangular. Primero las barras rígidas tienen una longitud de 1 como unidad métrica. Y las uniones compuestas tienen un diámetro de 0,08 de una unidad métrica. La articulación entre barras es tipo pivote que permite la rotación simple. Igual para la articulación entre barra y unión compuesta.

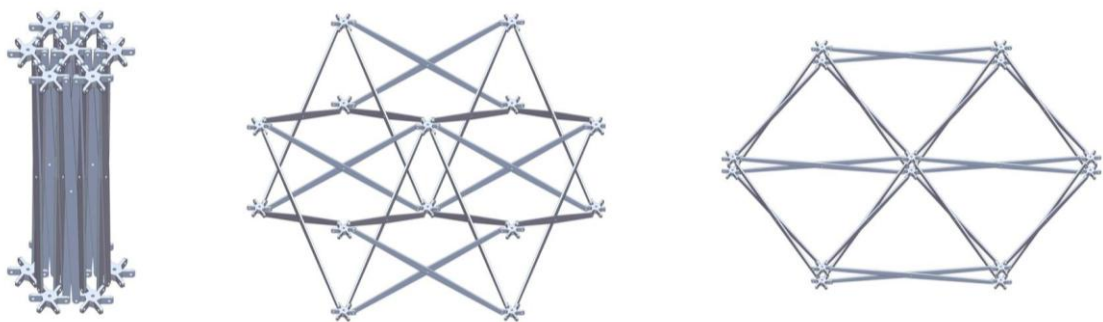


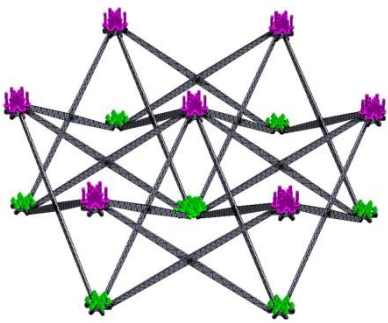
Fig 180. Módulo cuadrado. Ensamblado estándar con barras y uniones compuestas. Prueba de movimiento.

El módulo hexagonal está formado por 24 barras rígidas, que forman 12 unidades simples. Y 14 uniones compuestas estándar para unir las unidades simples y hacer el ensamblado del módulo hexagonal

simétrico. Es necesario mantener el patrón de tejido de las unidades simples así como la dirección de unión entre barras y unión compuesta estándar. El cambio de dirección puede causar bloqueo de movimiento o restricciones.

Para el módulo hexagonal se usaron las mismas condiciones de contorno simples que el modelo triangular con el fin de hacer un análisis estático teórico y comprobar las tensiones y deformaciones, estableciendo así parámetros de seguridad para la fabricación de las uniones en 3d. Para las bases de contacto con la superficie de apoyo se uso una sujeción con control deslizante (color verde). Una fuerza aplicada en las articulaciones compuestas de la parte superior de 1N (color lila). Y un mallado triangular con una tolerancia de 0,2mm. Las unidades de medición fueron las mismas que el modelo anterior.

Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades
	Nombre: ABS
	Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal
	Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises
	Límite elástico: N/mm ²
	Límite de tracción: 30 N/mm ²
	Módulo elástico: 2000 N/mm ²
	Coefficiente de Poisson: 0.394
	Densidad: 1020 kg/m ³
	Módulo cortante: 318.9 N/mm ²
	Coefficiente de dilatación térmica: 2.4e-005 /Kelvin

Resultado del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	1.40585e-005 N/mm ² (MPa) Nodo: 42875	0.745076 N/mm ² (MPa) Nodo: 23059
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 69	0.0203929 mm Nodo: 31751
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.07965e-010 Elemento: 19532	8.26583e-006 Elemento: 8980

En el estudio estático del módulo hexagonal se puede observar una tensión máxima mas baja con respecto a los dos módulos anteriores, esto se debe a la geometría de agrupación y al mayor número de barras y uniones que distribuyen la carga.

Nombre de modelo: Modulo-Hexagonal
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 3528.35

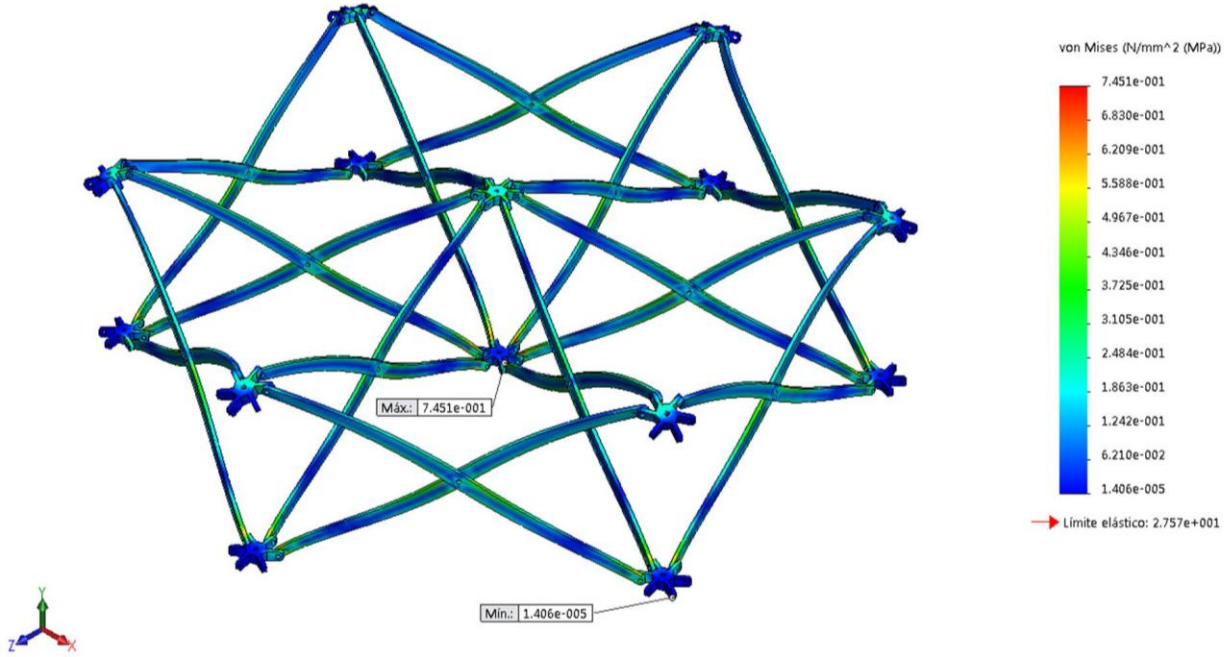


Fig 181. Análisis estático módulo hexagonal. Tensiones.

Nombre de modelo: Modulo-Hexagonal
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 3528.35

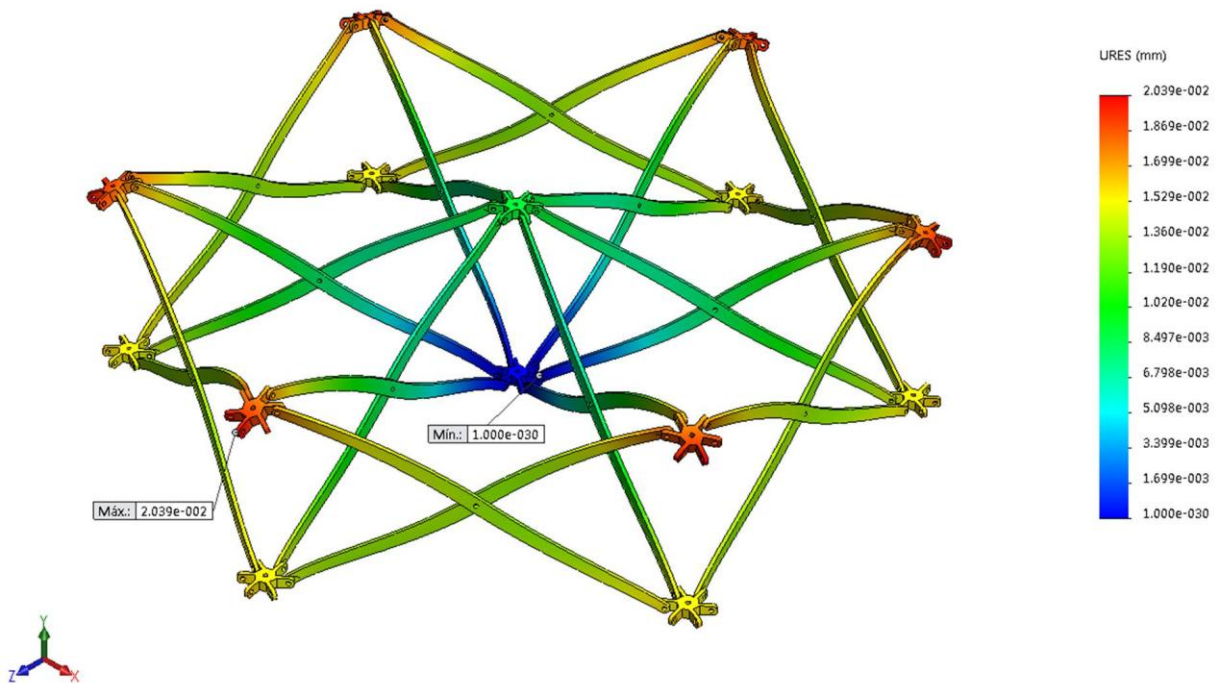


Fig 182. Análisis estático módulo hexagonal. Desplazamientos.

Nombre de modelo: Modulo-Hexagonal
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
 Escala de deformación: 3528.35

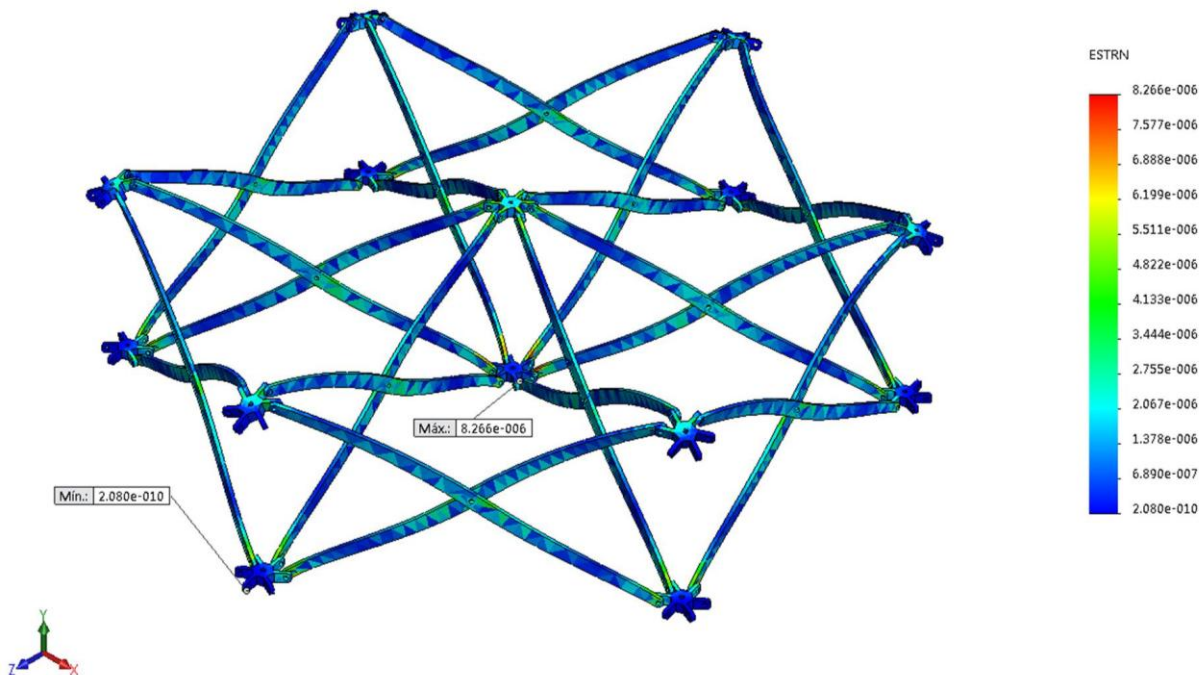


Fig 183. Análisis estático módulo hexagonal. Deformaciones.

Prototipado de los módulos desplegables

El objetivo de hacer el modelado mecánico 3d es poder aproximarse de forma mas precisa al diseño por fabricación digital, y así evitar en la medida de lo posible el ensayo y error de las piezas impresas en 3d y de las barras por corte laser.

El modelado mecánico 3d de los módulos desplegables de base triangular, cuadrada y hexagonal dieron resultados positivos en cuanto a las pruebas de movimiento con las uniones compuestas estándar, logrando definir la geometría y dimensionamiento adecuado para cada módulo. También permitió definir el material de impresión 3d para las uniones que se usaran en la fabricación de modelos físicos.

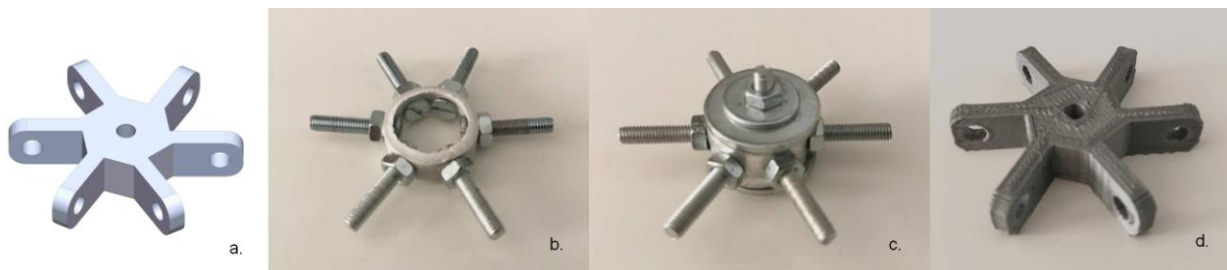


Fig 184. Unión hexagonal compuesta estándar. (a) Modelado mecánico 3D. (b) Anillo de pvc + tornillos. (c) Anillo de aluminio + tornillos. (d) Impresión 3d en PLA.

El material usado para las uniones compuestas impresas en 3d fue el PLA. Si bien en el mercado podemos encontrar también el ABS, y quizás con algunas prestaciones mecánicas mas altas que el PLA, en términos económicos es más accesible el PLA. Por otro lado el PLA no emite gases nocivos y cuenta con un rango de colores más amplio que el ABS. El PLA es un polímero de ácido láctico, y es biodegradable.

Por otro lado para las barras se uso contrachapado de 3mm con corte laser según plantilla con dimensiones y geometrías resultado del modelado 3d. Para las maquetas prototipo finales se usaron laminas de metacrilato de 3mm para las barras, material de mayor calidad mecánica que el contrachapado y con una flexión que evita la rotura y tiene mayor durabilidad.

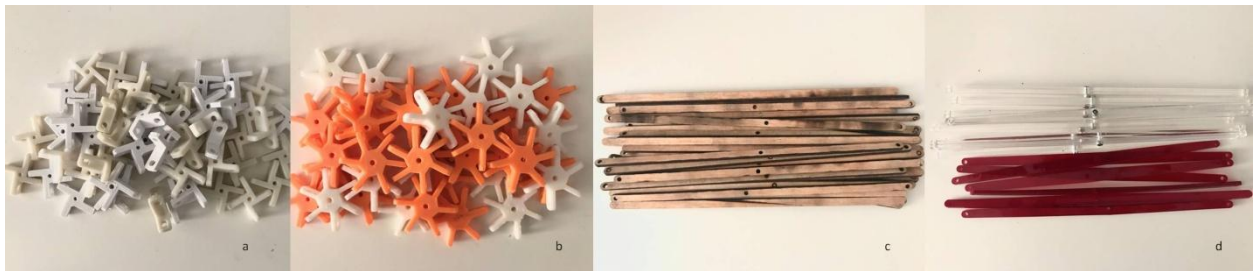


Fig 185. Uniones impresas 3D y barras por corte laser. (a) Uniones biaxiales cuadradas. (b) Uniones triaxiales hexagonales. (c) Barras de contrachapado de 3mm. (d) Barras de metacrilato de 3mm.

Después de definir el material y la geometría para la fabricación de modelos a escala de las EDBRA, se debe tener en cuenta el patrón de ensamblaje entre las unidades simples o barras y las uniones estándar. Si el primer módulo esta con un patrón de giro positivo, todos los demás módulos deben de conservar este patrón para evitar bloqueos de movimiento. Recordemos que el desfase en los brazos de las piezas son para dar continuidad a los ejes de movimiento.



Fig 186. Ensamblado de módulo hexagonal.
(a) Modelado mecánico 3d. (b) Maqueta con uniones de pvc. (c) Maqueta con uniones impresas en 3d (pla).

El alcance de la fabricación con ayuda de técnicas de fabricación digital era poder desarrollar un sistema constructivo de EDBRA con fines didácticos y académicos, facilitando la exploración de nuevas

geometrías y la construcción de modelos a escala con mayor precisión y durabilidad. Permitiendo la fabricación de los modelos a escala de los dos casos de estudio presentados en el siguiente capítulo.

Módulo Triangular Desplegable

El ensamblado del módulo desplegable triangular cuenta con 6 uniones hexagonales estándar de 40mm de diámetro, 6 barras de metacrilato de 3mm x 300mm de largo, y tornillos y tuercas M3. El proceso de despliegue del módulo triangular es completo y fluido desde su posición cerrada hasta su máxima trayectoria de apertura.

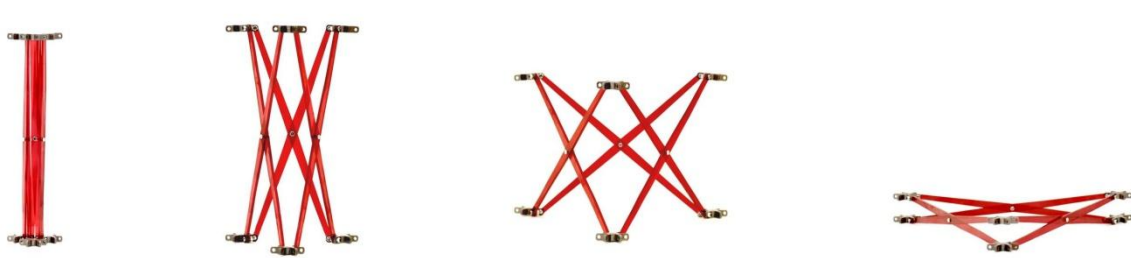


Fig 187. Módulo desplegable triangular con uniones PLA y barras de metacrilato. Proceso de despliegue.

Módulo Cuadrado Desplegable

El ensamblado del módulo desplegable cuadrado cuenta con 8 uniones hexagonales estándar de 40mm de diámetro, 8 barras de metacrilato de 3mm x 300mm de largo, y tornillos y tuercas M3. El proceso de despliegue del módulo cuadrado es completo y fluido desde su posición cerrada hasta su máxima trayectoria de apertura.



Fig 188. Módulo desplegable cuadrado con uniones PLA y barras de metacrilato. Proceso de despliegue.

Módulo Hexagonal Desplegable

El ensamblado del módulo desplegable cuadrado cuenta con 2 uniones hexagonales estándar de 40mm de diámetro, 12 barras de metacrilato de 3mm x 300mm de largo, y tornillos y tuercas M3. El proceso de despliegue del módulo cuadrado es completo y fluido desde su posición cerrada hasta su máxima trayectoria de apertura.



Fig 189. Módulo desplegable hexagonal con uniones PLA y barras de metacrilato. Proceso de despliegue.

Elementos de Bloqueo y Control de Movimiento Límite

El proceso de diseño de las EDBRA requiere de precisión en los puntos de articulación y de control de los ejes de movimiento, desde el diseño geométrico y parametrización hasta el modelado mecánico y fabricación. Primero porque garantizamos el movimiento fluido de la estructura y evitamos restricciones o bloques de movimiento por geometría o por construcción. Y segundo porque podemos calcular y diseñar los elementos de bloqueo de movimiento y control de movimiento para los sistemas desplegados abiertos en su posición de uso.

Para esta investigación exploraremos elementos de bloqueo de movimiento rígidos para los tres tipos de módulos desplegados, biaxial cuadrado y triaxial triangular y hexagonal. La idea es continuar el proceso de diseño de los sistemas desplegados para lograr llegar a la fabricación de una estructura desplegable en escala humana. Si bien es posible controlar el movimiento límite con elementos a tracción como cables o membranas textiles, se usaran elementos rígidos.

Durante el proceso de construcción de modelos desplegados con maquetas de trabajo se plantearon algunas propuestas para el control límite de movimiento garantizando la posición final de uso de la geometría propuesta. Usando las uniones como puntos de anclaje para los elementos de bloqueo. Como vemos en la imagen el módulo triangular tiene la posibilidad de bloquear alguno de los tres ejes de movimiento vertical, o los 6 ejes horizontales. Para el caso práctico se usó el bloqueo de uno de los ejes verticales.



Fig 190. Módulo triangular desplegable con elemento de bloqueo de movimiento y barras a flexión activa.

Recordemos que los sistemas desplegados con barras rectas articuladas tienen en su mayoría un solo grado de libertad, con excepción de casos especiales, solo es necesario bloquear un solo eje de movimiento para detener todo el sistema. Como es el caso del sistema sinclástico con módulos hexagonales, solo requiere de un solo elemento de bloqueo para controlar todo el sistema.

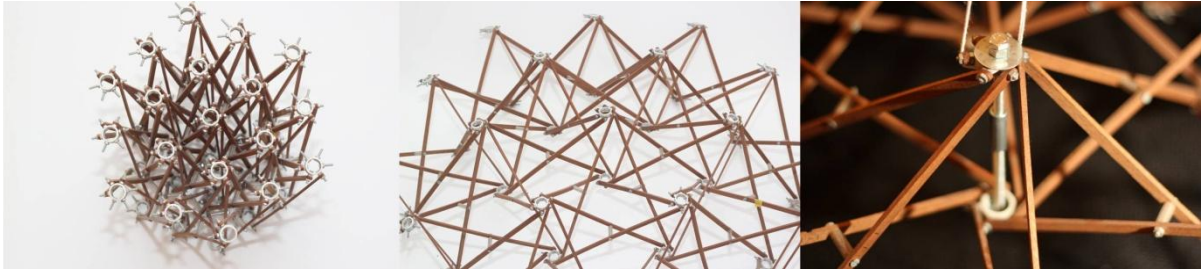


Fig 191. Estructura desplegable sinclástica con elemento de bloqueo de movimiento.

Las pruebas de elementos de bloqueo sirvieron para definir el diseño de la pieza final en el modelo mecánico 3d. Y analizar en las maquetas a escala las posibles configuraciones mecánicas para controlar o en su caso bloquear el movimiento de la estructura en su estado de uso y mantenerla en equilibrio.

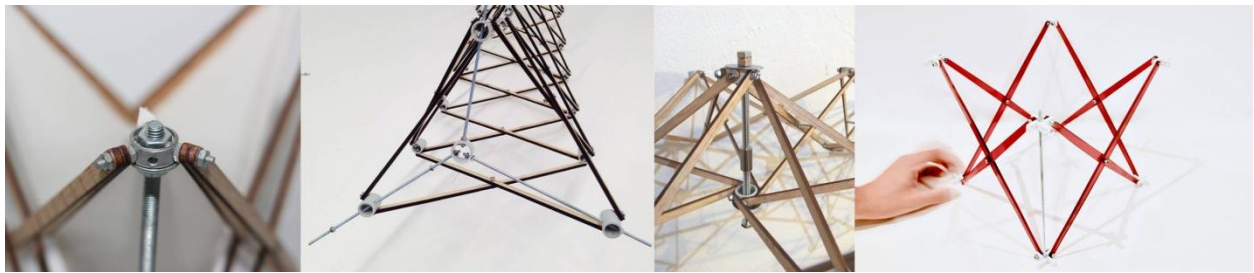


Fig 192. Elementos de control o bloqueo de movimiento de las EDBRA. Maquetas de trabajo.

Finalmente se logró definir el diseño de los módulos desplegados usando dos parámetros de control teórico de movimiento como ejercicio práctico. Un primer control de movimiento con el módulo parcialmente desplegado, y un segundo control con el módulo casi desplegado. Así podemos observar la posición final de uso para cada módulo desplegable en ambos casos de control límite de movimiento.

Adicionalmente se contará con información visual sobre el comportamiento mecánico de los módulos y prototipos a escala, importante para el alistamiento de material y definición de detalles constructivos en los prototipos a escala humana. El ejercicio de llevar a la construcción una estructura desplegable con sistemas de barras rectas articuladas a escala real o humana requiere de la valoración de pruebas a escala y el análisis o estudio del diseño digital. Es por esto que al ser sistemas constructivos poco explorados en la escala real, necesitan de procesos de diseño previos como las maquetas de trabajo apoyados con diseños digitales.

Módulo triangular desplegable



Fig 193. Módulo triangular desplegable.
(a) Sin control de movimiento. (b) Control de movimiento 01. (c) Control de movimiento 02.

Módulo cuadrado desplegable



Fig 194. Módulo cuadrado desplegable.
(a) Sin control de movimiento. (b) Control de movimiento 01. (c) Control de movimiento 02.

Módulo hexagonal desplegable



Fig 195. Módulo hexagonal desplegable.
(a) Sin control de movimiento. (b) Control de movimiento 01. (c) Control de movimiento 02.

La definición de elementos de control límite de movimiento para cada módulo desplegable sirven de referente para las estructuras desplegables con agrupaciones y geometrías complejas. Y como estrategia para el control límite de movimiento de los casos de estudio que se presentaran en el siguiente capítulo. EL objetivo es controlar el movimiento límite de la estructura desplegable en su posición final o estado de uso, dándole estabilidad y equilibrio.



Fig 196. Módulos desplegados con elementos de control límite de movimiento.
 (a) Módulo triangular. (b) Módulo cuadrado. (c) Módulo hexagonal.

Por último hay que destacar la importancia en los procesos de diseño paramétrico y metodología de las EDBRA en esta investigación. Sin duda procesos importantes en el desarrollo y diseño de los casos de estudio propuesto en el siguiente capítulo, que han sido descritas y analizadas hasta este punto.

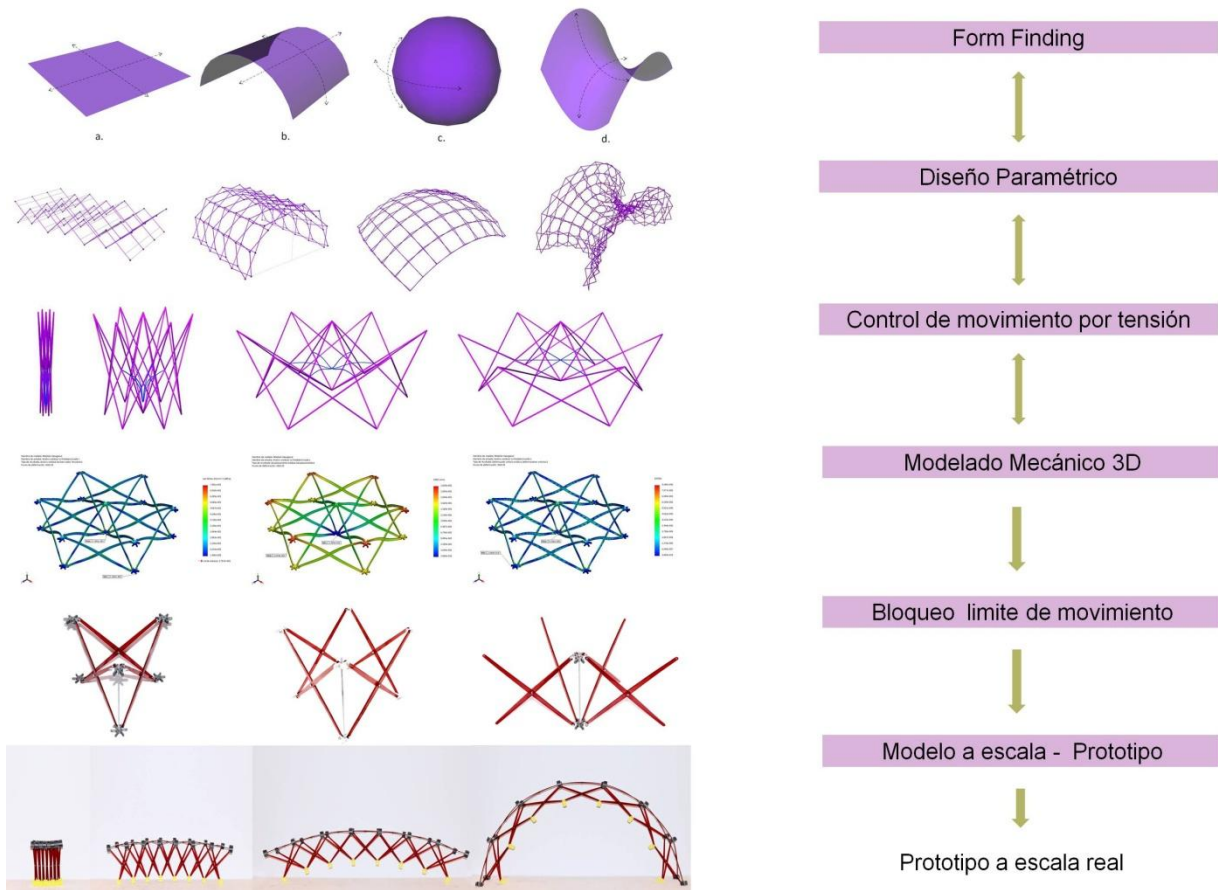


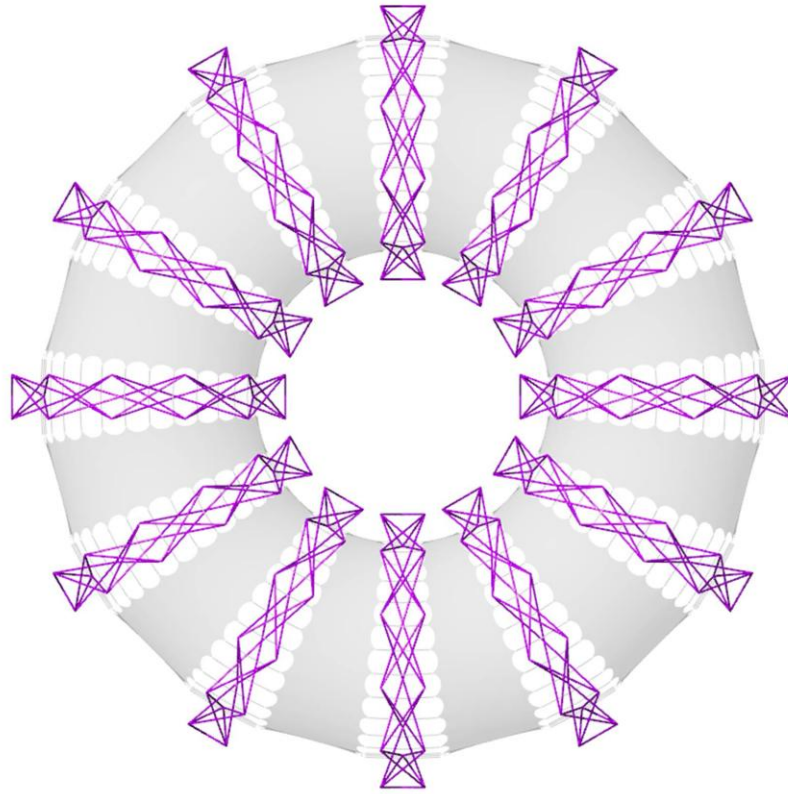
Fig 197. Proceso de diseño de las EDBRA. Metodología.

Discusión del Método de Control de Movimiento y Prototipado

El método de control de movimiento propuesto en este capítulo ayuda a dimensionar el control de movimiento límite de las EDBRA, para cada caso en particular dependiendo si es un sistema abierto o un sistema cerrado. El tener parametrizado con un código o algoritmo de un sistema desplegable ayuda no solo a la simulación de movimiento y sus variaciones, sino que también se puede simular el control de movimiento límite, en este caso por tracción. Con este método se pueden analizar cualquier tipo de sistema desplegable y prever las posibles soluciones constructivas para controlar el movimiento del sistema.

El análisis de control de movimiento por tracción está muy estrechamente relacionado con las soluciones constructivas del sistema desplegable y sus materiales. Por esta razón se hace necesario el desarrollo de prototipos usando métodos de modelado mecánico 3D y haciendo análisis de tensiones simples para la comprobación teórica de los prototipos a construir. Las comprobaciones teóricas previas al prototipo permiten analizar diferentes posibilidades de materiales y geometrías a fin de obtener una óptima para la construcción del prototipo.

Los análisis de tensiones y deformaciones presentados en este capítulo son para la construcción de las maquetas y prototipos finales desarrollados en el siguiente capítulo y sirvieran para definir materiales y geometrías de los mismos. Si bien los análisis de tensiones y deformaciones no pretenden ser un modelo de cálculo de los módulos desplegables, si es un primer paso para continuar con mayor profundidad y análisis el comportamiento mecánico de los módulos desplegables y evaluar comparativamente varias opciones de geometrías y materiales para la construcción de prototipos.



Capítulo 05

Casos de estudio de las EDBRA

Introducción

Esta investigación se enfoca en las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas, desde su diseño paramétrico hasta la construcción de un prototipo a escala humana proponiendo sistemas de control de movimiento límite para la estabilidad y equilibrio del sistema. Este documento pretende aportar diferentes estrategias de diseño de las EDBRA y posibles soluciones en sus etapas de diseño. Las EDBRA son sistemas desplegados que ocupan el menor espacio posible cuando están cerradas o en estado de almacenamiento o transporte, gracias a sus barras rectas articuladas. Por esta razón son estructuras atractivas para la aplicación arquitectónica.

En el capítulo de diseño paramétrico de las EDBRA se definieron dos tipos de sistemas desplegados con barras rectas articuladas. Un primer tipo como sistemas desplegados cerrados, es decir auto-portantes, y que no requieren de elementos adicionales al sistema para estar en equilibrio en su estado de uso. Y un segundo tipo como sistemas desplegados abiertos, estos no son auto-portantes en sí mismos, y requieren de elementos adicionales al sistema como barras o cables para estar en equilibrio en su posición de despliegue o estado de uso.

En este capítulo se desarrollará un caso de estudio para cada tipo de sistema desplegable, y analizaremos el proceso de diseño hasta llegar a la construcción de un prototipo a escala humana. Para los sistemas desplegados cerrados se implementará un domo desplegable con frecuencia 2, y para los sistemas desplegados abiertos se implementará una estructura formada por arcos desplegados de base triangular.

Para el desarrollo de ambos casos de estudio se usará *High Tech* en los procesos de diseño, y *Low Tech* en la construcción del prototipo. El objetivo final de la construcción de prototipos a escala real es evaluar su comportamiento mecánico de los sistemas desplegados, ventajas y desventajas del sistema, y crear un impacto positivo en su aplicación arquitectónica. Inicialmente con aplicaciones en infraestructura para eventos de pequeña y mediana escala, stands y micro-arquitectura. Y de gran impacto en la arquitectura de emergencia, ofreciendo un sistema constructivo desplegable con múltiples posibilidades espaciales.

El enfoque general que se quiere dar con los dos casos de estudio propuestos es la factibilidad de diseño y construcción de una estructura desplegable, así como sus posibles problemas y formas de resolverlos desde el diseño digital hasta el proceso de ensamblado. Con esto tener un panorama general para futuras investigaciones y aplicaciones en la arquitectura.

La construcción de los prototipos presentados en este capítulo fueron realizados como ejercicios académicos siendo miembro y cofundador del grupo de investigación SMiA (Structural Morphology in Architecture). Los prototipos son el resultado final de los Workshops sobre estructuras desplegadas impartidos en diferentes centros académicos y universidades, con la colaboración de los estudiantes. El grupo de investigación SMiA nace de las experiencias recogidas del curso sobre Construcción Ligera impartido por el Prof. Dr. Ramón Sastre Sastre en la *Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Valles* (ETSAV). <https://smia-experimental.com/>

Caso de estudio 01 - Sistemas Desplegables Cerrados

Los sistemas desplegados cerrados son los que por su geometría no necesitan de elementos adicionales al sistema para estar en equilibrio cuando la estructura está en su estado de uso. Esto quiere decir que la misma estructura es auto-portante y estable en su posición de despliegue. Para nuestro primer caso de estudio tomaremos un domo desplegable de frecuencia 2 del icosaedro.

En este caso de estudio describiremos la construcción geométrica, el diseño paramétrico del domo desplegable, se aplicaran condiciones básicas de contorno para el análisis de tensiones y deformaciones de la estructura y los procesos de fabricación y montaje del prototipo a escala humana.

Construcción Geométrica del Domo D30

El primer paso es definir la geometría del caso de estudio 01 al que llamaremos Domo D30, usando la "D" como inicial del tipo de estructura y el 30 como número aproximado de metros cuadrados a construir. La geometría de referencia es el icosaedro. Su transformación o truncación media da como resultado el icosaedro truncado. Del icosaedro truncado tomamos una sección menor a la mitad cortada por un plano interceptando cinco pentágonos en su base. La sección geodésica del icosaedro truncado resultante está formada por seis pentágonos y cinco hexágonos. De un pentágono central se agrupan cinco hexágonos por sus aristas. Los hexágonos se unen entre sí por las aristas del hexágono contiguo. Y los cinco pentágonos faltantes se unen a las aristas cóncavas entre los hexágonos de forma radial. Para completar el domo unimos cinco medios hexágonos que conectan a los pentágonos perimetrales. En definitiva se completa la sección geodésica seleccionada. Todas las aristas formadas por la sección del icosaedro truncado son de igual dimensión.

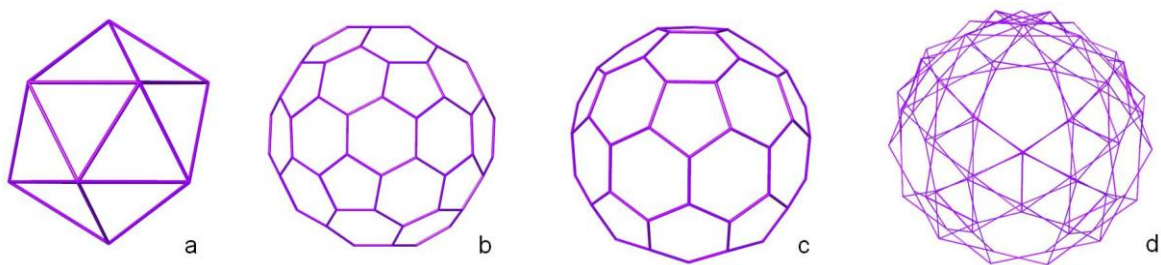


Fig 198. Geometría del domo desplegable D30. (a) Icosaedro. (b) Icosaedro truncado. (c) Sección del icosaedro truncado. (d) Domo desplegable D30.

El último paso para la construcción geométrica del domo desplegable, es la de remplazar todos los polígonos hexagonales por módulos hexagonales desplegados de barras rectas articuladas. Y los medios polígonos hexagonales se remplazan por medios módulos hexagonales con pares de tijeras articuladas,

completando así la sección geodésica. Se completa el perímetro circular de la base uniendo los medios hexágonos con una unidad simple asimétrica, cerrando los huecos pentagonales. La longitud resultante de las barras para el domo desplegable D30 es de 1,4 metros con una asimetría de 5cm.

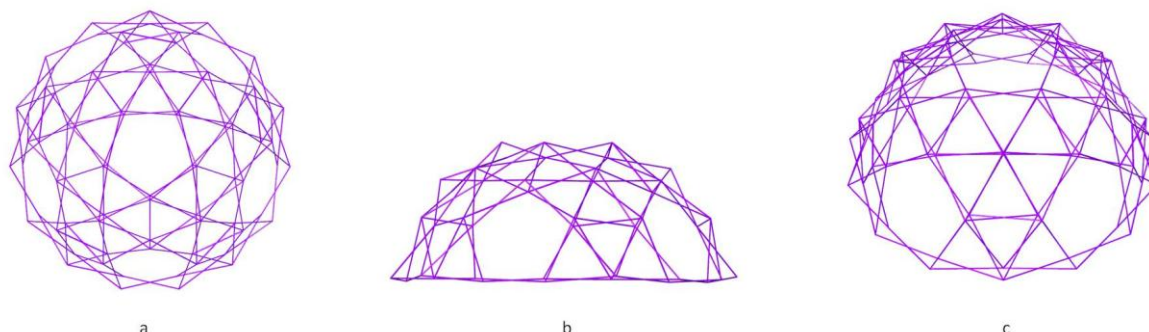


Fig 199. Geometría del domo desplegable D30. (a) Vista en planta. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.

En resumen el domo desplegable o está formado por cinco módulos hexagonales o unidades desplegadas y cinco medios módulos hexagonales o unidades desplegadas. Y seis huecos pentagonales.

Es posible cambiar de tamaño del sistema sin cambiar las dimensiones de las barras. Esto es posible si se aumenta la frecuencia de la geometría o sección del icosaedro truncado. Como consecuencia tendremos un sistema más grande con igual dimensión de barras pero más numero de ellas.

Diseño Paramétrico del Domo Desplegable D30

El proceso de pliegue y despliegue se definen en tres fases o etapas. La primera etapa es cuando el sistema está en su máximo punto de apertura o desplegado. Esta etapa es la etapa de uso. Formado en su interior una cascara habitable. La geometría es la formada por cinco módulos hexagonales o unidades desplegadas y cinco medios módulos hexagonales o unidades desplegadas. Y seis huecos pentagonales. La segunda fase o etapa es la etapa de movimiento o colapso. Para generar el colapso o cierre del sistema la estructura necesita una pequeña fuerza o "golpe tipo látigo" desde los nudos internos del el hueco pentagonal central. La fuerza aplicada es vertical al plano de apoyo del sistema. Y de afuera hacia dentro del sistema. El sistema de barras rectas articuladas y pivotes o nudos hexagonales permiten el movimiento fluido del sistema de afuera hacia adentro. La tercera y última etapa es la de plegado o cerrado máximo del sistema. Esta posición es cuando las barras están totalmente cerradas ocupando el menor espacio posible. Esta etapa es la de transportabilidad.

El diseño paramétrico del domo D30 comienza por construir la geometría de la unidad simple desplegable asimétrica. Como se explico en el capítulo de diseño paramétrico, la unidad simple asimétrica se logra de la intersección de dos círculos rotados sobre un centro externo que cambia de distancia respecto a los

centros de los círculos. Luego se rota la unidad simple asimétrica sobre un eje central, con un ángulo de 60° grados para formar un hexágono con barras internas desplegables. Posteriormente se completan las paredes del hexágono con unidades simples asimétricas. Con el módulo hexagonal formado con geometría activa, es decir con geometría de movimiento, se continúa con la agrupación según la geometría de la sección del icosaedro truncado.

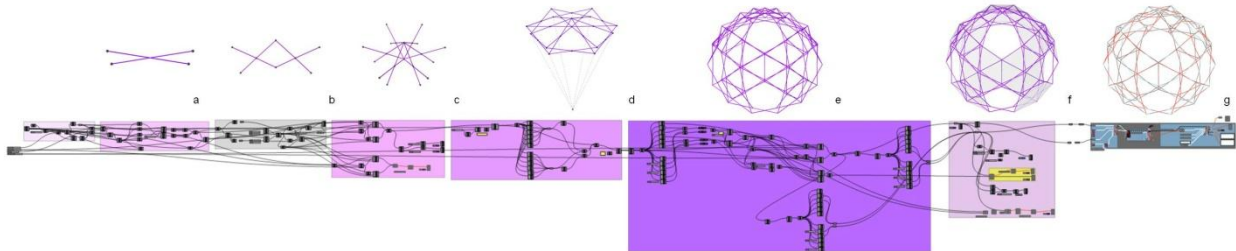


Fig 200. Algoritmo del domo D30 en Grasshopper. (a) Unidad simple asimétrica. (b) Par de unidades con eje central. (c) Rotación de 60° a las unidades simples. (d) Módulo hexagonal desplegable. (e) Agrupación según geometría del icosaedro truncado. (f) Geometría de cubierta textil. (g) Análisis de tensiones y deformaciones usando Millipede.

El diseño paramétrico del domo desplegable D30 es vectorial y geométrico, representado gráficamente el movimiento de las barras y puntos de articulación desde la posición de cerrado hasta la apertura o posición de uso. Esta geometría activa del domo desplegable D30 muestra una rotura de sus elementos durante el proceso de movimiento o despliegue que no ocurre en los modelos físicos. La rotura o desconexión del conjunto del sistema desplegable en el diseño paramétrico, se transforma en una tensión / deformación de sus barras durante el proceso de pliegue o despliegue en el modelo físico. Lo cual se debe aplicar una fuerza adicional en el proceso de movimiento.

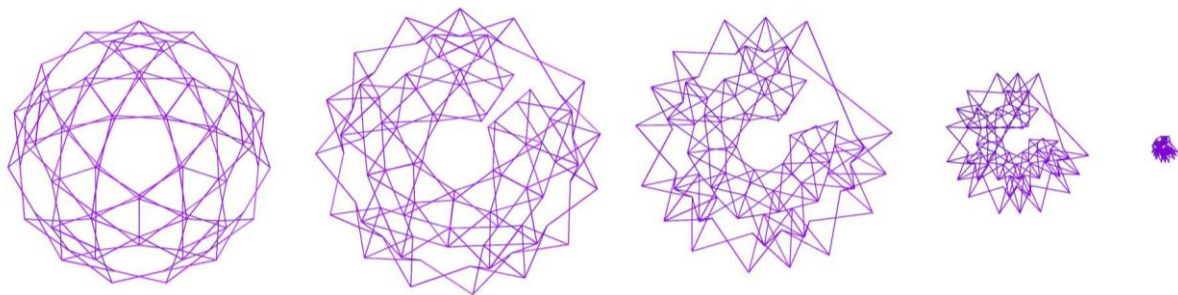


Fig 201. Domo desplegable D30. Proceso de despliegue.

El algoritmo usado para representar el proceso de despliegue del domo D30, puede controlar las variables de dimensión de barra, radio del domo, asimetría en la articulación de las unidades simples, y pliegue o despliegue del sistema.

Condiciones Constructivas y de Materiales

La presente investigación está motivada por el alto impacto de aplicabilidad en la arquitectura que tiene las estructuras desplegadas, especialmente las formadas por barras rectas articuladas. Esta motivación hace que la materialización de un prototipo a escala humana sea indispensable con el fin de analizar su proceso constructivo y desempeño arquitectónico y estructural. La idea era usar materiales de fácil acceso, de control e iguales dimensiones.

El domo en su posición de despliegue debería de ocupar un diámetro de 6 metros y una altura de 3 metros aproximadamente en su punto más alto. Con estas dimensiones se ajusto el diseño paramétrico y se cuantificaron los elementos a usar. El resultado fueron barras rectas de 1,5 metros de longitud.

Barras rectas	180 unidades
Unidades simples	90 Pares
Uniones compuestas hexagonales	80 Unidades

Previo a la construcción del prototipo se exploraron varios materiales y tipos de unión hexagonal con el fin de hacer pruebas de movimiento y comportamiento mecánico del sistema en el proceso de despliegue. Por otro lado el cambio de escala también afecta la solución constructiva de las uniones y de las barras rectas. La construcción de maquetas de trabajo si hizo con materiales blandos como pinchos de madera y tubos de pvc flexible para recubrir cable de cobre. Para los prototipos de mediana escala y escala humana, se usaron barras en madera contrachapado y uniones en pvc o impresas en 3d.

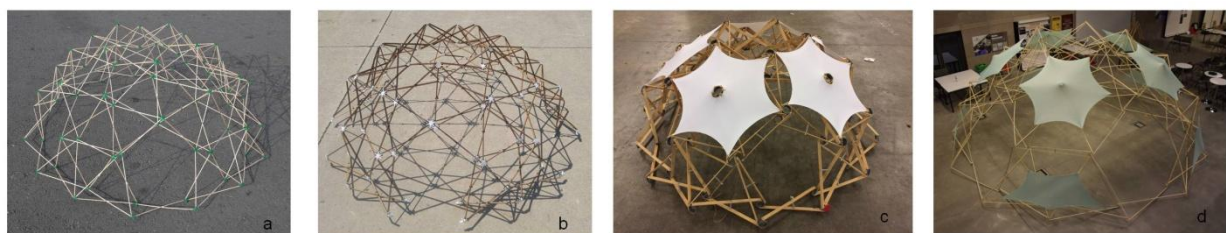


Fig 202. (a) Maqueta de trabajo con pinchos y pvc flexible. (b) Maqueta con barras de contrachapado de 3mm y uniones 3d. (c) Prototipo con barras en madera de pino y tubos de pvc. (d) Prototipo escala humana con barras en madera contrachapada y uniones en pvc.

El proceso de ejecución y fabricación de las maquetas y prototipos de trabajo necesitaron de soluciones constructivas según el tipo de unión hexagonal usada. Los anillos en tubos de pvc fueron una solución de bajo costo muy efectiva, pero fue necesario el uso de un distanciador entre las barras articuladas de las

unidades simples, para conservar los ejes de movimiento desplazados por la articulación de forma tangencial entre el anillo de pvc y las barras de madera.



Fig 203. Maqueta Domo D30. Barras en metacrilato por corte laser y uniones impresas en 3d con pla.

Descripción Geométrica del Domo D30

La geometría propuesta para el prototipo del domo desplegable D30 tuvo en cuenta varios factores. El primero y más importante que tuviera unas dimensiones que pudieran ser controladas sin el uso de maquinas o equipo externo como andamios o grúas. Esto quiere decir que las dimensiones fueran de fácil y rápida manipulación humana. De igual forma que la estructura pudiera ser manipulada entre 3 o 4 personas, y que no requiera un complejo sistema de montaje.

De acuerdo a esta condición se define una geometría para el domo desplegable haciendo uso del diseño paramétrico del domo. Para un diámetro de 6 metros y una altura de 2,56 metros se usaron barras de 1,40 metros de longitud. La estructura en su posición de uso ocupa un área de 30 metros cuadrados aproximadamente con un área habitable de 24mts cuadrados, y en su posición cerrada o de trasporte ocupa un área de 0,5 metros cuadrados y una altura de 1,40 metros.

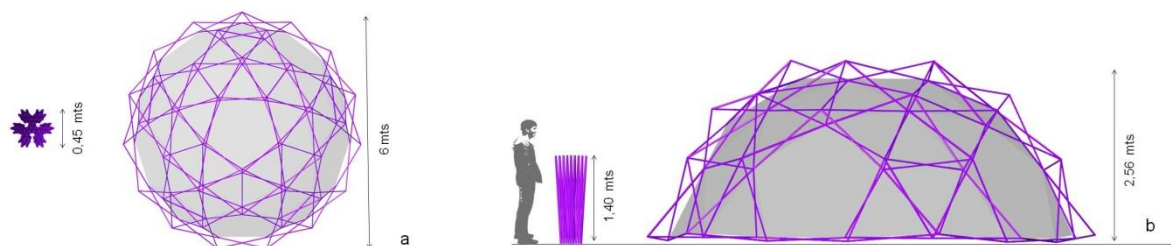


Fig 204. Geometría del Domo D30 desplegable. Posición abierta de uso y cerrada o de transporte. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral.

Otro de los factores a tener en cuenta fue el uso de materiales de fácil acceso y mecanización, razón por la cual se definió el uso de la madera contrachapara de 3mm para las barras. Y en un primer prototipo el uso

de tubos de pvc como articulaciones entre unidades simples desplegables. Los tornillos usados para la unión mecánica entre la madera y los tubos de pvc fueron M3 con tuercas autoblocantes.



Fig 205. Materiales del prototipo. Domo Desplegable D30.

Análisis de Tensiones y Deformaciones del Domo D30

Con el diseño paramétrico del domo desplegable D30 se considero la opción de hacer un análisis de tensiones y deformaciones simulando el uso de materiales de carácter más arquitectónico como aluminio. También era importante considerar los posibles puntos débiles del análisis teórico en la construcción del prototipo a escala humana. Para el análisis de tensiones y deformaciones se uso el plugin Millipede, un componente de Grassgopper 3D, que se enfoca en el análisis y optimización de estructuras.

El objetivo de hacer el análisis grafico de tensiones y deformaciones es poder determinar con más precisión el posible comportamiento de la estructura o prototipo a escala real, y prever los posibles fallos, dando soluciones constructivas viables. Hay que mencionar que existen muy pocos antecedentes escritos sobre la fabricación y montaje de este tipo de estructuras en escala humana. Por esto la importancia del análisis de tensiones y deformaciones, previo a la construcción del prototipo real. En ningún caso se quiere hacer un modelo de cálculo.

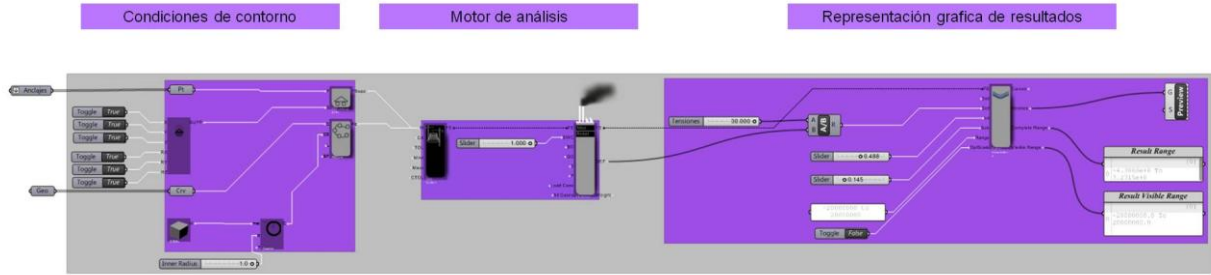


Fig 206. Algoritmo en Grasshopper + Millipede. Análisis grafico de tensiones y deformaciones.

Para el análisis grafico de tensiones y deformaciones se debe tener definido la geometría vectorial de la estructura a analizar, que en este caso es el domo desplegable D30 en su estado de uso, y los puntos de anclaje o apoyo. Una vez definido la geometría y apoyos, se definen las condiciones de contorno. Para nuestro caso de estudio tenemos que definir el tipo de apoyo y sus posibles rotaciones en xyz. Definimos apoyos con traslación en xyz, y rotación en xyz, ya que la estructura es auto-portante. Luego se define el tipo de material y sección. En el análisis se trabajo con Aluminio, y una sección tubular hueca de 1cm de diámetro y una pared de 1mm.

Luego se aplica el motor de análisis de carga, donde se conectaran los datos de apoyos, geometría y estructura y construye el modelo de análisis real. Finalmente se conecta el solucionador grafico que nos dará los resultados del análisis de acuerdo a los datos ingresados. Para nuestro caso marcamos una variable de deflexión que nos indicara las tensiones y deformaciones según el cambio de iteración.

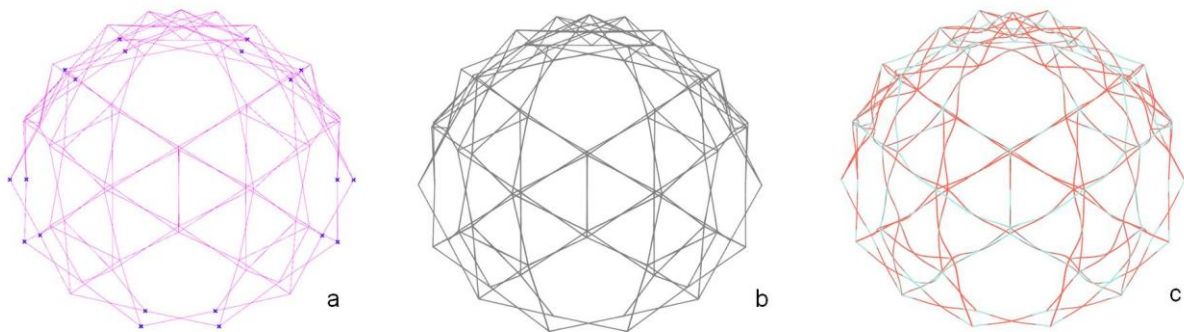


Fig 207. (a) Condiciones de contorno. (b) Motor de análisis. (c) Resultado grafico de tensiones y deformaciones.

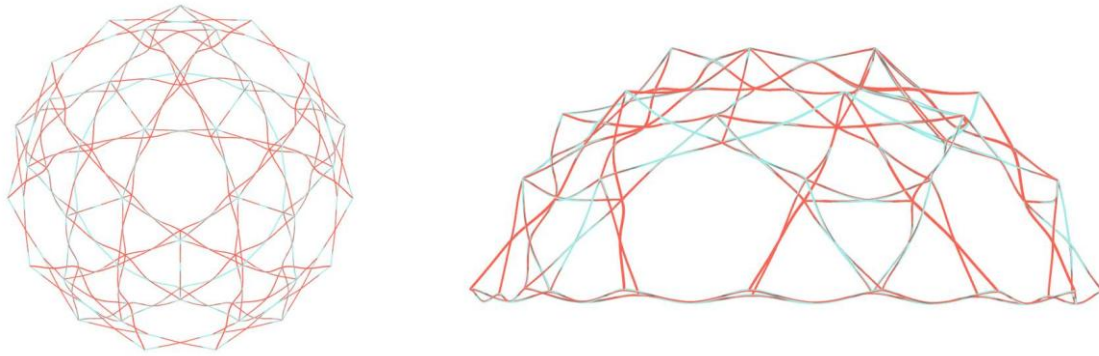


Fig 208. Domo desplegable D30. Análisis grafico de tensiones y deformaciones.

Los resultados obtenidos para un domo desplegable con barras de aluminio son:

	N° Barras	N° Uniones hexagonales	Tornillos	Tuercas	Area	Peso	Deflexión
Domo D30	180 un	80 un	480	480	30 mts ²	81kg	0,269mm

Tabla. Domo desplegable D30. Resultados de análisis de tensiones y deformaciones.

Prototipo Domo Desplegable D30

La construcción del domo desplegable D30 se realizó dentro del taller sobre estructuras desplegables impartido en la escuela de arquitectura de la Universidad Abdullah Gull, Kayseri, Turquía. Con la colaboración de los estudiantes de último semestre. El objetivo del taller era dar los conceptos básicos sobre el diseño de sistemas desplegables con barras rectas articuladas y hacer prácticas con maquetas a escala para finalmente hacer la fabricación y ensamblado del prototipo a escala humana. Durante el taller los estudiantes tuvieron la posibilidad de hacer una práctica de diseño paramétrico usando Rhinoceros + Grasshopper.

El proceso de montaje se realizó por módulos desplegables hexagonales y ensamblados de anillos. Primero se ensamblaron los 5 módulos hexagonales, formando un pentágono vacío, y así completando el primer anillo. Luego se ensamblaron los 5 medios módulos hexagonales formando la curvatura geodésica. Y finalmente se cierra el anillo exterior o base del domo desplegable con 5 unidades simples asimétricas.

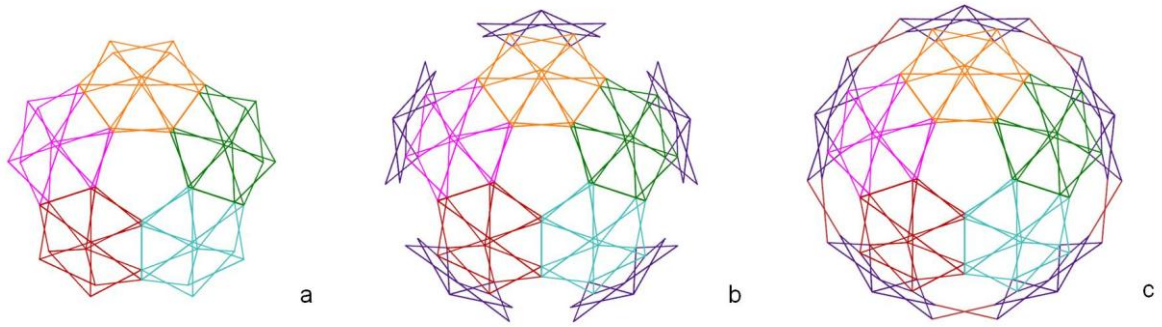


Fig 209. Domo desplegable D30. (a) Primer anillo. (b) Segundo anillo. (c) Cierre del perímetro o base.

Por otro lado el diseño paramétrico también permitió hacer un diseño básico para el patrón de la cubierta textil. Siguiendo la geometría de los módulos hexagonales.

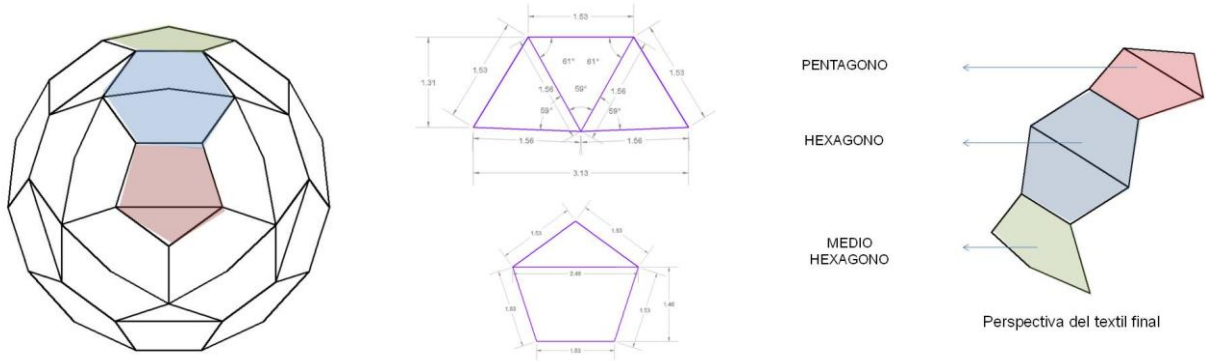


Fig 210. Domo desplegable D30. Patrón de la cubierta textil exterior.

Para el caso de estudio se trabajó en una cubierta de la capa exterior del domo desplegable, usando las uniones compuestas hexagonales como puntos de anclaje de los módulos textiles. Es importante mencionar que el domo desplegable D30 tiene la opción de poderse cubrir por la superficie interna. De este modo la cubierta textil puede ser interna, externa o ambas.



Fig 211. Domo desplegable D30. Proceso de montaje.

La estructura del domo desplegable presento ligeras deformaciones de las barras durante el proceso de pliegue y despliegue, provocados por la geometría de agrupación entre módulos hexagonales y vacios pentagonales. Deformaciones esperadas y vistas anteriormente en las maquetas a escala y por la rotura geométrica en el diseño digital. Las barras en madera contrachapada de 12 milímetros de espesor admitían la deformación presente en el proceso de despliegue, y recuperaban su forma al estar el domo en su posición de uso.

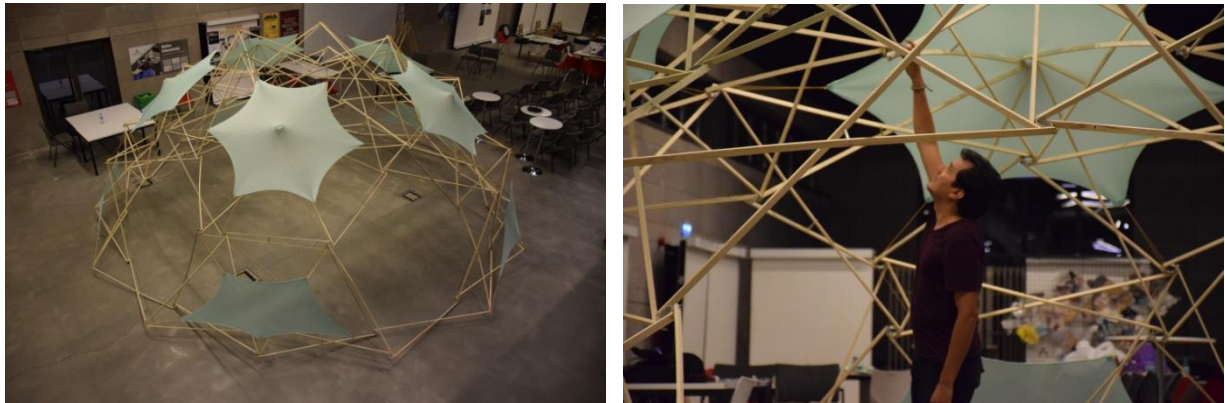


Fig 212. Domo desplegable D30. Universidad Abdullah Gull, Kayseri, Turquía.

Sistema de Control Limite de Movimiento Domo D30

Si bien la estructura desplegable del domo D30 es auto portante y no requiere de elementos adicionales para su estabilidad en su posición de uso. Es necesario diseñar un sistema de bloqueo para que garantice que la estructura no regresa su movimiento. Recordemos que durante la etapa de pliegue o despliegue hay que superar una tensión adicional a causa de la geometría, que se traduce en una pequeña deformación de las barras. Pasada esa etapa de tención las barras recuperan su forma. Por temas de seguridad se diseño un mecanismo que impida el regreso de movimiento del domo.

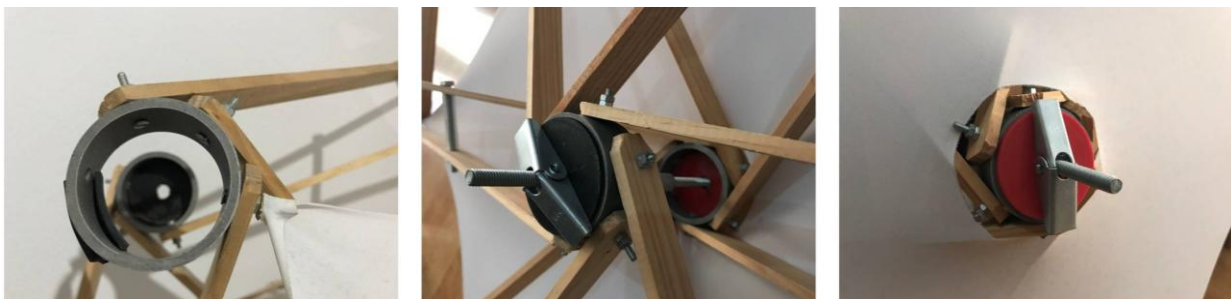


Fig 213. Domo desplegable D30. Sistema bloqueo de movimiento.

El sistema de bloqueo de movimiento se puede colocar en cualquiera de los centros de los módulos hexagonales del domo. Y solo requiere de 1 solo mecanismo, ya que la estructura solo tiene un grado de libertad, bloqueando así todo el movimiento del domo.

El domo D30 fue usado en varios eventos académicos e instalado en espacios interiores y exteriores. Una de las ventajas más destacadas es la de sus tiempos de montaje y desmontaje. En 5 minutos y con la ayuda de tres personas es posible hacer el montaje y despliegue de la estructura. Su fácil transportabilidad es también otra de las ventajas del domo desplegable, teniendo en cuenta que en su posición de uso ocupa un área de 30 metros cuadrados con un peso de 42kg con barras de madera contrachapada y tornillos y tuercas M3.



Fig 214. Domo desplegable D30. Estudiantes del taller sobre Estructuras Desplegables. Universidad Abdullah Gull, Kayseri, Turquía. 2017



Fig 215. Domo desplegable D30. Universidad Abdullah Gull, Kayseri, Turquía. 2017

Luego de la primera experiencia constructiva del domo D30 se fabrico y construyo otro domo desplegables en Belo Horizonte, Brasil. En esta oportunidad se fabricaron las uniones hexagonales con impresión 3d en ABS. Y se logro completar la cubierta textil, según el patrón por módulos hexagonales. La estructura presento una mejora en la fluidez del movimiento, pero durante el proceso de pliegue o despliegue alguna unión hexagonal presentaba rotura, debido a la tensión que transmitían las barras durante el movimiento. El domo desplegable se fabrico y construyo en colaboración con el Profesor Hugo Matos, y sus estudiantes de la escuela de arquitectura de la Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais.



Fig 216. Domo desplegable D30. Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais. 2018

Geometrías Alternativas Domo D30

Las posibilidades de otras configuraciones geométricas alternativas del domo D30 pasan por las variaciones en cuanto a las frecuencias de sub división geodésica del icosaedro. Si bien es posible aumentar la frecuencia y así hacer un domo desplegable con más metros cuadrados construidos, será necesario el uso de grúas para el montaje y desmontaje de la estructura. Opción que valdría la pena explorar y construir.

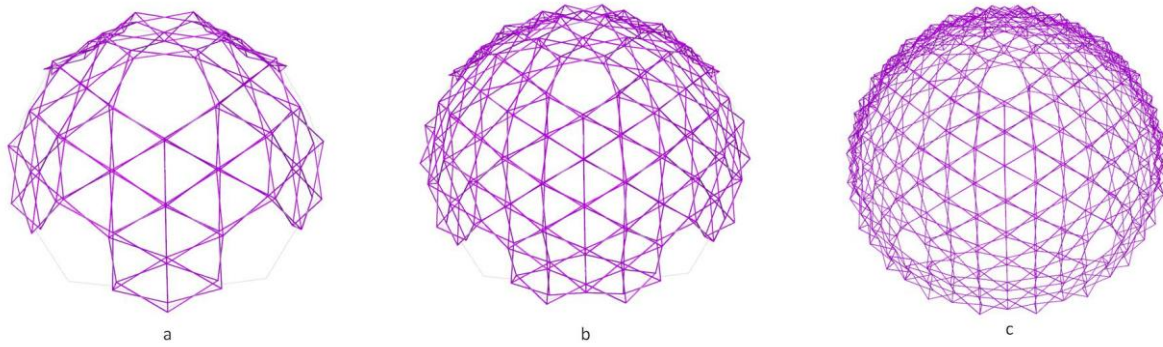


Fig 217. (a) Domo desplegable frecuencia 2. (b) Domo desplegable frecuencia 3. (c) Domo desplegable frecuencia 4.

Otras de las posibles variaciones del domo desplegable D30 es usar el mismo patrón de agrupación por módulos hexagonales y vacíos pentagonales, y discretizar la geometría para buscar nuevas agrupaciones. Es posible que estas nuevas geometrías requieran de elementos externos para lograr la estabilidad de la estructura.

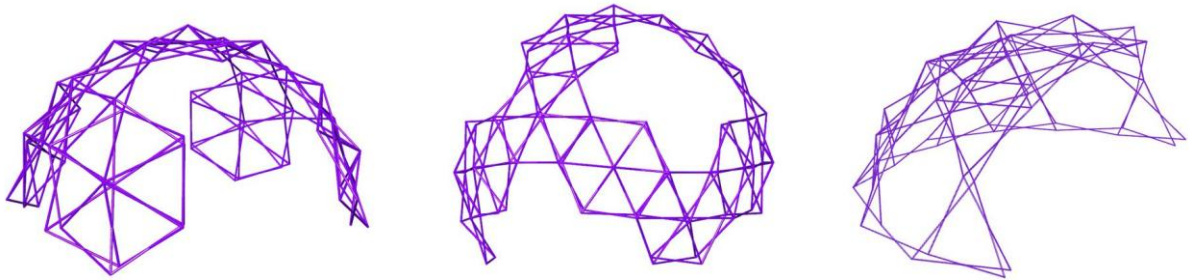


Fig 218. Variaciones geométricas de domos desplegables.

Caso de estudio 02 - Sistemas Desplegables Abiertos

Los sistemas desplegados abiertos, son estructuras que requieren de elementos adicionales al sistema para estar en equilibrio en su estado de uso o despliegue. Esto quiere decir que la estructura no es auto portante en su estado de uso o despliegue, y que requiere de elementos adicionales como barras, cables o en algunos casos textiles para estar en equilibrio. El caso de estudio que presentamos como sistema desplegado abierto, está formado por arcos desplegados de sección triangular, que orientados con determinada geometría forman una estructura desplegable.

En este caso de estudio describiremos la construcción geométrica, el diseño paramétrico del arco desplegado, y sus agrupaciones. Se aplicaran condiciones básicas de contorno para el análisis de tensiones y deformaciones de la estructura y los procesos de fabricación y montaje del prototipo a escala humana.

Construcción Geométrica del arco desplegado

La geometría de pabellón Vertex, nace de la hipótesis de diseñar y construir una estructura desplegable de mediana escala que no fuera una agrupación de módulos siguiendo una superficie definida. Como en el caso anterior la agrupación de módulos hexagonales siguiendo la geometría geodésica de un icosaedro en frecuencia 3. La idea era diseñar una estructura desplegable compleja con elementos constructivos desplegables. Así como en la arquitectura convencional la agrupación de columnas y vigas forman un sistema estructural espacial, para el caso de estudio se quería una estructura desplegable con la agrupación de elementos constructivos.

El elemento constructivo seleccionado para el diseño del Vertex, fue el arco. La idea de un arco desplegado como elemento constructivo ya se ha planteado con anterioridad en algunas propuestas y exploraciones hechas por el Arquitecto Dr. Felix Esrig, en colaboración con el Arquitecto Dr. José Sánchez Sánchez, y el Arquitecto Dr. Juan Pérez Valcárcel, donde se exploraba la agrupación de módulos triangulares para la construcción de un arco desplegado.



Fig 219. Sistema construido por aspas de barras iguales pero articulaciones excentricas. (Esrig F. , 2012)

El objetivo era diseñar un arco desplegable y agruparlo de tal forma que se tuviera un espacio construido de escala intermedia. El arco desplegable con barras rectas articuladas más simple es el formado por unidades simples asimétricas. Si la asimetría es aproximada a cero, el arco tendrá una proyección de curvatura cercana a una línea recta. Si la asimetría de la unidad simple aumenta, el arco tendrá una proyección de curvatura más pronunciada.

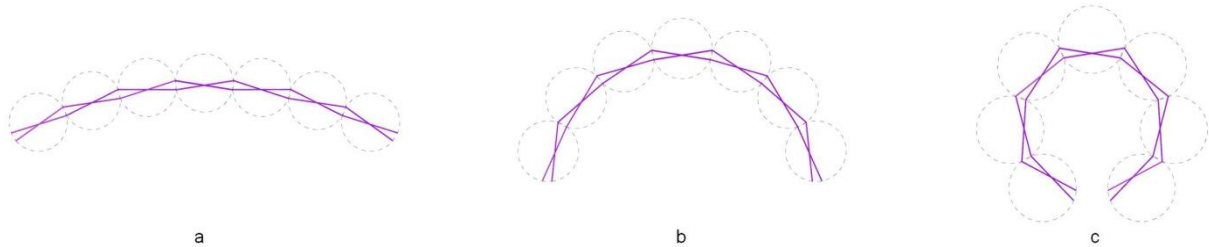


Fig 220. Arco desplegable axial con 7 unidades simples asimétricas.
(a) Asimetría próxima a cero. (b) Asimetría intermedia. (c) Asimetría próxima a máxima posible.

Con el principio de agrupación de las unidades simples asimétricas del arco axial desplegable, es posible construir tres tipos de agrupación espacial por módulos. Un primer arco desplegable con módulos en forma de prisma de base triangular, un segundo arco con módulos desplegables cuadrados y un tercero con módulos desplegables hexagonales.

La opción seleccionada para este prototipo fue el arco de sección triangular. Primero por ser la geometría más estable (el triángulo), y segundo que usa menos elementos rectos que ayuda a que sea más ligero y consuma menos material. Otro punto a su favor es la estabilidad durante el proceso de despliegue y en su estado de uso. Recordemos que las EDBRA las definimos como sistemas estructurales nerviosos, al tener tantas articulaciones produce una inestabilidad de movimiento. De los tres tipos de arcos desplegables el de sección triangular es el que menos articulaciones tiene.

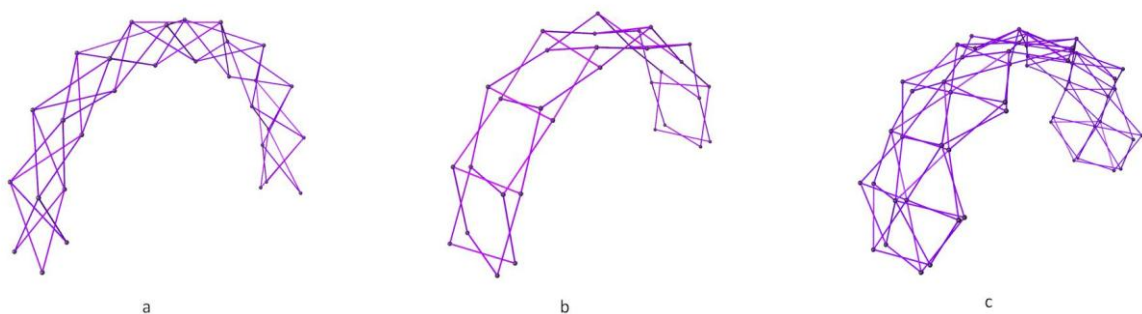


Fig 221. Tipos de arcos desplegables. (a) Módulo triangular. (b) Módulo cuadrado. (c) Módulo hexagonal.

Diseño Paramétrico del Arco Desplegable

El diseño paramétrico para un arco desplegable está en formar un módulo de barras articuladas de sección triangular. El módulo está formado por 3 pares de unidades simples desplegables. Una unidad simple simétrica o con la articulación en su centro, y dos unidades simples asimétricas o con su centro desplazado. Las tres unidades simples están inscritas en un prisma de base triangular. La curvatura del arco desplegable espacial esta dado por los dos pares de tijeras con sus centros desplazados o unidades asimétricas. Si la articulación asimétrica de las barras está más lejos del centro de las barras, la curvatura será más pronunciada. Y si la articulación asimétrica está más cercana al centro de las barras la curvatura será más suave. Por tanto la asimetría del par de tijeras es la que define la curvatura del arco desplegable.

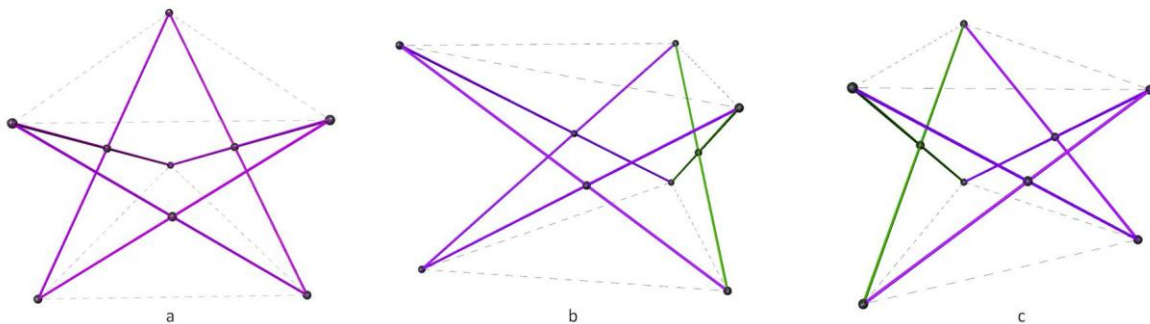


Fig 222. Tipos módulos desplegables con sección triangular.
(a) Módulo simétrico. (b) Módulo asimétrico interior. (c) Módulo asimétrico exterior.

El movimiento del módulo desplegable es en el sentido de las barras asimétricas. El módulo en su estado cerrado es cuando sus 3 pares de barras forman casi una sección triangular. Y su posición abierta es cuando las barras estén casi en posición vertical respecto a su base triangular. Los nodos de unión entre las unidades simples son articulaciones compuestas en dos direcciones para permitir la correcta angulación y desplazamiento durante el proceso de pliegue y despliegue. Como se observa en la figura anterior es posible la construcción de dos módulos asimétricos con sección triangular. Un primer módulo con asimétrica interior nos indica que las unidades simétricas están hacia el interior del arco. Y un segundo módulo con asimetría exterior, indica que las unidades simétricas están hacia el exterior del arco.

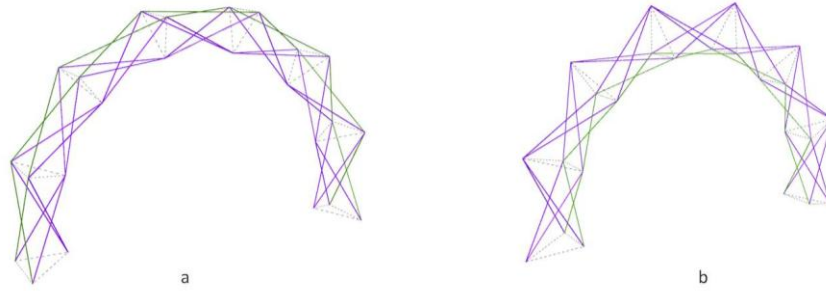


Fig 223. Tipos de arcos desplegables con sección triangular según módulo.
 (a) Módulo asimétrico exterior. (b) Módulo asimétrico interior.

El módulo desplegable de sección triangular se puede agrupar de forma lineal en el sentido de la curvatura dada por la asimetría de sus barras. La unión de los pares de tijeras asimétricas del módulo, forman una cresta o punta deformada que indica el sentido de la curvatura de giro. La repetición del módulo en la dirección de la curvatura forma un arco desplegable espacial. La cantidad de módulos para formar un arco desplegable dependerá de la asimetría del módulo. Para el caso de estudio se usara el arco con los módulos desplegables con asimetría exterior.

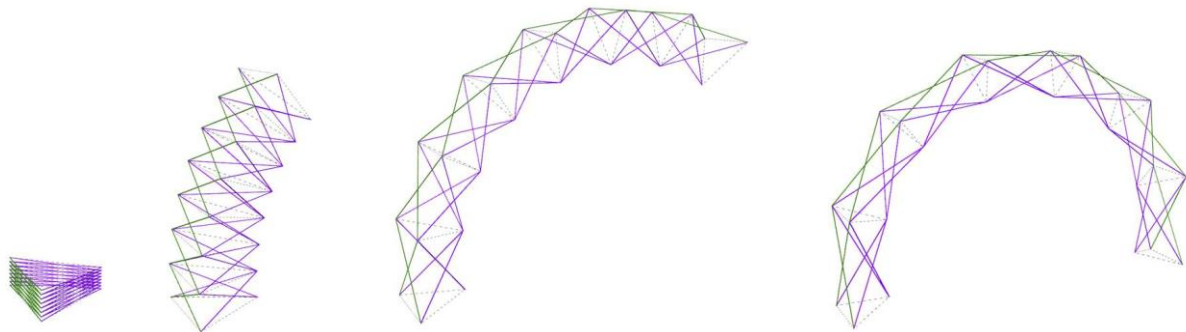


Fig 224. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Proceso de despliegue.

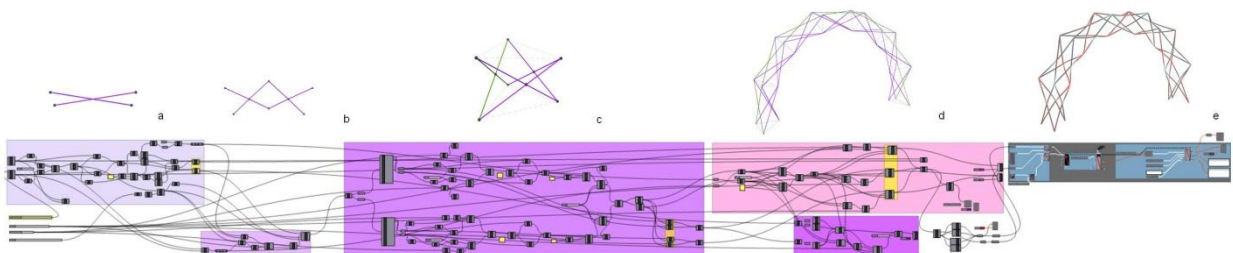


Fig 225. Algoritmo arco desplegable A7 en Grasshopper + Millipede.
 (a) Unidad simple asimétrica. (b) Par de unidades con eje central. (c) Modelo triangular desplegable. (d) Arco desplegable.
 (e) Análisis de tensiones y deformaciones.

La unión lineal de varios módulos desplegables en dirección con la curvatura de sistema da como resultado un arco desplegable espacial. El arco desplegable tiene tres estados de movimiento. El primer estado es el cerrado o de almacenamiento. Es cuando los módulos en su máxima posición de apertura forman una sección triangular. El segundo es su estado de movimiento o de despliegue. Es cuando el sistema se está moviendo hasta lograr su estado final. Y el tercer estado es el de uso. Es cuando el sistema está formando geoméricamente un arco estable y es su posición final de uso. El arco desplegable en su estado de uso debe de tener un elemento rígido adicional en cualquiera de sus módulos para bloquear el movimiento y fijar la geometría final de uso del arco. El sistema tiene un solo grado de libertad, por lo que bloquear un solo módulo es suficiente para bloquear el movimiento de todo el sistema.

Condiciones Constructivas y de Materiales

Como se ha mencionado en este capítulo, uno de los objetivos de esta investigación es la factibilidad constructiva de las EDBRA y sus posibles aplicaciones en la arquitectura. En este sentido las maquetas y prototipos usados para la exploración y soluciones constructivas han servido para definir el uso de materiales de bajo costo y de fácil acceso, como la madera contrachapada o en algunos casos madera de pino. Y para las uniones se han usado anillos de pvc como mecanismos de articulación compuesto para las unidades simples desplegables.

Para nuestro caso de estudio, el arco desplegable está formado por 7 módulos. Cada módulo está formado por 3 unidades simples despegables, una unidad simétrica y dos unidades asimétricas. Y 6 articulaciones compuestas que unen las unidades simples desplegables para formar el módulo. Por tanto un módulo desplegable está formado por 6 barras rectas y 6 articulaciones compuestas. El total de elementos para la construcción de arco desplegable con 7 módulos triangulares es;

Barras simétricas:	14un
Barras asimétricas:	28un
Uniones compuestas:	24un



Fig 226. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Maqueta con barras de madera contrachapada y uniones en tubos de pvc.

Para las articulaciones compuestas se exploró el uso de anillos con tubos de pvc pero esta vez se decidió que el anillo tuviera doble capa de puntos de articulación. Es decir que una misma articulación compuesta recibiera las barras del primero módulo en una capa o eje de unión, y en una segunda capa o eje se conectarán las barras del siguiente módulo. Esta solución constructiva da fluidez al movimiento del arco.

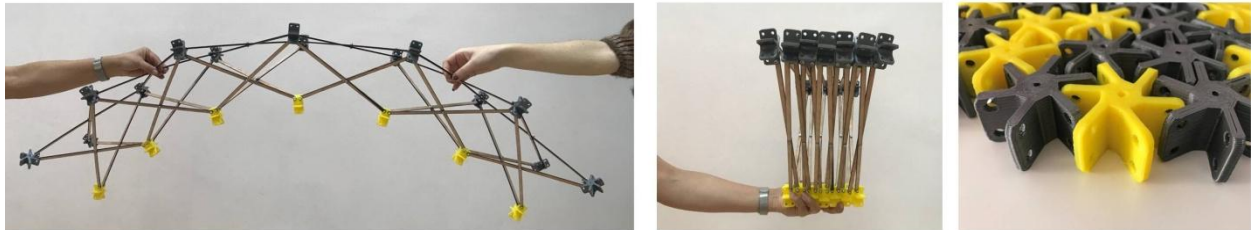


Fig 227. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Maqueta con barras de madera contrachapada y uniones impresas en 3d en PLA.



Fig 228. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Maqueta con barras en metacrilato cortadas a laser y uniones impresas en 3d en PLA.

Descripción Geométrica del Vertex

La propuesta geométrica del pabellón Vertex tiene dos formas de ser descritas. Por un lado la geometría del arco desplegable. Y por otro lado la agrupación que hace posible la configuración final de la estructura. Teniendo en cuenta la manipulación manual de los elementos que conforman el arco desplegable y el arco en sí mismo, las dimensiones propuestas deberían ser contempladas para su fácil control y manejo. Tanto para la estructura en su estado cerrado como en la posición de uso de los arcos en su conjunto.

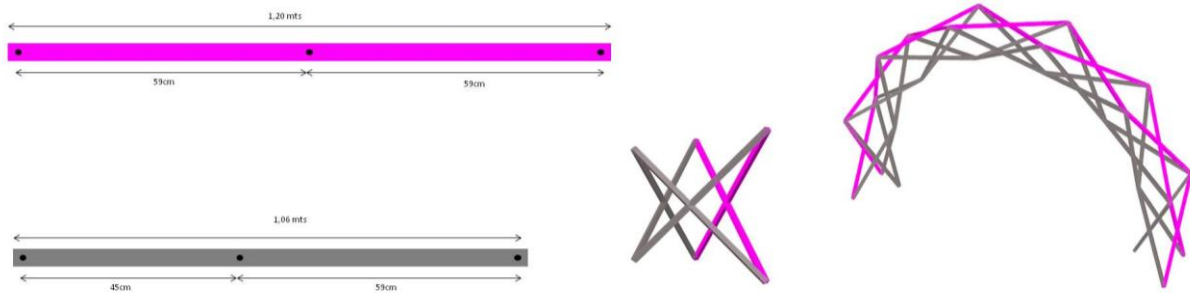


Fig 229. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Geometría de los elementos.

El arco desplegable está formado por 7 módulos triangulares, cada módulo desplegable está formado por una unidad simple simétrica y dos unidades simples asimétricas. La unidad simple simétrica está formada por barras de 1,20 mts de longitud, y las unidades asimétricas están formadas por barras de 1,06 mts de longitud. El arco en su estado abierto ocupa un área de 2,7mts cuadrados, y una habitabilidad de 2mts cuadrados aprox.

Estas dimensiones fueron controladas y definidas previamente en el diseño paramétrico para lograr una forma de arco que pudiera ser transitable en su interior, a fin de agruparlos para formar la geometría final de la estructura. La altura del arco en su estado de uso es de 2,56mts, con una longitud de cobertura de 3,9mts. En su estado cerrado o de transporte ocupa un área de 0,5mts cuadrados, y una altura de 35cm.

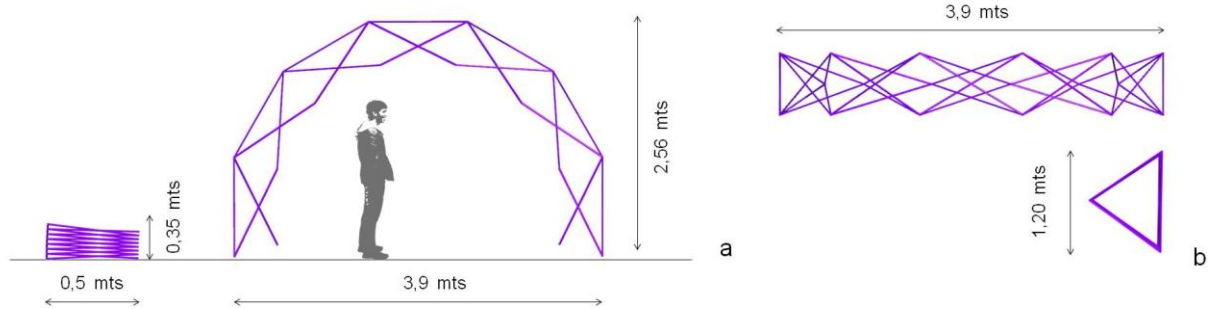


Fig 230. Arco desplegable con módulos triangulares con asimetría exterior. Geometría del arco.

Una vez definida la geometría del arco desplegable, el siguiente paso era definir el tipo de agrupación a usar para configurar la forma final del prototipo. Como se ha mencionado antes la idea era hacer una agrupación no continua del arco desplegable, la cual nos daría como resultado una bóveda de cañón si proyectamos el arco en el eje transversal a su despliegue.

Por tanto se decidió hacer una agrupación radial, que daría mayor rigidez al sistema, pensado en cubrirlo con una membrana textil. Y la agrupación geométrica mas estable es el triangulo, que a su vez continua

con la geometría de sección triangular del arco desplegable. El arco se puede agrupar en 3 arcos desplegables de igual tamaño y geometría con forma triangular en su base que forma una cascara ligera y habitable. Cada arco desplegable de igual tamaño debe estar abierto o desplegado en el mismo estado de uso. Esto permite que los módulos que están de apoyo propio de cada arco se puedan unir entre sí formando un triángulo en su base al unir los tres arcos desplegables. Las esquinas coincidentes de los módulos de base de cada arco desplegable se unirán de forma mecánica según su pieza de doble articulación.

Esta operación de agrupación radial de los arcos desplegables se puede repetir incrementando el número de arcos desplegables las veces que sea posible. Entre más arcos desplegables, mas grande el diámetro de la estructura final proyectada.

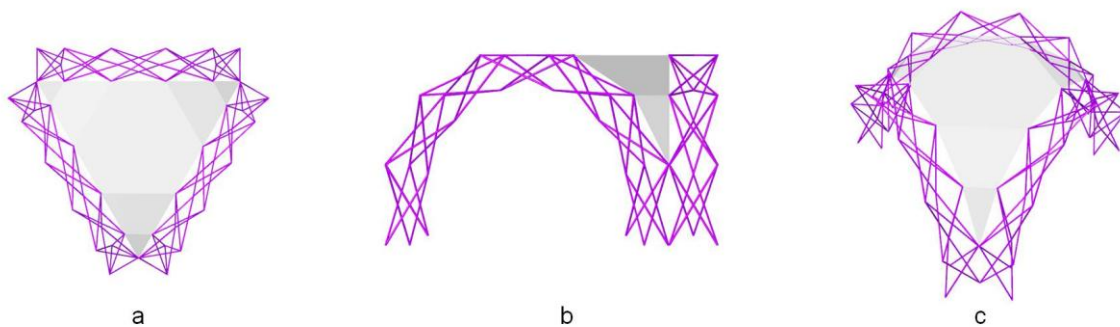


Fig 231. Pabellón Vertex. Núcleo central. (a) Vista aérea. (b) Vista lateral. (c) Vista isométrica.

Finalmente se tomo la decisión de ampliar los 3 accesos formando un túnel en cada uno de ellos. Estos túneles se proyectaron con dos arcos desplegables adicionales que incrementaban la longitud de barra para aumentar la abertura de cada túnel progresivamente. El incremento geométrico del núcleo triangular formado por los 3 arcos desplegables, hizo que la estructura final no resultara en equilibrio por si misma al ser puesta la cubierta textil. Problema que se resolvió añadiendo cables de vientos para asumir la tensión hacia el interior de la estructura provocada por la cubierta textil.

Como se observa en las figuras, la geometría final del Vertex cuenta con 9 arcos desplegables que incrementan sus dimensiones de barra de adentro hacia afuera a manera de anillos. El área cubierta por la estructura desplegable es de 90 metros cuadrados en su posición de uso.

Para la construcción del pabellón Vertex se uso igualmente materiales de fácil acceso, como tubos de pvc para las uniones y tornillos y tuercas M3. En este caso la madera usada fueron barras de madera contrachapada cortadas a medida.

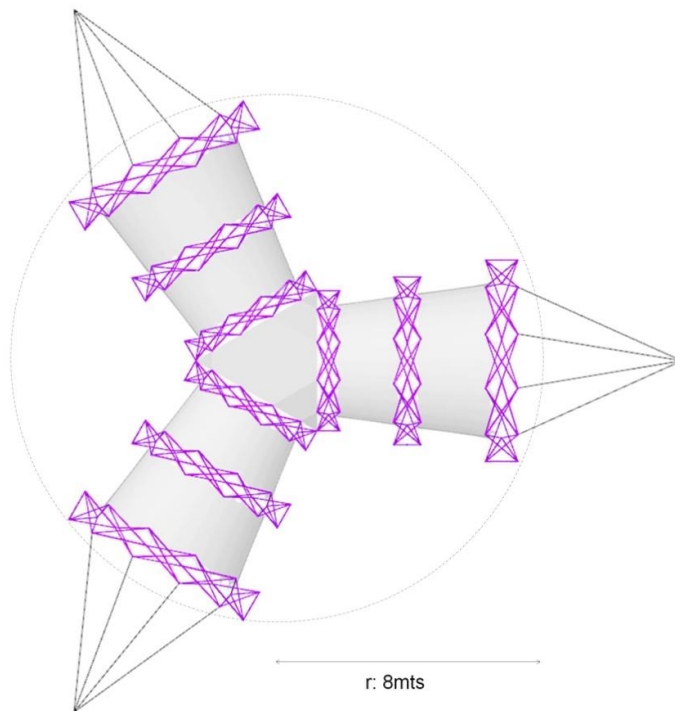


Fig 232. Pabellón Vertex. Geometría vista en planta.

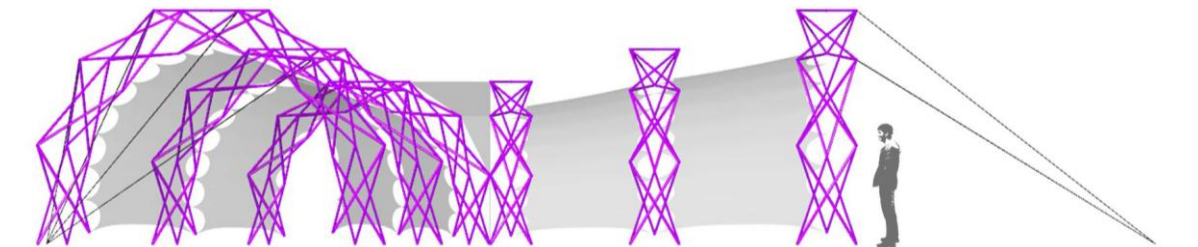


Fig 233. Pabellón Vertex. Geometría vista en alzado.

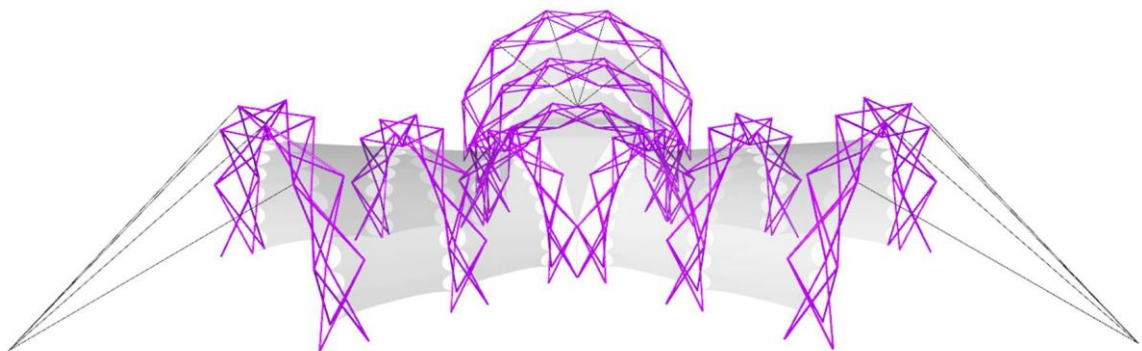


Fig 234. Pabellón Vertex. Geometría vista perspectiva.

Modelo Grafico de Control de Movimiento por Tracción

Continuado con la metodología de diseño paramétrico de las EDBRA, el siguiente paso es el control de movimiento por tracción para los arcos desplegables. Como se explico en el capítulo anterior, para los sistemas desplegables abiertos es necesario el uso de elementos adicionales para controlar la posición final o de uso de la estructura. Y por medio de una simulación por relajación dinámica poder tener datos aproximados como el ángulo de incidencia para la asimetría de las barras o la distancia final entre las uniones compuestas para diseñar los elementos de bloqueo.

Para nuestro caso de estudio del arco desplegable, aplicamos el método de control de movimiento límite por tracción. Esta simulación por relajación dinámica nos definirá datos geométricos como longitud de barra, asimetría, posición final de uso de la estructura y distancia entre uniones compuestas para el diseño de los elementos de bloqueo de movimiento. Con el uso de Rhinoceros + Grasshopper + Kangaroo, conectamos la geometría del arco desplegable en el algoritmo diseñado para aplicar una carga de movimiento e incorporar los cables que actuaran como elementos de tracción y freno de la estructura.

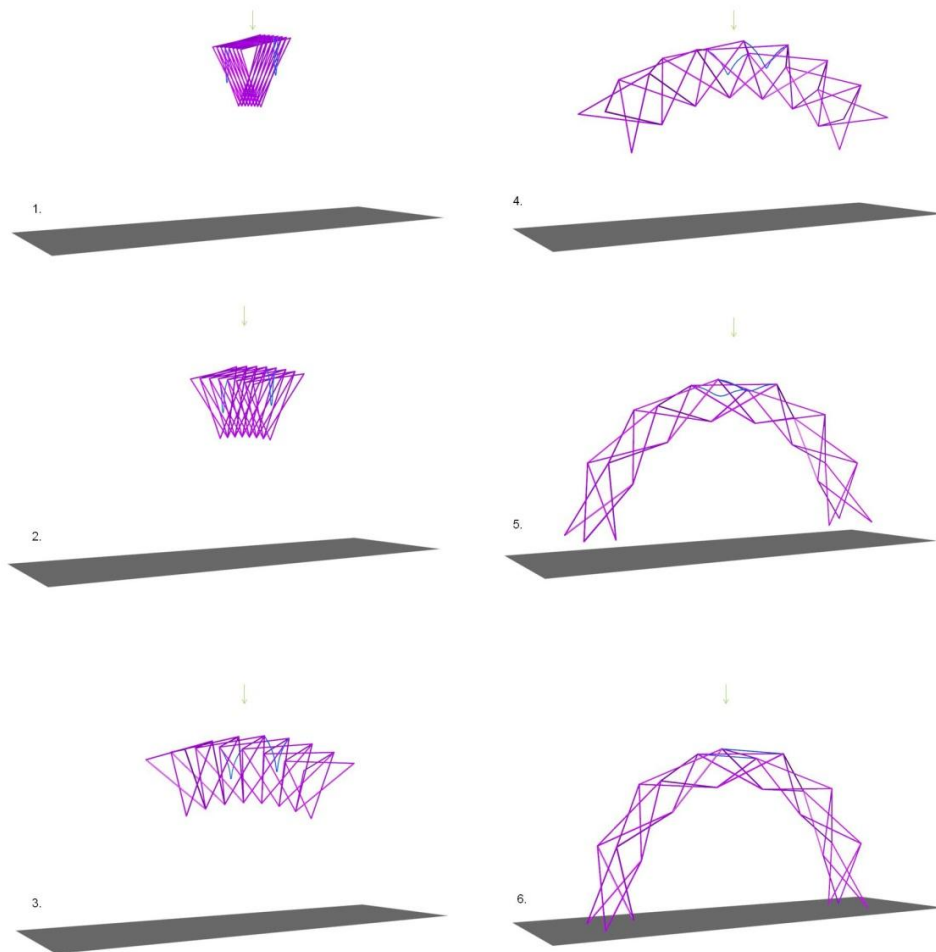


Fig 235. Modelo grafico del algoritmo para el control límite de movimiento por tracción de un arco desplegable con módulos triaxiales triangulares y plano de referencia.

	Modulos	Fuerza (F)	Tracción (t)	Rigidez (s)	Asimetría	Angulo de uso	Distancia (cable)
a	7	10	120	225	14	34,5°	70cm

Fig 236. Datos del modelo de control limite de movimiento por tracción para un arco desplegable de sección triangular.

Para el modelo de simulación de control límite de movimiento se uso un arco desplegable formado por 7 módulos de sección triangular. Aplicando los valores de fuerza, tracción, rigidez y ángulo de incidencia de para las unidades asimétricas, obtenemos la distancia final de los puntos de apoyo de la estructura en su posición de uso. Cada uno de estos valores pueden ser modificados según los requerimientos de diseño, en nuestro caso de estudio los valores están enfocados a tener un arco desplegado con puntos de apoyo coplanares a una superficie y una geometría definida previamente para su uso.

La idea de hacer un modelo de simulación por relajación dinámica para el control limite de movimiento de un arco desplegable con sección triangular, es la de tener datos constructivos y geométricos mas aproximados previos a la construcción física del prototipo a escala humana. El modelo permite hacer comprobaciones y cambios en las variables como numero de módulos, ángulo de incidencia y control de distancias entre puntos de anclaje según los requerimientos de diseño.

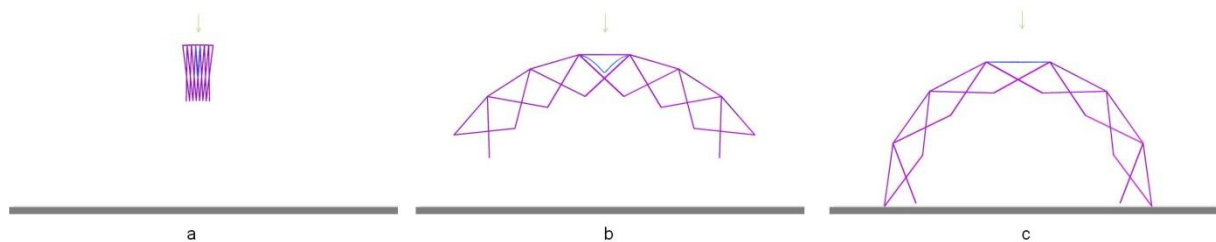


Fig 237. Modelo grafico del algoritmo para el control límite de movimiento por tracción de un arco desplegable con módulos triaxiales triangulares y plano de referencia. Vista lateral.

Para el caso de estudio, los datos geométricos y las distancias de los puntos de apoyo del arco desplegable sirven para diseñar los elementos rígidos que servirán como bloqueo de movimiento. Adicionalmente tener la geometría final del arco desplegable y el área de ocupación en su posición final ayuda a controlar los procesos de instalación.

Análisis de Tensiones y Deformaciones del arco desplegable

Teniendo definida la geometría final del arco desplegable y siguiendo con los procesos de diseño paramétrico también se considero la opción de hacer un análisis de tensiones y deformaciones simulando el uso de materiales de carácter más arquitectónico como aluminio. También era importante considerar

los posibles puntos débiles del análisis teórico en la construcción del prototipo a escala humana. Para el análisis de tensiones y deformaciones se usó el plugin Millipede, un componente de Grasshopper 3D, que se enfoca en el análisis y optimización de estructuras.

El objetivo de hacer el análisis gráfico de tensiones y deformaciones es poder determinar con más precisión el posible comportamiento de la estructura o prototipo a escala real, y prever los posibles fallos, dando soluciones constructivas viables. Hay que mencionar que existen muy pocos antecedentes escritos sobre la fabricación y montaje de este tipo de estructuras en escala humana. Por esto la importancia del análisis de tensiones y deformaciones, previo a la construcción del prototipo real.

Es importante mencionar que el modelo de análisis gráfico de tensiones y deformaciones no es un cálculo estructural que define resultados e informes a nivel ingenieril. Es un modelo de aproximación simple en el que se puede hacer una simulación gráfica de tensiones y deformaciones válido para hacer hipótesis constructivas previas a la fabricación y construcción del prototipo. Siguiendo con una metodología de uso del diseño paramétrico para el diseño de EDBRA.

Para el modelo de tensiones y deformaciones primero se aplicó a la geometría del arco desplegable, y posteriormente al núcleo central del Pabellón Vertex formado por tres arcos agrupados en forma triangular. Para el arco desplegable se definieron unas condiciones de contorno básicas. La geometría y los puntos de anclaje. Los puntos de anclaje son tri-articulados y con desplazamientos en xyz.

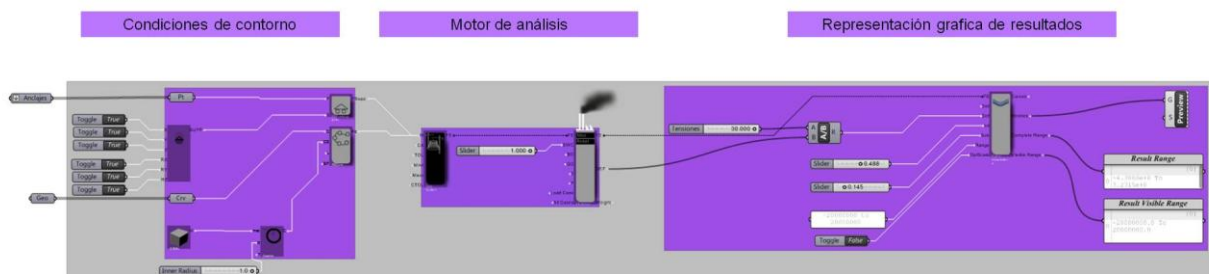


Fig 238. Algoritmo en Grasshopper + Millipede. Análisis gráfico de tensiones y deformaciones.

Para nuestro caso de estudio tenemos que definir el tipo de apoyo y sus posibles rotaciones en xyz. Definimos apoyos con traslación en xyz, y rotación en xyz, ya que la estructura es auto-portante. Luego se define el tipo de material y sección. En el análisis se trabajó con Aluminio, y una sección tubular hueca de 1cm de diámetro.

Luego se aplica el motor de análisis de carga, donde se conectarán los datos de apoyos, geometría y estructura y construye el modelo de análisis real. Finalmente se conecta el solucionador gráfico que nos

dará los resultados del análisis de acuerdo a los datos ingresados. Para nuestro caso marcamos una variable de deflexión que nos indicara las tensiones y deformaciones según el cambio de iteración.

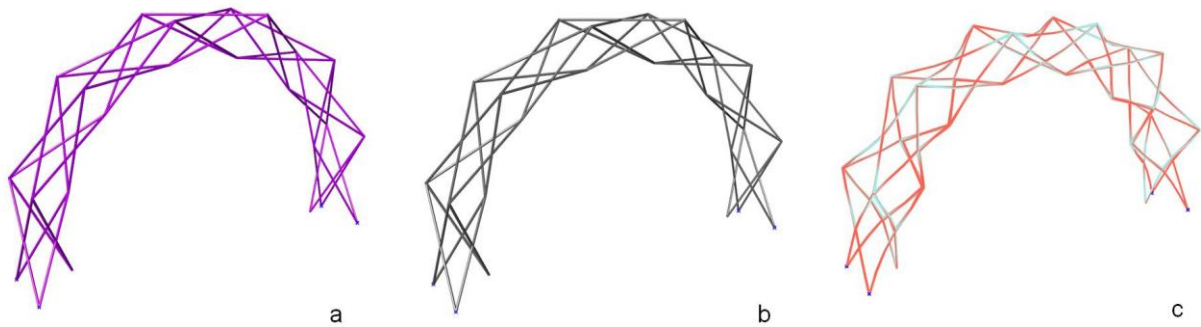


Fig 239. (a) Condiciones de contorno. (b) Motor de análisis. (c) Resultado grafico de tensiones y deformaciones.

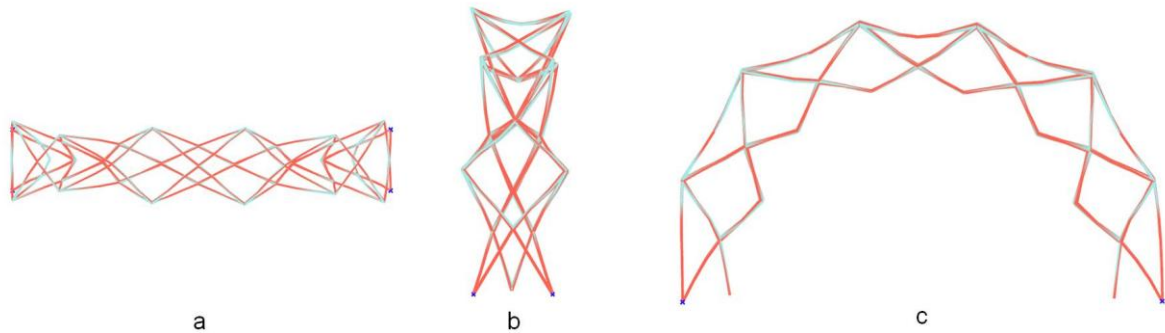


Fig 240. Arco desplegable A7 con sección triangular. Análisis grafico de tensiones y deformaciones.
(a) Vista en planta. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal.

Los resultados obtenidos para un arco desplegable con sección triangular y barras de aluminio son:

	N° Barras	N° Uniones hexagonales	Tornillos	Tuercas	Area	Peso	Deflexión
Arco Desplegable	42un	24un	84un	84un	2mts2	14,9kg	0,399mm

Fig 241. Arco Desplegable A7. Resultados de análisis de tensiones y deformaciones.

El modelo grafico de tensiones y deformaciones también se aplico para el núcleo central del Pabellón Vertex. Para este caso se contemplo la agrupación de los arcos conectando los nudos o articulaciones compuestas de los módulos finales de cada extremo de los arcos. Adicionalmente se incorporo en el

análisis la cubierta textil, que para el modelo de simulación fue usado el GFRP (Glass-Fiber Reinforced Plastic) o plástico reforzado con fibra de vidrio.

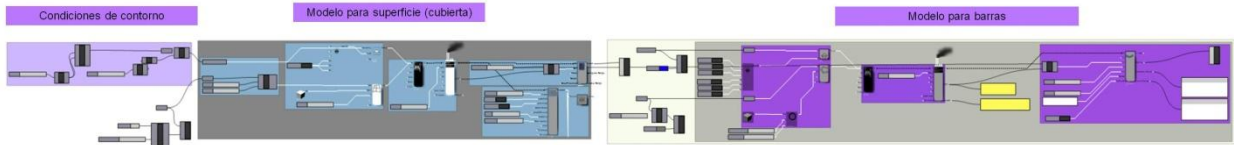


Fig 242. Algoritmo en Grasshopper + Millipede. Análisis gráfico de tensiones y deformaciones. Pabellón Vertex.

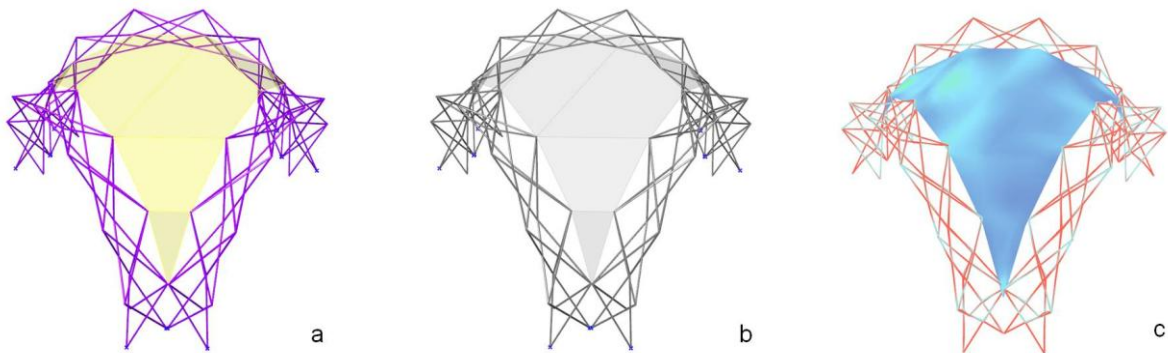


Fig 243. (a) Condiciones de contorno. (b) Motor de análisis. (c) Resultado gráfico de tensiones y deformaciones.

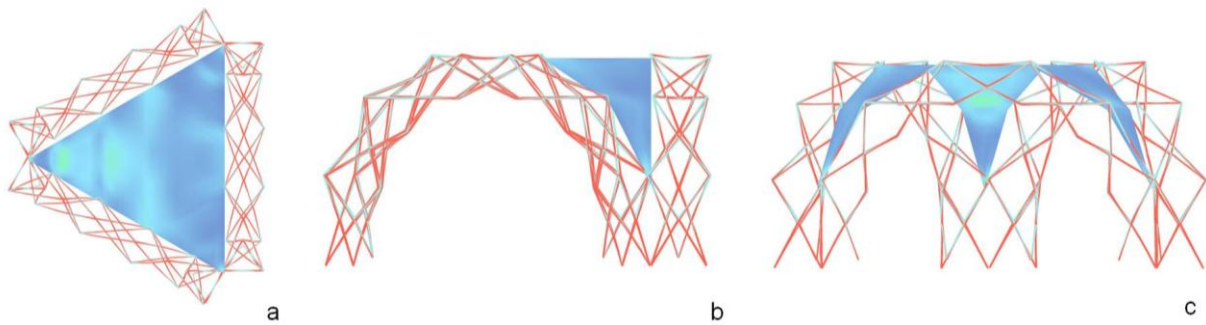


Fig 244. Arco desplegable A7 con sección triangular. Análisis gráfico de tensiones y deformaciones.
(a) Vista en planta. (b) Vista lateral. (c) Vista frontal.

Los resultados obtenidos para el núcleo central del pabellón Vertex con barras de aluminio son:

	N° Barras	N° Uniones hexagonales	Tornillos	Tuercas	Area	Peso	Deflexión
Vertex	126un	72un	252un	252un	12mts2	44.98kg	0,399mm

Fig 245. Pabellón Vertex. Resultados de análisis de tensiones y deformaciones.

Prototipo Pabellón Vertex

La fabricación y el montaje del prototipo fueron realizados con el apoyo de los alumnos de la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño EAAD del Tecnológico de Monterrey, campus Monterrey. Como parte de una invitación para impartir el taller sobre Estructuras Desplegables. El taller se realizo en coordinación del Arquitecto Juan Talamás, miembro del grupo de investigación SMiA, y profesor de la escuela de arquitectura.

Definido el diseño paramétrico del prototipo y con las comprobaciones de movimiento y simulaciones en el software y después de los ensayos de comportamiento geométrico en maquetas, es decir posibles deformaciones o pandeos de las barras durante el movimiento del arco. Estaba todo preparado para la mecanización del material y construcción física de los arcos.

El montaje de la estructura final se realizo en 2 horas teniendo presente 3 pasos de montaje. El primer paso era dibujar en el terreno la geometría del prototipo, e instalar cada uno de los arcos en los puntos de referencia. Los arcos se instalaron del centro hacia afuera. Primero se instalo el núcleo y se verificaba la estabilidad de cada arco. Luego se instalaban los arcos intermedios y finalmente los arcos externos. Cada arco era revisado en dimensiones, estabilizado con los anclajes de bloqueo de movimiento y anclados a suelo en sus 4 puntos de apoyo.



Fig 246. Materiales usados para el prototipo. Arco desplegable A7.

El Pabellón Vertex está formado por 9 arcos desplegables. Dividido en 3 grupos. Cada grupo es de 3 arcos de igual tamaño. Un primer grupo de arcos son los que forman el núcleo central del prototipo. Los arcos más pequeños. Un segundo grupo formando un anillo intermedio son los arcos medianos. Y un tercer grupo de arcos, los más grandes y exteriores son los que forman los accesos a cada túnel del prototipo.

Los materiales usados para la construcción de los arcos fueron, madera de pino para las barras articuladas, tubos de pvc de 5mm de diámetro para las uniones y tornillos M3 de 3mm con tuercas autoblocantes para las uniones de las articulaciones entre barras de madera y tubos de pvc. La sección de las barras de madera que se usaron para el prototipo fue de 27mm por 10mm.



Fig 247. Mecanizado del material y fabricación del prototipo.

Durante este proceso se fabricaron cada una de las piezas y se construyeron los 9 arcos independientes que forman la estructura final. Para cada arco terminado se hicieron pruebas de movimiento, de estabilidad y verificación de rotura de cada barra de madera. Todo con el fin de garantizar la estabilidad y rigidez de cada arco.



Fig 248. Construcción de los arcos desplegables.



Fig 249. Arco desplegable con sección triangular. Prototipo.

Igualmente se trabajó el mecanizado y patrón del textil tipo lycra que iba a cubrir la estructura. Este patrón fue previamente diseñado en Grasshopper calculando una tolerancia de tensión que nos permita instalar la cubierta tipo lycra con una tensión admisible sin llegar a la rotura. Las piezas o patrón hechas en lycra se fabricaron con huecos perimetrales hechos con ojales metálicos y separaciones de 50cm. Estos puntos son los anclajes de tensión entre la tela y la estructura en madera.

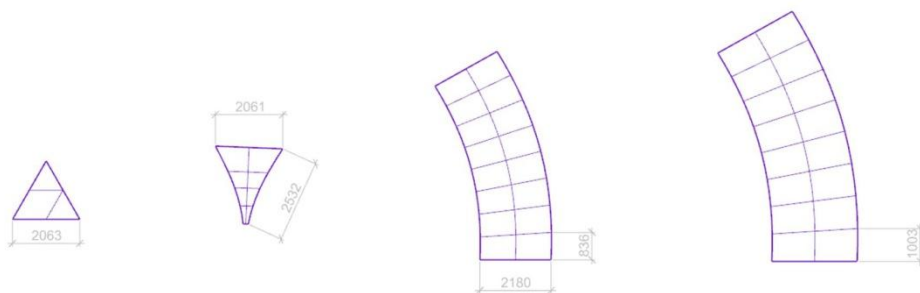


Fig 250. Patrón textil del Pabellón Vertex.

Sistemas de Control de Movimiento para el Pabellón Vertex

Finalmente se fabricaron las piezas de anclaje y bloqueo de movimiento para cada uno de los extremos de los arcos. Con esto garantizamos la apertura máxima de cada arco y respetamos las dimensiones teóricas dadas por el diseño digital paramétrico.

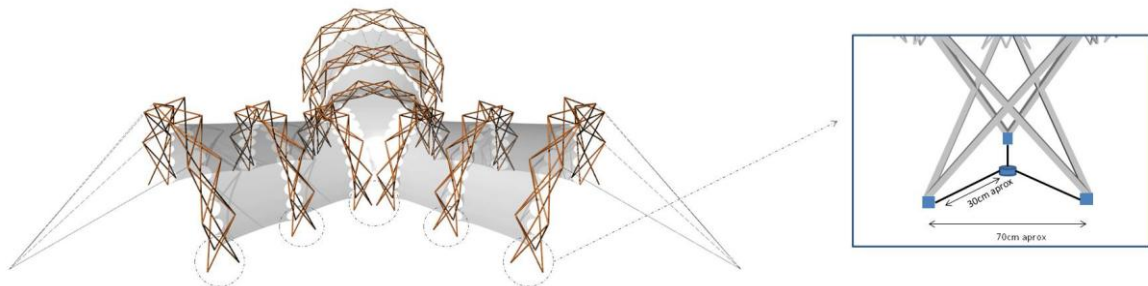


Fig 251. Diseño y ubicación de los anclajes y sistemas de control de movimiento. Pabellón Vertex.



Fig 252. Anclajes y sistemas de control de movimiento. Pabellón Vertex.

Se procedió a hacer pruebas de montaje. Recordemos que el prototipo es de carácter experimental y de desarrollo, y único en su tipo. Por lo que eran necesarias pruebas y ensayos previos al montaje final y comprobaciones del comportamiento mecánico de cada una de las piezas. También fueron necesarios elementos adicionales como cables de vientos y anclajes tipo camping para garantizar la estabilidad de la estructura según las condiciones de contorno como vientos y cargas vivas.



Fig 253. Pabellón Vertex. Primera prueba de montaje y comprobación del núcleo central.
Tecnológico de Monterrey, México 2018.

Primero se instaló el núcleo y se verificaba la estabilidad de cada arco. Luego se instalaban los arcos intermedios y finalmente los arcos externos. Cada arco era revisado en dimensiones, estabilizado con los anclajes de bloqueo de movimiento y anclados a suelo en sus 4 puntos de apoyo.

Un segundo paso fue el de la instalación de la cubierta tipo lycra. De igual forma que la estructura se inició su instalación del centro hacia afuera. La tela por sus características de tensión ejercía empuje en los arcos hacia el interior por lo que fueron necesarias la instalación de cables de tensión en los arcos exteriores para estabilizar las cargas y empujes de la tela. Debido a que la estructura fue instalada en campo abierto se tomó la decisión en sitio de hacer perforaciones a la tela con el fin de reducir la resistencia a las cargas del viento y que esto ocasionara rotura de las barras de madera.

Y finalmente un tercer paso fue la instalación de los cables a tensión, estabilizando la estructura. En este punto se revisaron cada barra de madera chequeando que no presentaran fracturas de fabricación o mecanizado. Se revisaron los puntos de anclaje entre la tela y la estructura para aliviar tensiones y así evitar roturas.



Fig 254. Pabellón Vertex. Montaje e instalación. Tecnológico de Monterrey, México 2018.



Fig 255. Pabellón Vertex. Proceso de montaje e instalación.
Tecnológico de Monterrey, México 2018.

En general una revisión de todos los elementos instalados y ver el comportamiento mecánico de la estructura en funcionamiento. El Pabellón Vertex se uso inicialmente durante su presentación como ejercicio académico durante 3 días. Posteriormente ha sido utilizado en eventos y actividades lúdicas dentro del campus. Habiéndose instalado hasta el día de hoy unas 5 veces más. Estimamos que por la naturaleza de baja resistencia a los agentes externos de los materiales el prototipo tenga una durabilidad de 1 año y medio a dos años.



Fig 256. Pabellón Vertex. Tecnológico de Monterrey, México 2018.



Fig 257. Pabellón Vertex. Instalación efímera de una estructura con arcos desplegables de 90 metros cuadrados construidos. Tecnológico de Monterrey, México 2018.



Fig 258. Pabellón Vertex. Instalación efímera de una estructura con arcos desplegables de 90 metros cuadrados construidos. Tecnológico de Monterrey, México 2018.

El prototipo fue usado como lugar de exposición de los trabajos finales del taller sobre estructuras desplegables durante tres días. El desmontaje del prototipo se hizo en 30 minutos, ocupando un espacio final con la estructura cerrada de 2 metros cuadrados.



Fig 259. Pabellón Vertex. Prototipo desplegado en estado de uso. Prototipo cerrado en estado de Transportabilidad. Tecnológico de Monterrey, México 2018.

Geometrías alternativas con arcos desplegables

El diseño de un arco desplegable como elemento constructivo para ser agrupado y formar una estructura habitable, permite múltiples posibilidades de diseño y configuraciones posibles. Las agrupaciones pueden ser lineal continua o lineal discontinua. Se pueden hacer agrupaciones con geometrías radiales y combinaciones entre radiales y lineales, como el pabellón Vertex.

También hay que recordar que en esta investigación solo se exploró el uso de uno de los arcos. Específicamente el arco con asimetría exterior. Así que las posibilidades de agrupaciones y configuraciones posibles pueden ser múltiples, y se pueden explorar configuraciones que no necesariamente tengan una aplicación de habitabilidad.

Como procesos de diseño paramétrico se exploraron tres posibles configuraciones con los arcos desplegables con el fin de formar una estructura estable y habitable. El módulo Vertex o núcleo central del segundo caso de estudio, es una configuración que también permite ser modular con otros módulos Vertex y así explorar nuevas geometrías. Los arcos desplegables agrupados de forma radial también permiten tener una geometría muy particular, un torus. En ejemplo de la figura b tenemos un torus con 12 arcos desplegables. Y una tercera posibilidad es tener el mismo sentido de agrupación pero esta vez con los arcos unidos en la parte más alta de su despliegue. Formando pseudo-domos.

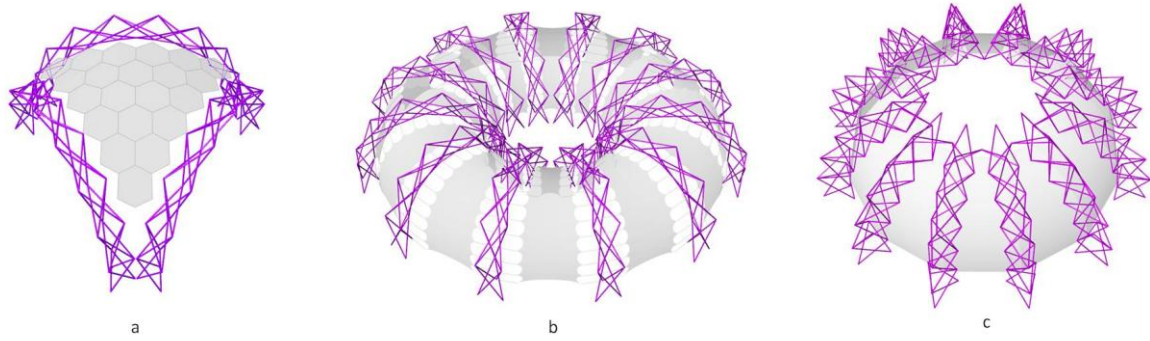


Fig 260. Configuraciones alternativas de arcos desplegables con sección triangular.
(a) Vertex (b) Torus (c) Boom (Speudo-domo)

Durante el desarrollo de esta investigación se tuvo la oportunidad de construir algunos de estos prototipos como resultado final de los talleres sobre estructuras desplegables impartidos en diferentes escuelas de arquitectura. A continuación se mencionaran algunos.

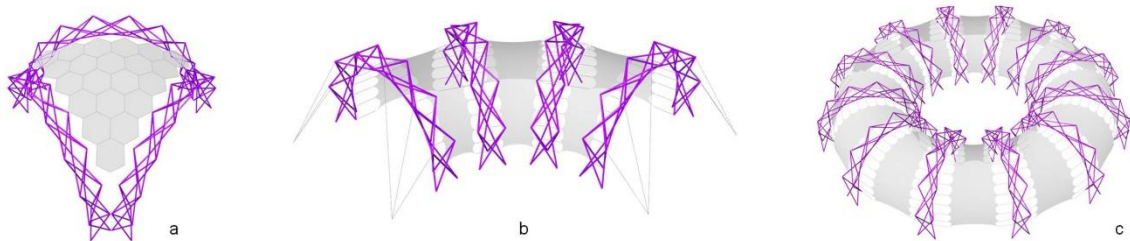


Fig 261. Configuraciones alternativas de arcos desplegables con sección triangular.
(a) Vertex (b) Torus4 (c) Torus12

El Vertex, fue construido con la colaboración de los estudiantes de Maestría de la Escuela de Arquitectura de la Nottingham Trent University en el 2019, y presentado posteriormente en Simposio de la IASS 2019 (International Association for Shell and Spatial Structures) en Barcelona. La coordinación de las actividades se realizó con apoyo de la Dra. Marisela Mendoza, profesora de la NTU y la Dra Diana Peña miembro del grupo de investigación SMiA. Los arcos fueron modificados para cumplir las exigencias del evento de la IASS, por lo que cada arco cuenta con 9 módulos desplegables y ocupa un área de 12 metros cuadrados inscritos en un espacio de 4x4 metros.

El prototipo tenía que cumplir con unas condiciones de transportabilidad, en el interior de no más de 6 cajas de 60x60x120 centímetros. El Vertex fue trasportado a Barcelona en 4 cajas, con las unidades simétricas ya ensambladas. Se conto con el apoyo del Centro de Fabricación Ateneu Ciudad Meridiana, para el corte con maquina por control numérico CNC de las bases finales.



Fig 262. Prototipo Vertex. Nottingham Trent University. 2019

El prototipo también tenía el reto ser auto-portante en suelo rígido sin intervenir o modificar la superficie de apoyo. Por este motivo se diseñaron unas bases que servían de apoyo y contra peso de la estructura.



Fig 263. Prototipo Vertex. Expo IASS (International Association for Shell and Spatial Structures). Barcelona. 2019.

Las bases fueron modificadas para la expo de la IASS por unas bases con diseño poligonal y fabricadas en una maquina CNC o corte por control numérico.

El prototipo Turus4 fue construido con la colaboración de los estudiantes de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Internacional de Cataluña, por invitación a impartir un taller sobre Morfología Estructural. El prototipo fue el resultado final del taller. Este prototipo fue el primero en su tipo con el uso de los arcos desplegables. El área construida del Torus4 es de 36 metros cuadrados.



Fig 264. Pabellón Vertex presentado en la Expo del simposio de la IASS (International Association for Shell and Spatial Structures) Barcelona, 2019.

Por último se construyo el Torus12, un pabellón formado por 12 arcos desplegables inscritos en una geometría de un torus. Este prototipo se realizo con la colaboración de los estudiantes de Maestría de la Escuela de Arquitectura de la Nottingham Trent University en el 2018. Este prototipo tenia la particularidad ser instalado en suelo duro, y sin anclajes externos. El área construida del torus12 es de 90 metros cuadrados.



Fig 265. Prototipo Torus4. Universitat Internacional de Catalunya. Barcelona 2018.



Fig 266. Prototipo Torus4. Universitat Internacional de Catalunya. Barcelona 2018.

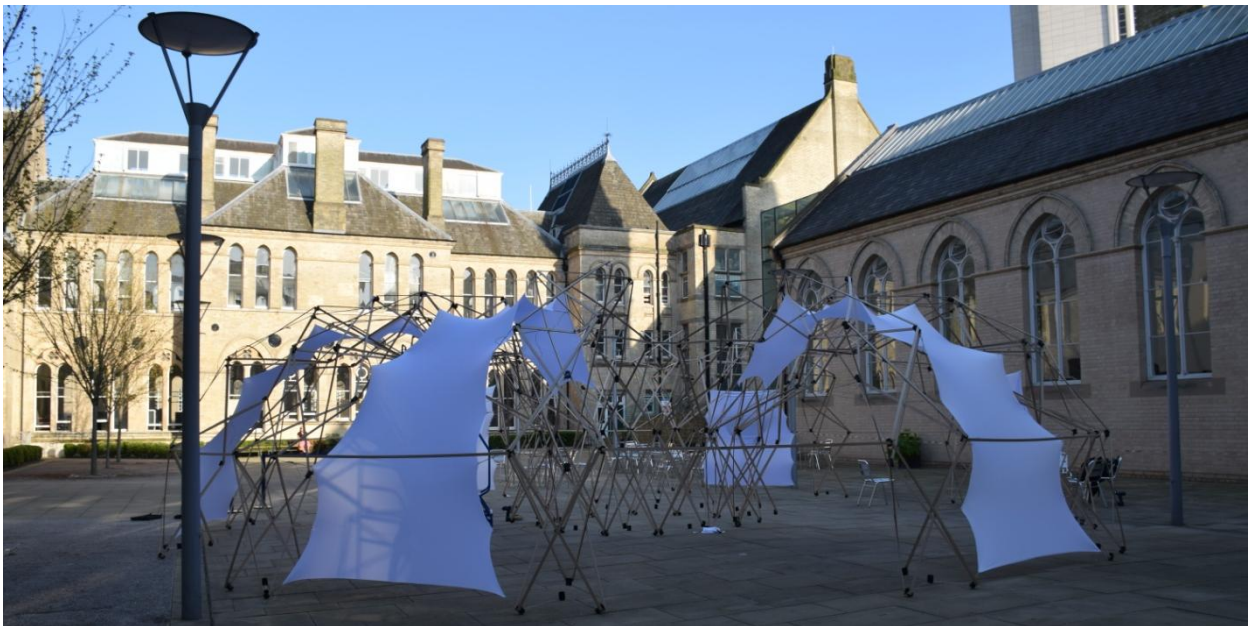


Fig 267. Prototipo Torus12. Nottingham Trent University. 2018



Fig 268. Prototipo Torus12. Nottingham Trent University. 2018

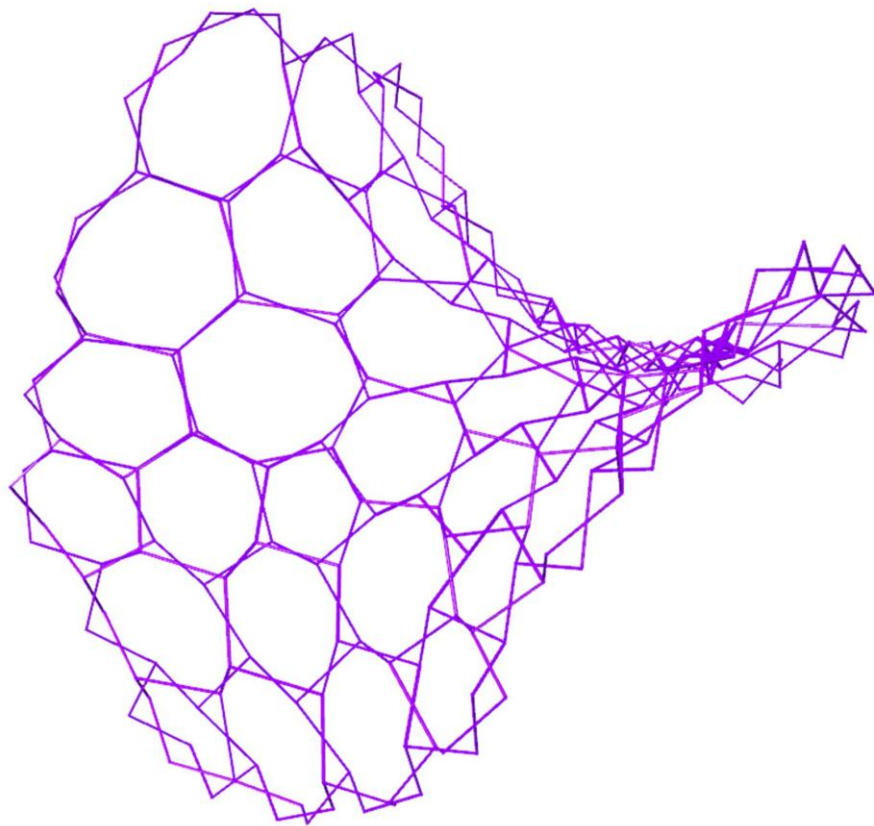
Discusión de los Casos de Estudio

La construcción de prototipo a escala humana requiere no solo el interés académico y el soporte económico que aunque mínimo resulta una tarea compleja. Sino que también requiere de la ayuda del recurso humano para hacer las tareas de mecanizado de material y ensamblaje. Apoyo que sin lugar a dudas hay que mencionar y agradecer por parte de los estudiantes y colaboradores de las universidades donde se llevaron a cabo estas experiencias constructivas de prototipos desplegados.

El construir prototipos como parte de un taller de Estructuras Desplegadas, hace que la experiencia colectiva ayude a tener otros enfoques y puntos de vista a nivel constructivo que no se habían previsto en la etapa de diseño. Como parte de una metodología de diseño paramétrico y construcción de prototipos a escala humana se puede tomar como guía para futuros trabajos y aportar en la mejora de procesos. Es por esto que los análisis de tensiones y deformaciones hechos para los dos casos de estudio son parte de esta metodología, queriendo ser un análisis orientativo para el proceso constructivo, y no un modelo de cálculo.

Uno de los puntos a resaltar de este proceso sería el de explorar la fabricación de piezas en 3D que mejoren el comportamiento mecánico de las conexiones articuladas compuestas hexagonales y cuadradas. Y profundizar en el desarrollo de conexiones biarticuladas que ayuden a controlar el movimiento límite de los sistemas desplegados.

Otro concepto que sería bueno mencionar en este punto es la exploración y uso de actuadores electrónicos que ayuden a controlar el movimiento límite de los sistemas desplegados. Usar los prototipos o maquetas a pequeña escala para incorporar mecanismos electrónicos que controlen el movimiento de las estructuras desplegadas sería un primer paso a considerar para futuros trabajos de investigación.



Capitulo 06

Conclusiones y Futuras Investigaciones

Generales

El objetivo horizonte de esta investigación era el de explorar y proponer posibles aplicaciones arquitectónicas de las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas. Con la ayuda del diseño paramétrico se logro establecer una metodología de diseño de las EDBRA donde se incluye un modelo grafico de control de movimiento por tracción. Y tener las herramientas suficientes para dar el salto del diseño a la fabricación y construcción de una estructura desplegable.

Esta investigación quiere servir de motivación a futuros trabajos académicos, dejando un recorrido sobre el proceso de diseñar estructuras desplegadas aplicadas a la arquitectura, y facilitar la construcción de mas prototipos a escala 1:1. Si bien los sistemas desplegados tienen más de 50 años de desarrollo en la academia, todavía son pocas las aplicaciones reales y se ve necesario incentivar su aplicación en la arquitectura con ayuda de las nuevas herramientas de diseño y técnicas de fabricación.

La construcción de prototipos de bajo costo en esta investigación, permite continuar explorando materiales y detalles constructivos para las EDBRA que se puedan estandarizar para el desarrollo de un sistema constructivo desplegable que tengan una aplicación en la industria de la construcción y la arquitectura.

Con la ayuda del diseño paramétrico y nuevas técnicas de fabricación digital, el diseño de las estructuras desplegadas adquiere una mayor importancia y facilita los procesos de comprobación de movimiento y búsqueda de la forma. Razón por la cual reduce considerablemente los procesos de diseño y amplía el panorama de posibilidades en búsqueda de nuevas geometrías y agrupaciones desplegadas.

La propuesta de identificar sistemas desplegados abiertos y sistemas desplegados cerrados en las EDBRA facilita desde el inicio del diseño la estrategia para estabilizar la estructura en su estado de uso. Y también permite prever desde la etapa inicial el uso de elementos adicionales como barras y cables para controlar el movimiento limite del sistema.

El cambio de escala en las EDBRA es uno de los factores a tener en cuenta cuando se diseña un sistema desplegable. Si bien la elaboración de maquetas y modelos a escala son un paso importante en el diseño de una estructura desplegable, hay que considerar que el cambio de escala aumenta la inestabilidad del sistema y en algunos casos se pueden presentar incompatibilidades de movimiento o bloqueos parciales.

La experiencia de construir prototipos a escala humana de estructuras desplegadas es muy positiva. El cambio de escala, el diseño de las uniones, el comportamiento mecánico del prototipo, su peso, el paso de lo digital al prototipo y las deformaciones, son algunas de las cosas que se evidencian en la práctica. Si bien las propuestas estaban planteadas como prototipos de bajo costo, fueron considerados los mejores materiales y obligo al diseño de detalles constructivos óptimos para cada prototipo.

Las EDBRA son sistemas desplegados con características muy particulares y con gran potencial en la arquitectura contemporánea. Características como la transformabilidad y la ligereza hacen de los sistemas desplegados una opción interesante para ser aplicado en la arquitectura de emergencia. En la actualidad con la ayuda de herramientas digitales y softwares de diseño paramétrico y generativo, es posible explorar nuevas configuraciones y geometrías. Pero también con la ayuda de los nuevos procesos de fabricación digital, los sistemas desplegados pueden avanzar no solo como un elemento estructural, sino también como un sistema constructivo que sea estandarizado e industrializado.

La experiencia en la construcción de prototipo escala 1:1 logra abrir un camino en el desarrollo de habilidades en fabricación y diseño de detalles constructivos para las EDBRA. Así como también generar un espacio de aprendizaje en las nuevas técnicas y herramientas de diseño computacional. Pero uno de los puntos a destacar es el trabajo colectivo desde la academia. La participación de los estudiantes en los diferentes talleres impartidos sobre estructuras desplegadas y en la construcción de prototipos, ayudo en la discusión y producción de conocimiento sobre las estructuras desplegadas mejorando la creatividad y el pensamiento crítico.

El desarrollo de esta investigación fortaleció una metodología académica de enseñanza de las EDBRA, que fue mejorando con el tiempo y con ayuda de las escuelas de arquitectura que se interesaron por este tema y los procesos de trabajo colectivo y participativo de los estudiantes que participaron. Trazando siempre como objetivo final de los talleres impartidos la construcción de un prototipo a escala 1:1.

Diseño Paramétrico

El diseño paramétrico de las EDBRA fue uno de los objetivos de esta investigación logrando diseñar más de 60 algoritmos para sistemas desplegados. También sirvió como metodología para diseñar sistemas desplegados, desde la unidad simple hasta el diseño de módulos y agrupaciones con geometrías complejas.

Esta investigación aborda una metodología de diseño paramétrico de las EDBRA usando estrategias de diseño digital con apoyo de software como *Rhinoceros + Grasshopper + Kangaroo* para crear algoritmos con estructuras desplegadas y simulaciones de control de movimiento por tracción, *SolidWorks* para el

diseño de mecanismo y articulaciones compuestas con simulaciones de tensiones y deformaciones y *Millipede* para simulaciones de tensiones y deformaciones de las EDBRA en su estado de uso.

El proceso de diseñar sistemas desplegados con algoritmos, permitió analizar a nivel geométrico el comportamiento de los vectores de movimiento de las EDBRA. Este análisis geométrico dio como resultado una propuesta de clasificación según los vectores de movimiento. Axial, biaxial y triaxial.

Maquetas y Cambios de Escala

El cambio de escala obliga a reconsiderar el diseño de las uniones entre unidades simples y articulaciones compuestas. En las maquetas a pequeña escala factores como el peso, deformaciones y desplazamientos son casi imperceptibles. La construcción de prototipos a escala 1:1 aumenta la inestabilidad de las EDBRA a causa de su considerable número de articulaciones. Esta inestabilidad requiere el diseño de elementos de bloqueo límite de movimiento y en algunos casos elementos adicionales al sistema como cables para dar equilibrio al sistema.

El uso del diseño paramétrico ha sido un recorrido fundamental para el desarrollo de esta investigación no solo por la exploración en la búsqueda de la forma, sino también por la posibilidad de hacer simulaciones de movimiento para comprobar simultáneamente con las maquetas y los prototipos. Así como también las simulaciones gráficas de tensiones y deformaciones de los prototipos, y poder formular hipótesis que favorezcan la fabricación y el montaje de la estructura final.

Uno de los mayores desafíos fue la transición de modelos a escala pequeña o maquetas, a prototipos a escala humana. La construcción de modelos físicos a escala en diferentes propuestas de materiales y tamaños, sirvió como laboratorio de ideas y propuestas de soluciones a los mecanismos y articulaciones de los sistemas desplegados. También fue posible la comprobación de movimiento con los algoritmos diseñados por computadora.

La producción de modelos a escala fue importante para el análisis y diseño de los sistemas de control límite de movimiento de los prototipos. Las técnicas de fabricación digital usadas para la construcción de maquetas dieron mayor precisión en los puntos de articulación y las asimetrías de los sistemas desplegados. Esta precisión daba como resultado una estructura desplegable con movimiento fluido y continuo, facilitando la toma de decisiones para el diseño de los elementos de control de movimiento.

Fabricación y Montaje de las EDBRA

La fabricación y montaje de prototipos desplegados a gran escala fue una experiencia positiva. Sin embargo, enfrentamos varios desafíos cuando pasamos de un diseño digital a un prototipo real. Estos desafíos incluían deformaciones y comportamientos mecánicos inesperados. También el cambio de escala aumentaba la inestabilidad de la estructura, o incompatibilidades de movimiento que en los modelos a escala eran imperceptibles. Problemas que tuvieron que ser resueltos en los procesos de fabricación. Teniendo como resultado final prototipos de bajo costo que optimizó varias fuentes de materiales y esfuerzos colectivos.

El paso de los modelos a escala de trabajo a un prototipo escala 1:1, obliga a verificar las dimensiones de los elementos, materiales y diseño de las uniones. El sistema de estructura desplegable requiere mucha atención en el diseño de las articulaciones compuestas. Detalles constructivos que con diseños personalizados logran evitar el desplazamiento de las barras y disminuir las deformaciones. La ayuda de modelos gráficos de tensiones y deformaciones si bien no son un cálculo estructural a nivel de ingeniería, si son una apoyo para hacer simulaciones e hipótesis del comportamiento mecánico de los sistemas desplegados. Y sirven como base previa a la fabricación de prototipos.

El desarrollo de esta investigación ve necesario dar el salto de los diseños digitales y los modelos a pequeña escala a la construcción de prototipos a escala humana. Es en estos ejercicios académicos es donde se puede avanzar más en el desarrollo y solución de nuevos problemas de las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas. Sistemas que tiene una aplicación muy interesante dentro de la arquitectura convencional.

Futuras Investigaciones

La metodología de diseño paramétrico de las EDBRA deja varios caminos abiertos a seguir con el uso de herramientas digitales con aplicaciones arquitectónicas. A continuación se mencionaran algunos de ellos;

- Diseño paramétrico de las Estructuras Desplegables con Barras Anguladas (EDBA)
- Exploración y diseño de las EDBRA con sistemas desplegados de polígonos y sólidos.
- Exploración y diseño de las EDBRA con superficies mínimas aplicando procesos de optimización de malla y reemplazando las aristas resultantes por unidades simples desplegadas.
- Exploración de otras geometrías desplegadas discontinuas como las del arco desplegable para diseñar propuestas de estructuras desplegadas con aplicaciones arquitectónicas.

Una de las futuras investigaciones planteadas es recopilar y completar todos los algoritmos diseñados en esta investigación para la creación de un plugin o componente de código de las EDBRA como herramienta y uso en *Grasshopper*.

Fortalecer el uso de modelos gráficos de simulación de tensiones y deformaciones para el cálculo estructural de los sistemas desplegados y que sirvan de análisis y verificación a la etapa previa de fabricación y construcción de prototipos.

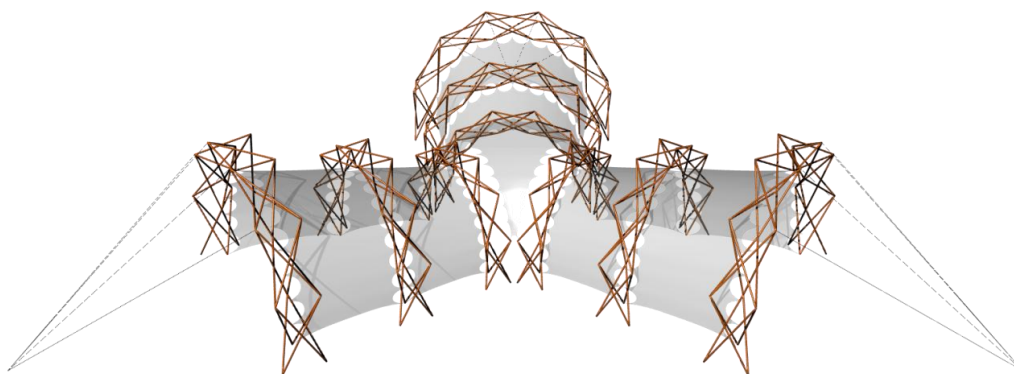


Fig 269. Diseño paramétrico del Pabellón Vertex usando Rhinoceros + Grasshopper + Kangaroo.

El uso de Kangaroo como estrategia y metodología de diseño paramétrico usando la relajación dinámica para el control límite de movimiento de las EDBRA es un primer paso para el diseño paramétrico de sistemas desplegados con el uso de membranas textiles. Una hipótesis que se plantea es el uso de las membranas textiles como elementos de control límite de movimiento de las EDBRA.

El uso del diseño paramétrico y generativo también puede servir para avanzar con las soluciones óptimas de las articulaciones compuestas en las EDBRA. Con ayuda de la fabricación digital específicamente con

la impresión 3D, es posible explorar nuevos nudos articulados para mejorar el movimiento fluido de los sistemas desplegados y disminuir las tensiones y deformaciones de las barras, eliminando la fuerza. También disminuir la fuerza de tensión y deformaciones de barras en las geometrías geodésicas desplegadas.

Esta investigación quiere animar a futuros trabajos académicos a dar el salto a la fabricación y construcción de prototipos con EDBRA a escala 1:1. Este autor considera necesario el uso previo de modelos físicos y digitales para hacer comprobaciones simultáneas. Pero también ve necesario a nivel académico la construcción de prototipos para el avance y desarrollo de las EDBRA y demás sistemas desplegados con el fin de dar soluciones constructivas que permitan abrirse camino ampliamente en la arquitectura.

Los prototipos de bajo costo son una estrategia de aproximación a soluciones reales con estructuras desplegadas. El siguiente paso es probar prototipos con materiales más de carácter arquitectónico como la misma madera o el aluminio, e incluso materiales como los plásticos reforzados con fibra de vidrio. Y con el uso de tecnologías de fabricación digital desarrollar nodos y articulaciones compuestas que puedan ser la base de una producción industrial y una estandarización de sus componentes. Sería bueno explorar desde la academia, la construcción de un prototipo con mayor inversión económica y uso de tecnologías más industrializadas.

Las EDBRA son sistemas desplegados muy versátiles y eficientes desde el punto de vista de su transformabilidad. Esta característica de ocupar el menor espacio posible en su estado de plegado o cerrado, hace que sean fácilmente transportables. Característica que tiene gran impacto en la arquitectura de emergencia. Una de las líneas de investigación futuras es la aplicación de las EDBRA como sistema constructivo de habitabilidad en la arquitectura de emergencia.

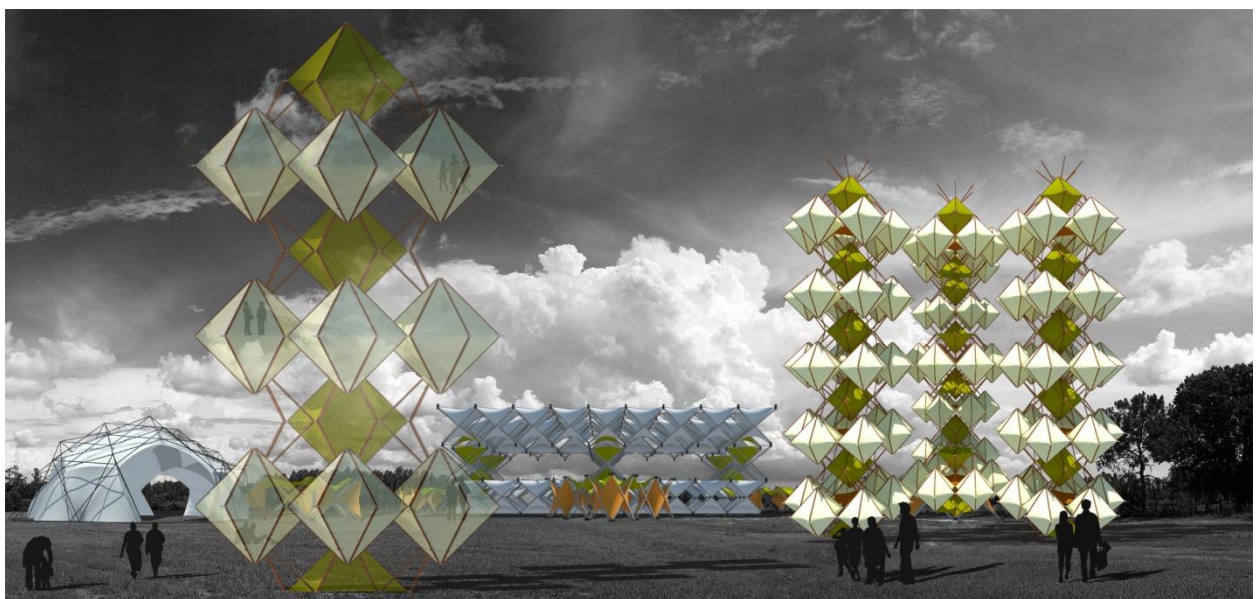


Fig 270. Propuesta de sistema desplegable de emergencia.

Primer puesto del Simposio Latinoamericano de Tenso-Estructuras en Brasil, 2014.

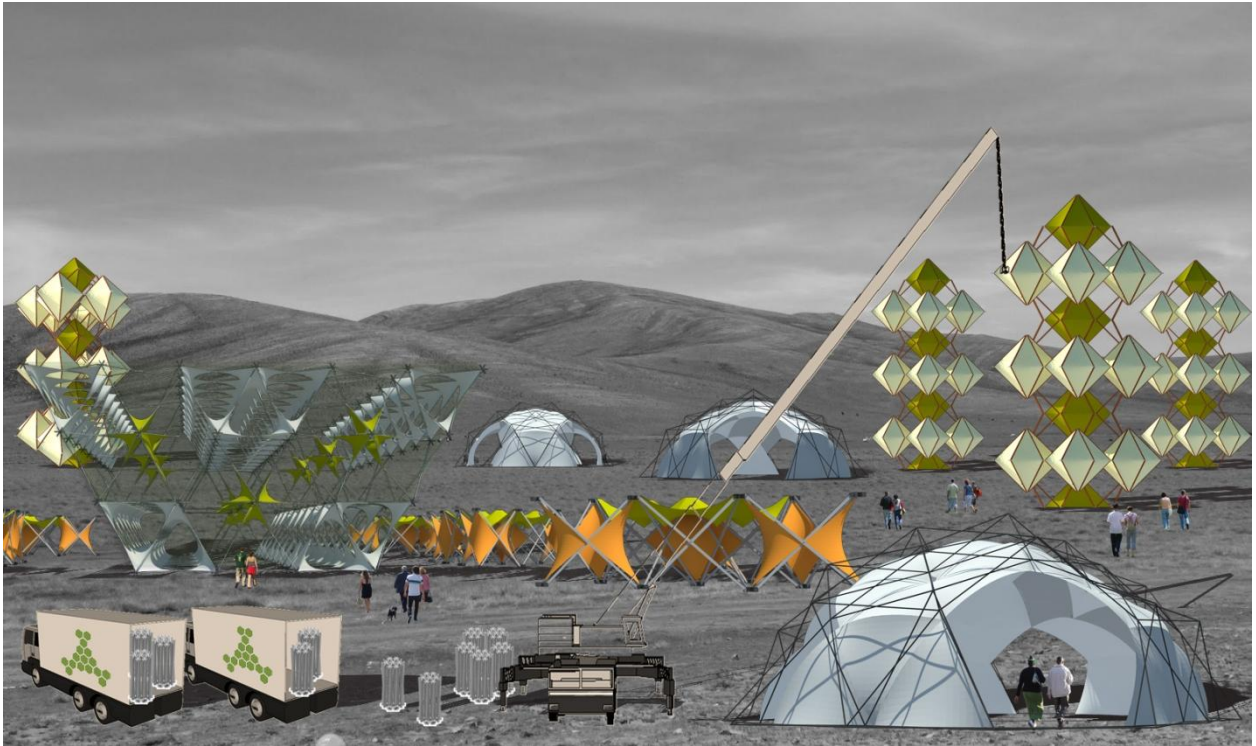


Fig 271. Propuesta de sistema desplegable de emergencia.
Primer puesto del Simposio Latinoamericano de Tenso-Estructuras en Brasil, 2014.

Bibliografía

Akgün, Y. C. J. Gantes, K. E. Kalochairetis, G. Kiper. (2010) “A Novel. Concept of Convertible Roofs with high Transformability Consisting of Planar Scissor-Hinge Structures”. *Engineering Structures*, nº 32.

Alegria M. L. (2014), Parametric Structural Assessment of Deployable Scissor Systems. Optimising the Universal Scissor Component. Vrije Universiteit Brussel.

Arnouts, L., de Temmerman, N., Massart, T., & Berke, P. (2018). Computational assessment of the deployment of bistable scissor structures. *Proceedings of the IASS Symposium 2018 - Creativity in Structural Design* - , 1 -6.

Begiristain, M. j. (2015). XXX Sistemas Estructurales Desplegables Para Infraestructuras de Intervención Urbana. España: Universidad Del País Vasco.

Charis Gantes, Y. A. (2011). A novel adaptive spatial scissor-hinge structural mechanism for convertible roofs. *Engineering Structures - ScienceDirect* , 1365 - 1376.

Charis Gantes, Y. A. (2010). A novel concept of convertible roofs with high transformability consisting of planar scissor-hinge structures. *Engineering Structures* 32 , 2873-2883.

C. Gantes, E. Konitopoulou (2004) “Geometric Design of Arbitrarily Curved Bi-stable Deployable Arches With Discrete Joint Size” *International Journal of Solid Structures*. Vol. 4

E. Pérez Piñero, F. Escrig (1993) “Las Estructuras de Pérez Piñero” *Arquitectura Transformable* (artículo de Félix Escrig que incluye transcripción de escritos de Pérez Piñero).

Escrig, F. (2012). *Modular, Ligero, Transformable. Un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Secretariado de publicaciones. ISBN: 97884472142

Escrig, F., & Sanchez, J. (2013). *New Proposal for Transformable Architecture, Engineering and Desing. In honor of Emilio Perez Piñero*. 18th, 20th september 2013. Abstract book. Sevilla. Spain. ISBN: 978-84-939565-3-0. StarBooks.

Escrig, F. [2006], *New designs and geometries of deployable scissor structures*, in: *Adaptables 2006, Proceedings of the International Conference on Adaptability in Design and Construction*, Eindhoven University of Technology, pp.5-18, 5-22

Escrig, F. J. Pérez Valcárcel, J. Sánchez (1996) “Cubiertas de rápido montaje para Piscinas al Aire Libre” *Revista de edificación* nº 23 Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra. Accesible on-line en: <http://hdl.handle.net/10171/16700>

Escrig, F. (1993) “Geometría de las Estructuras Desplegables de Aspas” Arquitectura Transformable ETSA Sevilla. Accesible on-line en: <http://www.starbooks.es/libros.php>

Escrig, F. J. Sánchez. (2005) “Arco Desplegable de Grandes Dimensiones”. Patente nº ES 200500858.

Escrig, F. (2001) “Estructura Plegable de Malla para la Cubrición de Recintos” Patente nº ES 2.158.787

Escrig, F. (1994) “Cubierta Modular Desplegable”. Patente nº ES 1.026.200 U

J. Perez Valcárcel, M. M. (2019). Expandible bar structure for emergency situations. Structures And Architecture; Bridging the gap and crossing borders (págs. 809-816). Lisboa: Paulo J.S. Cruz.

J. P. Valcárcel (1992) La Obra Arquitectónica de Emilio Pérez Piñero Boletín Académico. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña, 16: 3-12. ISSN 0213-3474 Accesible online en: <http://hdl.handle.net/2183/5237>

J. Sánchez Sánchez (1996) “Estructuras Desplegables de Aspas para Mallas Poliédricas Curvas” Tesis doctoral leída en la Universidad de Sevilla.

L. Puertas del Río, (1996) “Primeras Propuestas en España de Estructuras Desplegables de Barras.” Revista de la Edificación, nº 23

L. Puertas del Río (1989) “Estructuras Espaciales Desmontables y Desplegables. Estudio de la Obra del Arquitecto Emilio Pérez Piñero” Tesis doctoral leída en el Departamento de Estructuras de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

N. Friedman (2012) “Investigation of Highly Flexible, Deployable Structures: Review, modeling, Control, Experiments and Application”. Tesis Doctoral leída en la Ecole Normale Supérieure Cachan y en Budapest University of Technology and Economics.

S. Pellegrino, C. Green, S. D. Guest, A. Watt (2000) “SAR Advanced Deployable Structure” Universidad de Cambridge. Accesible On line en: <http://www2.eng.cam.ac.uk/~sdg/preprint/TR191.pdf>

R. Buckminster Fuller, Amy C. Edmondson, Birkhauser .A Fuller Explanation, The Synergetic Geometry, (1987). ISBN 978-0-8176-3338-7. Stuttgart.

Richard Buckminster Fuller, E. J. Applewhite. (1982). Synergetics: explorations in the geometry of thinking.. ISBN 9780025418707. Michigan University.

Roovers Kelvin, D. T. (2014). A classification of singly curved deployable scissor grids. Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints". Brasilia. Brasil: IASS.

Roovers, K., & Temmerman, N. D. (2018). Geometric Design of Deployable Scissors Grid Consisting of Generalized Polar Units. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* , 227 - 238.

Roovers, K., & Temmerman, N. (2015). Digital design of deployable scissor grids based on circle packing. *IASS 2015 Symposium Future Visions* (pág. 12). Amsterdam: IASS.

S. Calatrava (1980) “Zur Faltbarkeit Von Fachwerken (Sobre La plegabilidad de los Entramados)” Tesis doctoral publicada en *Arquitectura Transformable*. ETSA Sevilla, Sevilla 1993. Accesible online en: <http://www.starbooks.es/libros.php>

Temmerman, N. D. (2007). *Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications*. Brussel: Vrije Universiteit Brussel. Tesis Doctoral.

Torres, N. (2017). Deployable Arches Based on Regular Polygon Geometry. *ArchiDoct* , 89-105.

Torres, N. Matos, Hugo. (2017). *Estructuras Desplegables: Sistemas tipo tijera*. Cuadernos de *Arquitectura e Urbanismo V24*.

T. R. Zeigler (1994) “Polyhedron Building System Having Telescoping Scissors” Patente nº US 5.274980

T. R. Zeigler (1993) “Polyhedron Building System” Patente nº US 5.230.196

T. R. Zeigler (1984) “Collapsible Self Supporting Structures” Patente nº US 4. 437 275.

T. Buhl, F. V. Jensen, S. Pellegrino (2004) “Shape Optimization of Cover Plates for Retractable Roof Structures” *Computer & Structures*. Vol 82 nº 15-16

Yenal Akgüna, C. G. (2011). A novel adaptive spatial scissor-hinge structural mechanism for convertible roofs. *Engineering Structures* , 1365-1376.

<https://smia-experimental.com/>

<https://www.rhino3d.com/es/>

<https://www.grasshopper3d.com/>

<https://www.solidworks.com/es>

Anexo 01

Prototipos



Domo desplegable D30 V2. Estructura desplegable de 30 metros cuadrados con variación geométrica del domo D30 y uso de uniones metálicas anguladas para los conectores hexagonales. Trabajo final del taller sobre estructuras desplegables en colaboración con los estudiantes de Master de la Nottingham Trent University, UK. 2020.



Vertex. Estructura auto-portante de 12 metros cuadrados formada por 3 arcos desplegables, cubierta textil en lycra y 2,56cm de altura. En su estado cerrado la estructura ocupa un espacio de 1 metros cuadrado. Trabajo final del taller sobre estructuras desplegables hecho en la Nottingham Trent University, UK. 2019. Y presentado en la Expo de la IASS2019 Barcelona.



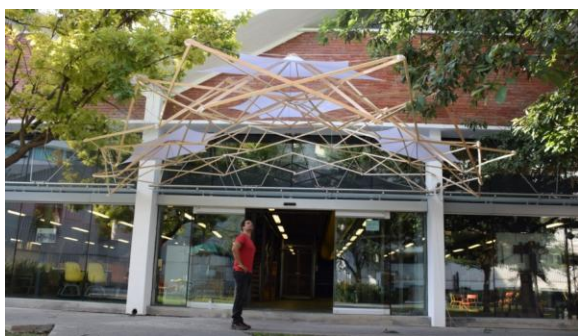
Lampara 3P4H Desplegable. Lámpara formada por 3 pentágonos vacíos y 4 módulos hexagonales desplegables. Resultado final del taller sobre estructuras desplegables realizado en el Ateneu de Fabricación Digital de la Fabrica del Sol, Barcelona. 2019.



Pabellón Vertex Mx. Estructura de 9 arcos desplegables y de 90 metros cuadrados construidos y cubierta textil en lycra. 2 metros cuadrados en su posición de plegado y transportabilidad. Trabajo final del taller sobre estructuras desplegables hecho en la escuela de arquitectura, arte y diseño EAAD del Tecnológico de Monterrey, México. 2018. Primer puesto en el Fabric Structure Student Design Challenge, de la IFAI (Industrial Fabrics Association International). Florida, EEUU. 2019.



Pabellón Torus12. Estructura desplegable formada por 12 arcos desplegables y agrupados de forma radial formando medio torus. El área construida fue de 100 metros cuadrados y de 2 metros cuadrados con la estructura cerrada. Resultado final de taller sobre estructuras desplegables del taller impartido en la Nottingham Trent University. 2018.



Cubierta Desplegable. Resultado final del taller sobre estructuras desplegables y diseño paramétrico del curso de formación docente CaDi para la EAAD del Tecnológico de Monterrey, México. La cubierta efímera está formada por 3 módulos hexagonales desplegables y estabilizados con cables de acero. Ocupa un área de 8 metros cuadrados.



Estación de Auto-Bus. El proyecto es parte de un taller sobre estructuras desplegables impartido en el BINA Festival 2018 en Belgrado, por invitación de Future Architecture Platform. La estación está formada por una estructura desplegable con módulos hexagonales y cubierta textil en lycra, que sirve como elemento de sombra.



Domo desplegable D30. Estructura de 30 metros cuadrados construidos como resultado final de taller sobre estructuras desplegables y diseño paramétrico en la Escuela de Arquitectura de la Abdallah Gul University en Kayseri, Turquía. 2017. La estructura en su posición cerrada ocupa un área de 0,4 metros cuadrados y una altura de 1,40 metros.



Pabellón Torus4. Estructura formada por 4 arcos desplegables y cubierta textil en lycra. El proyecto es el resultado final del taller sobre estructuras desplegables impartido en la Universitat Internacional de Catalunya UIC, Barcelona. 2017.



Pabellón Torre HIVE. Estructura desplegable construida en el Festival Internación de Arte y Construcción IFAC 2016. La propuesta está formada por módulos hexagonales asimétricos desplegables formando una torre de 6 lados.



Pabellón Erizo. Estructura desplegable formada por módulos hexagonales agrupados en 3 ejes. La estructura es el resultado final del taller sobre Morfología Estructural, impartido a los estudiantes del PEi de la Universidad Javeriana de Colombia, 2015.



Colgante Erizo. La estructura fue el resultado de reutilizar los componentes del pabellón Erizo y configurar una nueva geometría para exponer en el hall de la Escuela de Arquitectura del Valles ETSAV, Barcelona. 2015.



Spider Circus. Maqueta final del curso de construcción ligera formada por 3 arcos desplegables que soportan una cubierta textil en lycra. Proyecto que ocupó el tercer puesto en el Fabric Structure Student Design Challenge, de la IFAI (Industrial Fabrics Association International). Charlotte, EEUU. 2016.

Anexo 02

Publicaciones

Indexadas

- Avellaneda, O.F. Deployable structures with straight bars: Design, manufacturing and assembly. Structures and Architecture - Bridging the Gap and Crossing Borders Proceedings of the Fourth International Conference on Structures and Architecture (ICSA 2019), July 24-26, 2019, Lisbon, Portugal. Edited By Paulo J.S. Cruz. ISBN: 978 1 138 03599 7. <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9781315229126/chapters/10.1201/9781315229126-90>
- Avellaneda L, O.F. (2017). Deployable structures system, hexagonal X-frame. Three case studies. ArchiDOCT, 2017. 4(2), 41–56. ISSN: 23090103. http://www.enhsa.net/archidoct/Issues/vol4_iss2/ArchiDoct_vol4_iss2%2003%20Deployable%20Structures%20System,%20Hexagonal%20X%20frame%20Avelaneda.pdf
- Avellaneda, OF. Sastre, R. Deployable membrane structures Design proposal for the scissors-type system. ICSA 2013. 2nd International Conference on Structures and Architecture. Guimarães, Portugal. 2013. ISBN: 978-0-415-66195-9 Code 100885. <https://www.mendeley.com/catalogue/deployable-membrane-structures-design-proposal-scissorstype-system/>

Congresos Internacionales

- Mendoza, M. Avellaneda, O. Peña, D. Learning by doing: Fostering creativity in the teaching and learning of deployable structures in architectural education. Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS 2018 Boston Symposium: Education of architecture and technology, pp. 1-8(8)
ISSN: 2518-6582
<https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2018/00002018/00000010/art00008>
- Torres, N. Avellaneda, O. Peña, D. SMiA. Structural Morphology in Architecture, constructive experiences with wood. LIGNOMAD17: Congress on Construction with Wood and other Lignocellulosic Materials: Pg. 86-91. Barcelona. 2017. ISBN: 978 84 9880 665 6
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/106376?show=full>
- Avellaneda, O. Torres, N. Peña, D, Sastre, R. “Experimental Workshop in Unconventional Structures: Deployable & Tree-Like Structures SMiA - Training and Research at Barcelona Tech” Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS 2014 Brasilia Symposium: Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – General 8: Structural Morphology, pp. 1-8(8).
ISSN 2518-6582
<https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2014/00002014/00000004/art00009>
- Avellaneda, O. Geometric Exploration Of Split-Tetrahedron-Network-Sandwich-Panel Cores. Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS 2013 Wroclaw: ‘Beyond the Limits of Man’ – Structural Morphology 3: Materials and Fabrication, pp. 1-10(10). ISSN: 2518-6582
<https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2013/00002013/00000010/art00009>
- Avellaneda, O. “Transformable Architecture. Experimental solution for a square mesh deployable cover.” Transformables2013. Pg.125 – 130. Sevilla, Spain. 2013. ISBN: 978-84-939565-3-0

Premios & Reconocimientos

- Emporia de Oro 2019 (Premios Nacionales de la Arquitectura Efímera): A la innovación en la arquitectura efímera. (materiales, solución, eficiencia, etc.) con el proyecto Pabellón Vertex.
https://www.veredictas.com/es/trabajo/13383/pabellon_vertex
- Primer puesto en el concurso de estructuras textiles IFAI 2019. Proyecto: Vertex Pavilion. Deployable Structure. Orlando, Florida. EEUU .2019. Industrial Fabrics Association International.
<https://www.ifai.com/2019/10/03/2019-fabric-structures-student-design-competition-winner-announced/?fbclid=IwAR2IP6v4BmXDQ7QU2GffpLW96BNmR8M4uhrpzlb76b14LXKLDc58-8ayYC8>
- Participación en la Bienal de Venecia 2018 con el proyecto Arquitectura Transformable, pabellón de España. Venecia. Italia. Pabellón España.
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/895090/becoming-pabellon-de-espana-en-la-bienal-de-venecia-2018>
- Finalista en la primera edición del TEDEXBarcelona Awards 2016 con el proyecto *Transformable Architecture for Emergency Housing*. Localidad y país: Barcelona. España.
<https://www.tedxbarcelona.com/2017/02/15/arquitectura-para-combatir-emergencias-sociales/>
- Tercer puesto en el concurso de estructuras textiles IFAI 2016 Charlotte, NC. EEUU. Proyecto: Spider Circus. Industrial Fabrics Association International. 2016.
<https://fabricarchitecturemag.com/2016/10/20/fabric-structures-association-announces-student-design-challenge-recipients/>
- Primer puesto en el concurso de ideas de Tenso Estructuras del Simposio Latinoamericano de Tenso Estructuras, Brasil 2014. Con el proyecto: *Modulo de Enseñanza Prioritaria Infantil MEPI. Estructuras desplegables para Arquitectura de Emergencia*.
<http://www.latensored.org/slte-vi-brasilia-brasil-2014/>

Anexo 03

Proyecto Emprendedor

Actualmente el grupo de investigación SMiA del cual soy miembro y cofundador, trabajamos en un proyecto de innovación de una empresa spin-off de servicios llamada DINAMIKA. Sinergia Creativa, localizada en Monterrey, México. La idea de este proyecto es la transferencia de conocimiento en el ámbito de aplicación I+D de las EDBRA en proyectos reales. (www.dinamika.mx)

Esta experiencia ha permitido aplicar los conocimientos desarrollados durante esta investigación y plantearlos en proyectos prácticos con aplicaciones arquitectónicas. Enfocados en desarrollar sistemas desplegables para eventos, ferias, conciertos y actividades deportivas.



Fig 272. Medios domos desplegables con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Octubre 2018. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.

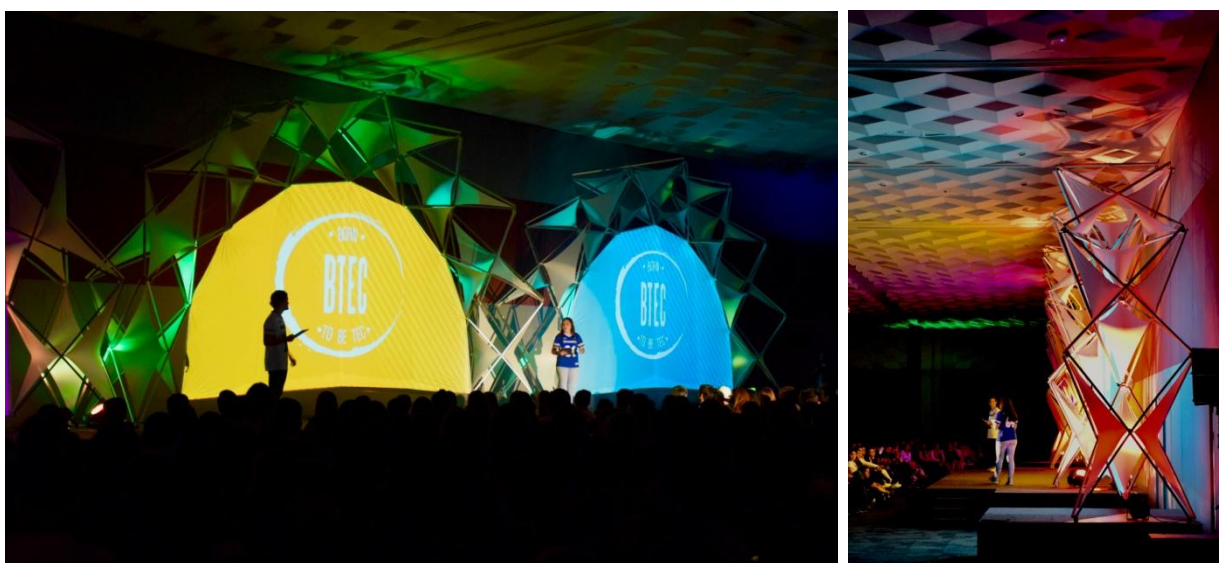


Fig 273. Pantallas con arcos desplegables en aluminio y lycra para proyección con video mapping. Octubre 2018. Monterrey, México.

DINAMIKA - Sinergia Creativa.



Fig 274. Elementos de control de movimiento límite para las EDBRA. Monterrey, México. Octubre 2018.
DINAMIKA - Sinergia Creativa.



Fig 275. Vertex con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Monterrey, México. Octubre 2018.
DINAMIKA - Sinergia Creativa.

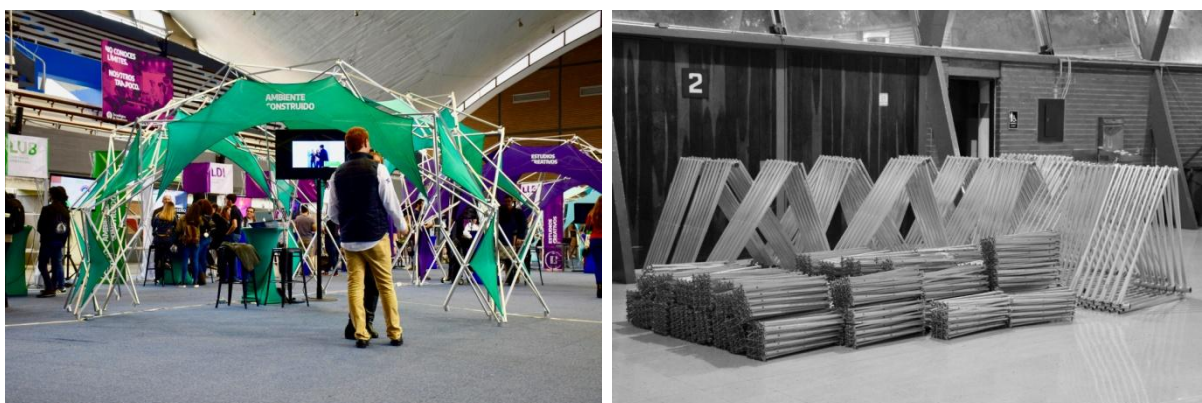


Fig 276. Vertex con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Octubre 2018. Monterrey, México.
DINAMIKA - Sinergia Creativa.

Desde el equipo de DINAMIKA trabajamos para desarrollar sistemas desplegables ligeros que sean competitivos en el mercado y que nos permita estandarizar procesos de fabricación y montaje. Actualmente con el equipo de I+D contamos con dos patentes en proceso de evaluación de la Canadian Intellectual Property Office. Canadá. <https://www.ic.gc.ca/eic/site/cipointernet-internetopic.nsf/eng/home>

Titulo de patente: *SYSTEM OF DEPLOYABLE LATTICE GIRDER WITH TRIANGULAR SECTION USING ARTICULATED STRAIGHT BARS*. En español, Sistema de entramado desplegable con sección triangular usando barras rectas articuladas. N° de patente: 3.041.767



Fig 277. Arco desplegable de acceso para evento cultural con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Mayo 2019. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.

Titulo de patente: *SYSTEM OF DEPLOYABLE STRUCTURES WITH STRAIGHT BARS FOR DOMES*. En español, Sistema de estructuras desplegables con barras rectas para domos. N° de patente: 2.998.771



Fig 278. Medio domo desplegable con barras de aluminio y cubierta textil en lycra. Escenario de conciertos. Mayo 2019. Monterrey, México. DINAMIKA - Sinergia Creativa.