



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

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

Hexagrids plegables y transportables

Un sistema prefabricado con nudos articulados bloqueables

Tesis doctoral realizada por:

Héctor Andrés Cantos Coronel.

Dirigida por:

Dr. Arq. David Garcia Carrera.

Dr. Arq. Ramón Sastre Sastre.

Departamento de Tecnología de la Arquitectura (TA)

Barcelona, septiembre 2019

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Dedicatoria

A Christel, porque cada día me enseñas que la felicidad no se busca, sino que se construye.

Agradecimientos

Quiero agradecerle a la República de Ecuador que, a través de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, me otorgó la beca que me ha permitido llevar esta investigación hasta el final. Este es un claro ejemplo de lo que se puede lograr cuando la política se pone al servicio de los ciudadanos.

A mi director y codirector de tesis, Dr. Arq. Ramón Sastre i Sastre y Dr. Arq. David García i Carrera, que me han acompañado en cada etapa de la construcción de esta tesis. Ustedes han sido un apoyo que va más allá del ámbito académico, han sabido darme la suficiente confianza para continuar por sobre cualquier duda que haya podido tener.

A Omar Avellaneda, por ayudarme con su mirada objetiva a que el documento tenga una estructura que pueda ser entendida y comprendida.

Especial agradecimiento a mi familia que desde la distancia me ha hecho sentir su calor, apoyo y confianza, que me han permitido seguir adelante incluso en los momentos más oscuros.

Presentación de la Tesis.

En este documento parte de la curiosidad del autor por encontrar una forma de prefabricar y transportar porciones de estructura lo más grandes posibles teniendo en cuenta las limitaciones volumétricas de los medios de transporte convencionales.

Como resultado, se concibe un sistema estructural basado en módulos hexagonales cuyos nudos son articulados y bloqueables.

El sistema responde a la necesidad de construir edificaciones de mediana y baja altura en países en vías de desarrollo, que necesitan aumentar y mejorar sus infraestructuras a gran velocidad y a un coste moderado. Para lograr este cometido se absorben recursos de 2 vertientes:

- Analizar y ajustar a su propia escala el desarrollo de fachadas estructurales de módulo hexagonal, conocidas como Hexagrid.
- Buscar la posibilidad de modificar la plegabilidad de los sistemas de barras rectas que se utilizan en las estructuras ligeras para que sean aplicables a superficies planas.

Este documento se divide en 6 capítulos:

En el primer capítulo se hace una aproximación al uso de estructuras de vector activo¹ que desembocan en la construcción de mallas estructurales para, sobre todo, edificaciones de gran altura. Se estudian sus alcances y limitaciones mientras se describen los estudios previos realizados hasta enfocarse en el desarrollo de las mallas hexagonales, que se denominarán Hexagrid.

En este capítulo se concluye que la Hexagrid permite crear un conjunto de piezas estandarizadas, gracias a que responde a una trama modular y regulable, y ahorrar en número de barras y uniones frente a otros sistemas estructurales con una densidad de malla similar.

¹ Los sistemas estructurales de vector activo son conjuntos de barras cuya eficacia se basa en el comportamiento conjunto de los diferentes elementos que trabajan a tracción o compresión. (Engel, 2015)

El segundo capítulo está dedicado a la recopilación de información sobre soluciones utilizadas por otros autores para lograr la articulación y fijado de uniones, casi siempre dentro del ámbito de las estructuras ligeras. En este capítulo se hace un acercamiento a los conceptos básicos necesarios para entender y producir un sistema plegable cuyo movimiento pueda ser controlado y fijado en su posición de uso.

En este capítulo concluye que el diseño del nudo debe ser simétrico, con articulaciones independientes de un grado de libertad, siempre observando la diferencia de escala y de esfuerzos que debe soportar la estructura.

El tercer capítulo se centra en encontrar una configuración geométrica con un dimensionado de barras adecuado para que la estructura pueda recoger eficientemente los esfuerzos planteados. Para esto se exploran modelos que varían en los parámetros de configuración de la malla, tales como la densidad y el encuentro en los cambios de dirección, además de la conexión con los forjados. Posteriormente se propone un modelo teórico tipo que se ajusta a una altura equivalente a 4, 8, 12, 15 y 16 pisos con una configuración espacial de tubo dentro de tubo. A partir de estos modelos se buscan los límites del diseño estructural propuesto, viendo cómo absorben los modelos las cargas aplicadas y la relación entre la deformación producida por el viento y la deformación producida por las cargas verticales.

En este capítulo resalta la importancia del dimensionado del módulo hexagonal que compone la malla, ya que a partir de estas medidas se determina la altura entre forjados y la distribución de su estructura a la vez que se delimitan las posibles dimensiones totales de la edificación sacrificando versatilidad a cambio de estandarización de los elementos.

En el cuarto capítulo se plantea un sistema de plegado, el diseño de las articulaciones del nudo tipo y su sistema de fijación para el modelo propuesto en el capítulo anterior, en su configuración de máxima altura. Se realizan análisis del diseño del nudo para ver su comportamiento y resistencia frente a los máximos esfuerzos obtenidos en el análisis de la estructura del capítulo previo.

Se concluye que la fortaleza del diseño propuesto está en el poco volumen que ocupa, tanto el nudo como el sistema plegado, y en la simpleza de su funcionamiento.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

También se encuentra que es necesario realizar modelos de módulos finitos más complejos que permitan optimizar el uso de material y reducir el peso del nudo.

El quinto capítulo propone una síntesis del trabajo previamente realizado aplicando el conocimiento obtenido en una edificación de 8 pisos de altura. En este capítulo se busca una solución, enfocada en la Hexagrid perimetral, al proceso de transporte y ensamblado de una edificación acercándose a una aplicación real.

En este capítulo se demuestra que es viable empaquetar y almacenar las secciones de estructura en contenedores convencionales² aunque el peso de cada paquete se acerca a la tonelada por lo que el posible entorno de aplicación del sistema se reduce.

En el sexto y último capítulo se hace una recopilación de las conclusiones de cada capítulo para llegar a unas generales en las que se deduce que la adopción del sistema está directamente relacionada con lo ligeras que puedan ser las secciones de estructura, por lo que se recomienda su uso en edificaciones de 8 pisos o menos.

Además, se explica que esta propuesta se encuentra en un estado embrionario y que es necesario hacer análisis adicionales para optimizar el peso de la estructura, ver su viabilidad económica y sustentabilidad en función de casos relacionados con un entorno específico, y completar el diseño específico de todos los componentes.

Thesis introduction.

This document is based on the author's desire to find a way to prefabricate and transport building sections as large as possible taking into account the volume limitations of conventional means of transport.

The result is the design of a structural system based on hexagonal modules with lockable pin joints.

The system responds to the need to construct low and medium height buildings in developing countries, which need to increase and improve their infrastructure at high

² Contenedores de 20' DV y 40'DV

speed and low cost. In order to achieve this goal, the project takes a two-pronged approach:

- Analyse and adjust to scale the development of structural façades in hexagonal modules, known as Hexagrid.
- Investigate the possibility of adjusting the foldability of straight bar systems used in lightweight structures so that they are applicable to flat surfaces.

This document is divided into six chapters:

The first chapter looks at using active vector structures³ in the construction of structural frames, predominantly for high-rise buildings. The scope and limitations of this approach are studied, while describing previous research conducted, then going on to look at the development of hexagonal frames, known as Hexagrid.

This chapter concludes that, thanks to its a modular and adjustable nature, Hexagrid allows a set of standardised pieces to be created and also saves on the number of bars and joints compared to other structural systems with a similar frame density.

The second chapter is dedicated to gathering information on solutions used by other authors to achieve articulation and locking of joints, almost always within the scope of lightweight structures. This chapter touches on the basic concepts required to understand and produce a folding system, the movement of which may be controlled and locked in its position of use.

This chapter concludes that the pin joint design should be symmetrical, with independent joints having a degree of freedom, always observing the different scale and stresses that the structure will need to support.

The third chapter focuses on finding a geometrical configuration with bar dimensions adequate for the structure to efficiently withstand the proposed stresses. It thus explores models that vary in the configuration parameters of the frame, as well as in density and changes of direction, in addition to the connection with the slabs. A standard model is subsequently proposed that fits a height equivalent to 4, 8, 12, 15 or 16 floors

³ Active vector structural systems are sets of bars whose efficiency is based on the combined behaviour of the different elements working under traction or compression (Engel, 2015).

with a spatial configuration of tube within tube. Through these models, we attempt to look for the limits of the proposed structural design, in order to understand how the models absorb applied loads and to understand the relationship between deformation produced by wind and deformation produced by vertical loads.

This chapter highlights the importance of the dimensions of the hexagonal module of which the frame is composed. These measurements are used to determine the height between slabs and the distribution of the structure, at the same time as the possible overall building dimensions are defined, sacrificing versatility for standardisation of parts.

The fourth chapter proposes a folding system, the design of pin joints and a locking system for the model proposed in the previous chapter, in its maximum height configuration. The design of the pin is analysed in terms of its behaviour and resistance against the maximum stresses obtained in the analysis of the structure conducted in the previous chapter.

It is concluded that the strength of the proposed design lies in the small volume occupied by both the pin joint and the folding system, and in the simplicity of its operation. Models of more complex finite modules are required in order to optimise the use of materials and reduce the weight of the pin joint.

The fifth chapter synthesises the work previously conducted by applying the knowledge obtained to an 8-storey building. This chapter seeks a solution, based on a perimeter Hexagrid, to the process of transport and assembly of a building in real-life application.

This chapter demonstrates that it is feasible to package up and store the building sections in conventional containers⁴, although the weight of each package would be around a tonne, so the possible application environment of the system is limited.

The sixth and final chapter brings together the conclusions from each of the previous chapters to reach the overall conclusion that adoption of the system is directly

⁴ 20' DV and 40'DV containers

related to how lightweight the building sections can be made to be. Use of the system is thus recommended in buildings of eight storeys or fewer.

It also explains that this proposal is in the early stages and that further analysis is required to optimise the weight of the structure, assess its financial viability and sustainability in relation to a specific environment, and to finalise the specific design of each component.

Contenido

| | |
|--|------------|
| Dedicatoria | i |
| Agradecimientos | ii |
| Presentación de la Tesis. | iii |
| Thesis introduction. | v |
| Lista de tablas | xiv |
| Lista de imágenes | xvi |
| Introducción | 1 |
| Objetivo general | 2 |
| Objetivos específicos | 3 |
| Delimitación del estudio | 4 |
| Justificación del tema | 5 |
| Desde lo social | 5 |
| Desde la eficiencia ambiental y constructiva | 6 |
| Desde lo técnico | 7 |
| CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES A LAS MALLAS ESTRUCTURALES | 9 |
| 1.1. Introducción: El uso de sistemas de vector activo en estructuras | 10 |
| 1.2. De grandes luces a grandes alturas | 11 |
| 1.2.1. Fazlur Rhaman Khan (1929-1982)..... | 11 |
| 1.3. El sistema Diagrid | 14 |
| 1.3.1 Historia..... | 14 |
| 1.3.2. Estudios..... | 15 |
| 1.4. El sistema Hexagrid | 17 |
| 1.4.1. Los hexágonos en las estructuras | 17 |
| 1.4.2. La arquitectura del tubo de panel de abeja..... | 18 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4.2.1. Primer libro: Honeycomb Tube Architecture: The Spatial Potentialities of Hexagons (2007) | 19 |
| 1.4.2.2. Segundo libro: Honeycomb Dynamics Architecture (2008) | 20 |
| 1.4.2.3. Tercer libro: Honeycomb Tube Architecture Technology (2009)..... | 21 |
| 1.4.3. Otras publicaciones relativas a Hexagrid..... | 22 |
| 1.4.4. El sistema Hexagrid y el sismo | 24 |
| 1.4.5. Otras investigaciones relacionadas con mallas hexagonales..... | 25 |
| 1.4.6. Aplicaciones de la Hexagrid | 27 |
| 1.4.6.1. Sinosteel International Plaza..... | 27 |
| 1.5. Comparativa Diagrid vs. Hexagrid..... | 30 |
| 1.5.1. Mallas desplegadas sometidas a compresión: Diagrids y Hexagrids prefabricadas como estructuras resistentes a carga para edificaciones de mediana altura..... | 31 |
| 1.6. Conclusiones y discusión del capítulo | 33 |
| | |
| CAPÍTULO 2. UNIONES ARTICULADAS: ESTABILIZACIÓN DE LOS NUDOS EN SU POSICIÓN DE USO..... | 35 |
| | |
| 2.1. Una idea, diseñar estructuras modulares que se puedan plegar | 36 |
| 2.2. Nudos | 37 |
| 2.2.1. Tipos de nudos articulados..... | 37 |
| 2.3. Control de movimiento y fijación de posición en mallas..... | 39 |
| 2.4. Algunos ejemplos de diseño de nudos | 41 |
| 2.4.1. Patente I: Medios de bloqueo para trípodes | 41 |
| 2.4.2. Patente II: Ensamble de tubos para estructuras colapsables | 42 |
| 2.4.3. Patente III: Ensamble de nudos para estructura colapsable | 43 |
| 2.4.4. Patente IV: Ensamble de tubos para estructuras colapsables..... | 45 |
| 2.4.5. Patente V: Ensamble de tubos para estructuras colapsables | 46 |
| 2.4.6. Patente VI: Sistema de tienda que usa un nudo tipo araña asociado a una estructura de marco y método para compactar el marco y reducir el tamaño de almacenamiento | 47 |
| 2.4.7. Patente VII: Nudo autobloqueable para estructuras desplegadas | 48 |
| 2.4.8. Enlaces sobre restringidos tipo Bricard..... | 49 |
| 2.5. Conclusiones y discusión del capítulo | 51 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 3. CREANDO UN MODELO CON ESTRUCTURA HEXAGRID... | 53 |
| 3.1. Introducción. ¿Cuáles deben ser las características de una edificación con estructura Hexagrid? | 54 |
| 3.1.1. Modelos exploratorios..... | 55 |
| 3.2. Modelos propuestos..... | 64 |
| 3.3. Metodología aplicada | 66 |
| 3.3.1. Construcción del modelo virtual | 66 |
| 3.3.2. Grupos de elementos para la aplicación de propiedades..... | 67 |
| 3.3.3. Propiedades mecánicas de la estructura | 69 |
| 3.3.3.1. Hexagrid | 69 |
| 3.3.3.2. Forjado..... | 69 |
| 3.3.4. Apoyos y cargas aplicadas | 70 |
| 3.3.5. Viento, metodología y aplicación | 71 |
| 3.3.6. Estados de carga..... | 72 |
| 3.3.7. Cálculo y dimensionado de las estructuras | 73 |
| 3.4. Análisis de resultados..... | 75 |
| 3.4.1. Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil..... | 75 |
| 3.4.2. Peso de la estructura..... | 79 |
| 3.4.3. Comparación entre deformaciones producidas por acción del viento versus deformaciones producidas por las cargas permanentes y la sobrecarga de uso | 81 |
| 3.5. Conclusiones y discusión del capítulo | 83 |
| CAPÍTULO 4. PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE PLEGADO DE MALLA Y DISEÑO DE UN NUDO TIPO | 87 |
| 4.1. Introducción..... | 88 |
| 4.2. Descripción de la estructura a resolver | 89 |
| 4.3. Método de empaquetado de la malla | 91 |
| 4.3.1. El sistema de plegado..... | 91 |
| 4.3.2. Condiciones y limitaciones del diseño del nudo | 93 |
| 4.3.3. Alcance del diseño | 93 |
| 4.4. Metodología de diseño..... | 94 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.1. Concepción de la forma | 94 |
| 4.4.2. Transformación de modelo basado en sólidos a modelo de elementos finitos | 97 |
| 4.4.3. Áreas de aplicación de las fuerzas | 101 |
| 4.4.4. Obtención de las fuerzas | 102 |
| 4.4.4.1. Obtención de datos de estados de carga..... | 102 |
| 4.4.4.2. Transformación de los esfuerzos en cargas puntuales aplicables | 103 |
| 4.4.5. Propiedades mecánicas del modelo tipo A..... | 109 |
| 4.4.6. Análisis de resultados del modelo tipo A..... | 110 |
| 4.4.6.1. Tensiones de Von Mises..... | 110 |
| 4.4.6.2. Deformaciones..... | 114 |
| 4.5. Descripción del modelo tipo A..... | 119 |
| 4.5.1. Pieza Tipo A..... | 119 |
| 4.5.2. Pieza Tipo B..... | 120 |
| 4.6. Funcionamiento de las articulaciones en el nudo: aplicación del sistema de plegado | 124 |
| 4.7. Conclusiones y discusión del capítulo | 125 |
| | |
| CAPÍTULO 5. ENSAMBLADO, EMPAQUETADO Y TRANSPORTE DE UN EDIFICIO TIPO C DE 8 PISOS CON SISTEMA HEXAGRID..... | 127 |
| | |
| 5.1 Introducción..... | 128 |
| | |
| 5.2. Proceso de ensamblado | 129 |
| 5.2.1. Fase 0 | 129 |
| 5.2.2. Fase 1 | 130 |
| 5.2.3. Fase 2 | 131 |
| 5.2.4. Fases 3, 4, 5, 6, 7, 8..... | 131 |
| 5.2.5. Fase 9 | 134 |
| | |
| 5.3. Empaquetado de la estructura | 136 |
| 5.3.1. Proceso de plegado / desplegado de los grupos de barras..... | 141 |
| | |
| 5.4. Transporte de los grupos de barras | 146 |
| 5.4.1. Organización del almacenaje de los grupos de barras en los contenedores y flujo del envío de elementos en función del orden del proceso de construcción..... | 148 |
| | |
| 5.5. Conclusiones y discusión del capítulo | 152 |

| | |
|---|------------|
| CONCLUSIONES, VÍAS DE ESTUDIO Y DISCUSIÓN SOBRE EL TEMA | 155 |
| 6.1 Conclusiones y discusión por capítulo | 156 |
| 6.1.1. Conclusiones y discusión del capítulo 1 | 156 |
| 6.1.2. Conclusiones y discusión del capítulo 2 | 157 |
| 6.1.3. Conclusiones y discusión del capítulo 3 | 158 |
| 6.1.4. Conclusiones y discusión del capítulo 4 | 161 |
| 6.1.5. Conclusiones y discusión del capítulo 5 | 163 |
| 6.2. Conclusiones generales..... | 166 |
| 6.3. Futuras vías de estudio..... | 168 |
| 6.4. Discusión sobre el tema | 172 |
| BIBLIOGRAFÍA | 173 |
| ANEXOS | 178 |

Lista de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Diferencias entre Diagrid y Hexagrid | 30 |
| Tabla 2: Modelos exploratorios Familia 1 | 55 |
| Tabla 3: Modelos exploratorios Familia 2 | 56 |
| Tabla 4: Modelos exploratorios Familia 3 | 57 |
| Tabla 5: Modelos exploratorios Familia 4 | 58 |
| Tabla 6: Modelos exploratorios Familia 5 | 59 |
| Tabla 7: Modelos exploratorios Familia 6 | 60 |
| Tabla 8: Modelos exploratorios Familia 7 | 61 |
| Tabla 9: Modelos exploratorios Familia 8 | 62 |
| Tabla 10: Lista de modelos propuestos | 64 |
| Tabla 11: Grupos de barras en modelo I | 67 |
| Tabla 12: Grupos de barras en modelo II | 68 |
| Tabla 13: Casos de carga (LOAD CASES) aplicados a todos los modelos propuestos..... | 72 |
| Tabla 14: Perfiles dimensionados en Hexagrids perimetrales y núcleos para cada uno de los modelos propuestos | 73 |
| Tabla 15: Perfiles propuestos para su uso en los forjados y el perfil utilizado en cada edificio . | 74 |
| Tabla 16: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 4 pisos tipo C | 76 |
| Tabla 17: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 8 pisos tipo C | 76 |
| Tabla 18: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 12 pisos tipo C | 77 |
| Tabla 19: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 8 pisos tipo C | 78 |
| Tabla 20: Peso de estructura en modelos propuestos tipo C (kg)..... | 79 |
| Tabla 21: Peso de estructura por m ² de forjado en modelos propuestos tipo C (kg/m ²) | 79 |
| Tabla 22: Deformaciones máx. absolutas debido a WIND_x y UDSTL20 en modelos propuestos tipo C..... | 81 |
| Tabla 23: Modelos geométricos, proceso de diseño para modelo nudo tipo A..... | 95 |
| Tabla 24: Modelos de elementos finitos series 6 y 7 para modelo nudo tipo A..... | 98 |
| Tabla 25: Esquema de agrupación de fuerzas en barra representados en color | 101 |
| Tabla 26: Modelos de carga, combinaciones seleccionadas para modelo nudo tipo A..... | 102 |
| Tabla 27: Esfuerzos resistidos en nudo para modelo nudo tipo A del modelo propuesto tipo C de 15 pisos..... | 103 |
| Tabla 28: Fuerzas aplicables puntuales al modelo de nudo tipo A del modelo propuesto tipo C de 15 pisos..... | 104 |
| Tabla 29: Fuerzas aplicadas al modelo de nudo tipo A..... | 105 |
| Tabla 30: dist _{Pext.} y dist _{Pmed.} | 107 |
| Tabla 31: Fuerzas equivalentes a Momentos M1, M2 y M3 en el nudo tipo | 107 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 32: Descomposición de FM2 en sus vectores x y z..... | 108 |
| Tabla 33: Coeficientes $a_{n,barra}$ y $b_{n,barra}$ | 109 |
| Tabla 34: Grupos distribución de espesor en secciones de elementos finitos..... | 109 |
| Tabla 35: Modelos de nudo tipo A utilizados en el análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises | 111 |
| Tabla 36: Análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises en nudo tipo A modelo 7,4 / 11..... | 112 |
| Tabla 37: Análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises en nudo tipo A modelo 4.7 / 12..... | 113 |
| Tabla 38: Análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises en nudo tipo A modelo 7.4 / 17..... | 114 |
| Tabla 39: Modelos de nudo tipo A utilizados en el análisis de deformaciones..... | 115 |
| Tabla 40: Deformación máxima nudo tipo A modelo 7.4 / 11-12 | 115 |
| Tabla 41: Deformación máxima nudo tipo A modelo 7.4 / 11-17 | 116 |
| Tabla 42: Deformación máxima nudo tipo A modelo 7.4 / 12-17 | 116 |
| Tabla 43: Grupo de barras M1 | 136 |
| Tabla 44: Grupo de barras M2 | 137 |
| Tabla 45: Grupo de barras N1 | 139 |
| Tabla 46: Grupo de barras N2..... | 140 |
| Tabla 47: Dimensiones y volumen de transporte de cada grupo de barras | 146 |
| Tabla 48: Dimensiones interiores de contenedores. (Franco, 2011) | 147 |
| Tabla 49: Dimensiones y volumen de transporte de subgrupos de barras M1a, M1e, M2a, M2e | 147 |
| Tabla 50: número de paquetes de grupos de barras por cada etapa de construcción de Hexagrid perimetral. | 149 |
| Tabla 51: Contenedores tipo 20' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral..... | 149 |
| Tabla 52: Contenedores tipo 40' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral..... | 150 |

Lista de imágenes

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: Naciones Unidas, Perspectivas de la Urbanización Mundial. Porcentaje sobre el total de la población (1960-2017). (Banco Mundial, 2017)..... | 5 |
| Ilustración 2: Ciclo de vida de un producto (Anon., 2014)..... | 6 |
| Ilustración 3: Hancock Tower (Path2k6, 2006)..... | 12 |
| Ilustración 4: Sears Tower viendo hacia arriba. (Hero, 2009)..... | 13 |
| Ilustración 5: Torre Shújov: Diseño (izquierda) Torre Eiffel y construcción. (English, 2005) .. | 14 |
| Ilustración 6: Figuras 4-10 de R.B. Fuller en GEODESIC STRUCTURE. (Fuller, 1965)..... | 17 |
| Ilustración 7: Modelos tridimensionales diseñados a partir de nanotubos de carbono (HTA Association, 2007)..... | 18 |
| Ilustración 8: Maquetas conceptuales Hexagrid. (HTA Association, 2007)..... | 19 |
| Ilustración 9: Detalle de componente de 3 brazos en concreto prefabricado. (HTA Association, 2007)..... | 20 |
| Ilustración 10: Posibilidades del módulo hexagonal y su uso dentro de una malla o entramado. (HTA Association, 2008)..... | 20 |
| Ilustración 11: Transformación de una Diagrid a una Hexagrid (de Meijer, 2012, p. 77)..... | 23 |
| Ilustración 12: Comportamiento de la Hexagrid dependiendo del uso de los forjados como diafragmas rígidos (DR). (a) DR. solo en la cubierta, (b) DR. cada 9 pisos y (c) DR en cada piso (Montuori, 2015, p. 143)..... | 24 |
| Ilustración 13: Malla Beehive..... | 26 |
| Ilustración 14: Pentagrid y módulo que la genera. (Taranath, et al., 2014, p. 11)..... | 26 |
| Ilustración 15: Sinosteel International Plaza, Vista estructura (MAD Architects, 2018)..... | 27 |
| Ilustración 16: Sinosteel International Plaza, composición de los paneles estructurales (izq.) y vista interior (MAD Architects, 2018)..... | 28 |
| Ilustración 17: Sinosteel International Plaza, perspectiva exterior (MAD Architects, 2018)..... | 29 |
| Ilustración 18: Tramas hexagonales propuestas de izquierda a derecha: Hexagrid vertical, Hexagrid horizontal, Hexagonal truncada vertical y Hexagonal truncada horizontal (Cantos Coronel, 2015, p. 39)..... | 31 |
| Ilustración 19: Diagrids propuestas comparten longitud de barra con Hexagrid (izq.) y comparten área con módulo Hexagrid (Cantos Coronel, 2015, p. 40)..... | 31 |
| Ilustración 20: Emilio Pérez Piñero mostrando una maqueta de su estructura reticular estérea plegable en 1961 (Escrig, 1993)..... | 36 |
| Ilustración 21: Tipos de nudos articulados posibles (Gil Llorca, 2019)..... | 38 |
| Ilustración 22: Iris Dome modelo de trabajo a escala: un entramado auto estable (Hoberman, 1993)..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 23: Malla cuadrangular desplegable, un sistema aparentemente auto estable pero que necesita la adición de una barra para encontrarla (Escrig, et al., 1996) | 39 |
| Ilustración 24: Figuras 1, 2 y 3 que ilustran el diseño del tornillo central que bloquea el pivote que a su vez bloquea todo el sistema (TORR., 1917) | 41 |
| Ilustración 25: Figuras 1, 2 y 3 describiendo el diseño del nudo (Zeigler, 1981) | 42 |
| Ilustración 26: Vista superior (fig. 1) y vista inferior del diseño (Beaulieu, 1986)..... | 43 |
| Ilustración 27: Vistas laterales en posición abierta (fig. 3) y cerrada. (Beaulieu, 1986)..... | 44 |
| Ilustración 28: Ensamble del nudo, vista superior (fig. 5) y corte. (Beaulieu, 1986)..... | 44 |
| Ilustración 29: Componentes del del nudo (Zeigler, 1989)..... | 45 |
| Ilustración 30: Primer diseño de nudo (Cantos, 2015, p. 60)..... | 45 |
| Ilustración 31: Figuras 5A, 6A, 5B, 6B, 5C, 6C; muestran el proceso de doblado de las láminas que se transforman en el nudo. (Kubica & Crandell, 2015)..... | 46 |
| Ilustración 32: Fig. 9 Unión de barras en el nudo (Kubica & Crandell, 2015) | 46 |
| Ilustración 33: Fig. 1 Nudo completo. Fig. 2 Proceso de ensamblado (Kubica & Crandell, 2015) | 46 |
| Ilustración 34: Nudo tipo araña de 4 barras (Samuel, 2018)..... | 47 |
| Ilustración 35: Nudo tipo araña de 4 barras desplegado (izq.) y plegado (Samuel, 2018)..... | 47 |
| Ilustración 36: Proceso de giro de la barra dentro del nudo (Samuel, 2018) | 48 |
| Ilustración 37: Despiece del nudo propuesto (Pérez Valcárcel, et al., 2018)..... | 49 |
| Ilustración 38: Axonometrías del nudo con las barras en proceso de despliegue (izq.) y desplegadas. (Pérez Valcárcel, et al., 2018) | 49 |
| Ilustración 39: Enlaces I tipo Bricard híbridos y sus parámetros geométricos (Chen, 2003) | 50 |
| Ilustración 40: Enlaces II tipo Bricard híbridos y sus parámetros geométricos (Chen, 2003) | 50 |
| Ilustración 41: Isometría modelo base realizado en AutoCAD..... | 66 |
| Ilustración 42: Disposición de vigas en forjado tipo | 69 |
| Ilustración 43: Modulación de capa de hormigón en forjado tipo..... | 69 |
| Ilustración 44: Disposición de apoyos en modelo..... | 70 |
| Ilustración 45: Aplicación de carga puntual de 2 kN en forjado de cubierta | 71 |
| Ilustración 46: Coeficientes aplicados en programa SAP2000 V.19 para la obtención de cargas de viento (WIND_X) en modelos propuestos | 71 |
| Ilustración 47: Peso por m2 de forjado de estructura en modelos propuestos tipo C..... | 80 |
| Ilustración 48: Peso por m2 de forjado de estructura de acero en modelos propuestos tipo C ... | 81 |
| Ilustración 49: Deformaciones máx. absolutas debido a WIND_x y UDSTL20 en modelos propuestos tipo C..... | 82 |
| Ilustración 50: Vista en planta modelo propuesto 15 pisos tipo C | 89 |
| Ilustración 51: Axonometría modelo propuesto 15 pisos tipo C..... | 89 |
| Ilustración 52: Nudo No. 14, Intersección de barras 11, 12 y 17..... | 90 |

| | |
|---|--|
| Ilustración 53: Diagrama de tensiones S11 en barras 11, 12 y 17. (N/mm ² UDTSL7)..... | 90 |
| Ilustración 55: Plegado conceptual del sistema, vista en alzado..... | 92 |
| Ilustración 54: Plegado conceptual del sistema, vista en planta..... | 92 |
| Ilustración 56: Plegado conceptual del sistema, vista en axonometría | 92 |
| Ilustración 57: Modelo 5 tipo X..... | 97 |
| Ilustración 58: Modelo 5 tipo Y..... | 98 |
| Ilustración 59: Esquema de colores de agrupación de fuerzas | 101 |
| Ilustración 60: Ubicación de fuerzas en nudo tipo..... | 101 |
| Ilustración 61: Sección ilustrativa del nudo tipo A..... | 106 |
| Ilustración 62: Espesores de sección aplicados..... | 110 |
| Ilustración 63: Agrupación de módulos finitos por colores para aplicación de espesores de sección..... | 110 |
| Ilustración 64: Deformación máxima resultante UDSTL7 modelo 7.4 / 11-12 | 117 |
| Ilustración 65: Deformación máxima resultante UDSTL10 modelo 7.4 / 11-12 | 117 |
| Ilustración 66: Deformación máxima resultante UDSTL7 modelo 7.4 / 11-17 | 118 |
| Ilustración 67: Deformación máxima resultante UDSTL10 modelo 7.4 / 12-17 | 118 |
| Ilustración 68: Pieza tipo A, vista en planta | Ilustración 69: Pieza tipo A, vista en alzado |
| | 119 |
| Ilustración 70: Pieza tipo A, axonometría..... | 120 |
| Ilustración 71: Pieza tipo B, vista en planta | 120 |
| Ilustración 72: Pieza tipo B, vista en alzado | 120 |
| Ilustración 73: Pieza tipo B, axonometría | 121 |
| Ilustración 74: Nudo con barras desplegadas, axonometría | 121 |
| Ilustración 75: Proceso de plegado1, axonometría..... | 122 |
| Ilustración 76: Proceso de plegado 2, axonometría..... | 122 |
| Ilustración 77: Proceso de plegado 3, axonometría..... | 123 |
| Ilustración 78: Nudo con barras plegadas, axonometría | 123 |
| Ilustración 79. Proceso de desplegado de barras, axonometría | 124 |
| Ilustración 80: Modelo propuesto de 8 pisos tipo C..... | 128 |
| Ilustración 81: Vista de Hexagrid perimetral (rojo) con sus respectivos nudos..... | 128 |
| Ilustración 82: Nudo tipo A (izq.), nudo tipo B (centro), nudo tipo C (der.), para edificio de 8 pisos tipo C..... | 129 |
| Ilustración 83: Fase 0 (Axonometría y alzado)..... | 130 |
| Ilustración 84: Fase 1 (Axonometría y alzado)..... | 131 |
| Ilustración 85: Fase 2, forjado 1. (Axonometría y alzado)..... | 131 |
| Ilustración 86: Fase 3, forjado 2. (Axonometría y alzado)..... | 132 |
| Ilustración 87: Fase 4, forjado 3. (Axonometría y alzado)..... | 132 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 88: Fase 5, forjado 4. (Axonometría y alzado)..... | 133 |
| Ilustración 89: Fase 6, forjado 5. (Axonometría y alzado)..... | 133 |
| Ilustración 90: Fase 7, forjado 6. (Axonometría y alzado)..... | 134 |
| Ilustración 91: Fase 8, forjado 7. (Axonometría y alzado)..... | 134 |
| Ilustración 92: Fase 9, forjado 8 de cubierta. (Axonometría y alzado) | 135 |
| Ilustración 93: Esquema de plegado del sistema propuesto en el cap. 4..... | 141 |
| Ilustración 94: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M1, vista en planta | 142 |
| Ilustración 95: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M1, vista en alzado..... | 142 |
| Ilustración 96: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M1, perspectiva lateral . | 142 |
| Ilustración 97: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M2, vista en planta | 143 |
| Ilustración 98: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M2, vista en alzado..... | 143 |
| Ilustración 99: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M2, perspectiva lateral . | 143 |
| Ilustración 100: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N1, vista en planta | 144 |
| Ilustración 101: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N1, vista en alzado | 144 |
| Ilustración 102: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N1, perspectiva lateral | 144 |
| Ilustración 103: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N2, vista en planta | 145 |
| Ilustración 104: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N2, vista en alzado | 145 |
| Ilustración 105: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N2, perspectiva lateral | 145 |
| Ilustración 106: Perspectiva de contenedores tipo 20' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral | 150 |
| Ilustración 107: Perspectiva de contenedores tipo 40' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral | 151 |
| Ilustración 108: Base edificación con Hexagrid con planta hexagonal..... | 169 |
| Ilustración 109: Posibilidades del módulo hexagonal y su uso dentro de una malla o entramado. (HTA Association, 2008) | 169 |
| Ilustración 110: Nudo tipo A (izq.), nudo tipo B (centro) y nudo tipo C (der.) para edificio de 8 pisos tipo C..... | 170 |
| Ilustración 111: Posible forjado basado en Hexagrid..... | 171 |

Introducción

La transformación del espacio habitado avanza a pasos cada vez más acelerados y de maneras que poco o nada tienen que ver con lo que se planificó alguna vez. Al mismo tiempo, la sobreexplotación de los recursos naturales para satisfacer las necesidades de esta sociedad cambiante muestra que la única manera de sobrevivir como civilización global es mediante el uso mínimo, eficiente y consciente de las materias primas y la energía que se requiere para producir productos listos para el consumo y, en el caso del objeto edificación, para ser ocupados.

Construir rápidamente y eficientemente objetos arquitectónicos ambientalmente viables preparados para ser ocupados, modificados y reparados de manera sencilla durante su vida útil es algo más que una aspiración dentro de la industria de la construcción. Es un objetivo hacia donde todos deben dirigir los recursos intelectuales y económicos para poder desarrollar nuevas tecnologías y reacoplar sistemas constructivos convencionales a los requerimientos actuales y futuros de tal forma que los elementos que componen los edificios puedan ser reutilizados y reciclados dentro de la cadena de manufactura evitando así, en lo máximo posible, la producción de residuos e incentivando el ahorro de energía.

La intención de este documento no es otro que intentar demostrar que es posible obtener soluciones en los ámbitos del diseño estructural, específicamente en el diseño de rascacielos y en la plegabilidad de estructuras ligeras de barras rectas, y aplicarlas en una escala más común dentro de la construcción con un menor requerimiento de desarrollo tecnológico.

Objetivo general

A partir del sistema estructural Hexagrid se desarrolla una propuesta constructiva prefabricada que, mediante el diseño de nudos articulados bloqueables, tenga la capacidad de plegarse para su transporte y que pueda ser desplegada para el ensamblado de edificaciones de baja y mediana altura que no utilicen pilares en su configuración.

Es decir, lo que se quiere conseguir es plantear una nueva forma de enfrentar el diseño, fabricación y ensamblaje de mallas estructurales a partir de la prefabricación de sus elementos y mejorar las posibilidades de transporte de piezas más grandes y complejas a partir de una disminución de su volumen mediante un sistema de plegado y desplegado que pueda ser fijado en su posición final.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Objetivos específicos

Explicados más en profundidad en cada capítulo, los objetivos específicos son:

Entender el funcionamiento en profundidad de la malla Hexagrid.

Buscar referencias de sistemas plegables, con sus alcances y limitaciones, que permitan desarrollar un método de plegado propio.

Determinar una configuración conveniente de un modelo basado en Hexagrid dentro de los parámetros que se proponen en la investigación.

Encontrar un diseño de nudo que permita el desarrollo de un sistema de plegado para la malla Hexagrid y que, al mismo tiempo, se pueda fijar en una posición para hacer posible el correcto funcionamiento de la estructura.

Aplicar los conocimientos desarrollados en una edificación con la que se pueda demostrar el proceso de transporte y ensamblado del sistema.

Delimitación del estudio

La intención de esta investigación es encontrar maneras de desarrollar este sistema constructivo en países de Latinoamérica, donde el desarrollo industrial está concentrado en zonas específicas pero la necesidad de infraestructura abarca un gran territorio que cuenta con unas vías de comunicación existentes pero limitadas. Teniendo en cuenta estas condiciones de entorno, se han tomado las decisiones técnicas que se describen a continuación.

Dentro de las mallas Hexagrid, que son mallas estructurales regulares basadas en hexágonos, se planteará el uso de la malla Hexagrid regular, en la que cada uno de sus módulos comparten la misma dimensión de lados y cuyos ángulos entre barras son de 120 grados. La dirección de los módulos en la malla será con los módulos dispuestos horizontalmente, lo que implica que 2 de los lados de todos los módulos serán paralelos a los forjados.

El estudio se enfocará en edificaciones cuyo índice de esbeltez sea inferior a 4 en relación de la base con la altura del edificio, por lo que los modelos que se han diseñado y analizado se encuentran entre los 4 y los 16 pisos. Aunque la base de esta investigación pasa por el uso del sistema en edificaciones que estarán cercanas al rango de los 8 pisos de altura, se considera que dentro del ejercicio académico se debe extender la altura de las edificaciones con el fin de buscar los límites del sistema propuesto.

Los modelos diseñados han sido calculados y validados en base a las normativas europeas que recogen los principios para el cálculo de estructuras, siendo las acciones permanentes y variables aplicadas según la normativa del Eurocódigo 1 EN 1991-1-4:2005 y el cálculo de secciones de acero en función del Eurocódigo 3 EN 1993-1-4:2006.

Aunque la aplicación de esta investigación está pensada para países de Latinoamérica, la investigación se ha realizado dentro de la Unión Europea. Por este motivo, se ha considerado que utilizar este conjunto de normas, que es lo conocido y reconocido en el ambiente en el que se ha desarrollado el trabajo, es lo más adecuado.

También se ha pensado en que el material más adecuado para todos los modelos propuestos sea el acero S355. Se utiliza el acero como material de referencia porque es un material uniforme cuyo comportamiento estructural ha sido estudiado y normalizado.

Justificación del tema

A partir de la hipótesis principal de la investigación, que plantea que se puede desarrollar un sistema estructural plegable que pueda ser prefabricado, transportado y ensamblado a partir de las mallas Hexagrid, enfocado principalmente a edificaciones de baja y mediana altura, se puede ver la importancia de realizar la investigación desde distintos ámbitos.

Desde lo social

La población se concentra cada vez más en entornos urbanos. Este cambio se hace más notorio en países en vías de desarrollo, donde las migraciones internas han provocado el abandono del entorno rural por falta de oportunidades y la creación de asentamientos en los perímetros urbanos.

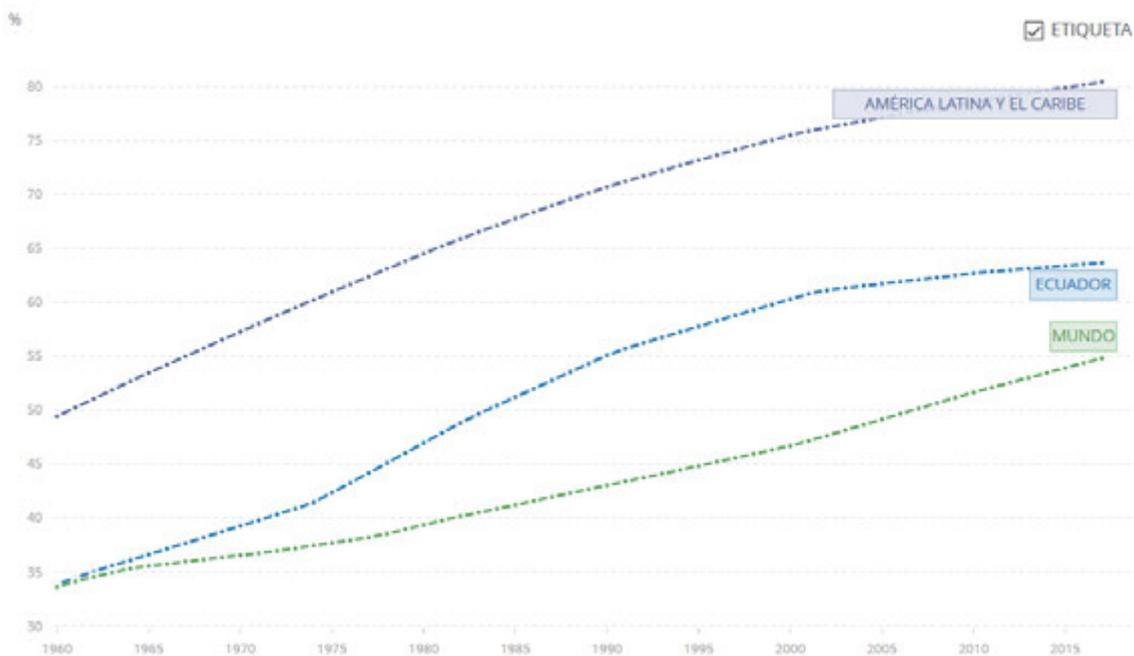


Ilustración 1: Naciones Unidas, Perspectivas de la Urbanización Mundial. Porcentaje sobre el total de la población (1960-2017). (Banco Mundial, 2017).

Este comportamiento poblacional ha llevado a que se ejerza una presión sobre las ciudades para que crezcan y utilicen el terreno para cubrir las necesidades a través de unas nuevas infraestructuras que sirvan para acompañar y ayudar a articular los nuevos desarrollos urbanos. El autor considera que la Hexagrid es un sistema estructural de

construcción relativamente rápido que ofrece unas claras ventajas para la planificación de edificaciones que puedan ser capaces de albergar en su interior diferentes tipos de actividades, incluso de forma simultánea, modificables durante el transcurso de su vida útil.

Desde la eficiencia ambiental y constructiva

El planeta ofrece una cantidad limitada de recursos que, año tras año, se consumen a una velocidad tan alta que a la Tierra le es imposible regenerarlos (EFE, 2018) y sobreexplotando los ecosistemas hasta puntos tan extremos que, probablemente, ya no haya vuelta atrás.

Además, los procesos industriales que se utilizan para transformar las materias primas en productos para el consumo gastan tanta cantidad de energía y generan tal cantidad de residuos contaminantes que están potenciando procesos medioambientales que amenazan con cambiar el clima, hecho que pone en riesgo la vida tal y como se la conoce.



Ilustración 2: Ciclo de vida de un producto (Anon., 2014)

Como respuesta, desde la industria de la construcción, se aspira a pasar de un proceso de construcción artesanal a un proceso de construcción totalmente industrializado que invite a ensamblar los edificios con piezas estandarizadas previamente prefabricadas, que sean intercambiables y adaptables. Esto llevaría a una producción nula de residuos,

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

tanto al inicio de su construcción como durante su tiempo de vida, y a que las piezas que los compongan sean reutilizables o, al menos, reciclables utilizando la menor cantidad de energía posible en el proceso.

Del proceso constructivo que se propone con las mallas Hexagrid plegables se espera que las construcciones se lleven a cabo en menos tiempo gracias a la estandarización de secciones y longitud de barras y los sistemas de anclaje. También con un número menor de mano de obra especializada porque la mayor parte del trabajo complejo se produciría en un taller. Al crear espacios diáfanos, se espera que las edificaciones tengan capacidad de responder rápidamente a los cambios de uso y la implementación de nuevas tecnologías, lo que permitiría un uso más dinámico del mismo.

Desde lo técnico

La propuesta de un espacio contenedor de actividades que pueden variar con el tiempo invita a crear espacios versátiles, que a medida de lo posible no estén condicionados por elementos permanentes. Desde el punto de vista estructural, una de las posibles respuestas es concentrar y mover la estructura hacia el exterior para que la interacción con el resto de los elementos arquitectónicos no sea intrusiva.

Los sistemas industriales de fabricación se vuelven eficientes cuando los productos están contruidos de tal manera que los tipos de pieza utilizados son los mínimos posibles y los procesos de ensamblado y montaje son pocos y repetitivos. Por las razones antes mencionadas se concluye que utilizar un esquema estándar de entramado de módulos regulares es lo más adecuado, un sistema con el que sin perder su configuración geométrica se puede escalar para responder a las necesidades de diseño.

De los 3 posibles sistemas de teselado que se pueden realizar con polígonos regulares (cuadrados, triángulos equiláteros y hexágonos), se considera que el teselado compuesto de hexágonos es el que ocupa el espacio con el menor perímetro interior de barras⁵. En el diseño de una malla estructural este comportamiento se ve reflejado en una optimización en el número de uniones o nudos.

⁵ Ver Conjetura del panal de abeja.

En trabajos anteriores (Cantos, 2015) desarrollados por el autor de esta investigación se llega a la conclusión de que el sistema Hexagrid de módulo “horizontal” es el más eficiente estructuralmente cuando su uso se enfoca en edificaciones de baja y mediana altura, cuyos esfuerzos principales de diseño van a ser los generados por las fuerzas permanentes en los forjados.

Para un ensamblado más rápido y eficiente se recurre al uso de elementos prefabricados (Tam, et al., 2007). Pero mientras la teoría indica que las piezas prefabricadas deben ser lo más grandes posible, el transporte de dichas piezas crea limitaciones tanto a nivel volumétrico como de peso. Por consiguiente, incluir el concepto de plegabilidad de barras permitiría llevar piezas prefabricadas potencialmente mucho más grandes de lo que permite un sistema similar no plegable.

Capítulo 1. **Antecedentes** a las mallas estructurales

1.1. Introducción: El uso de sistemas de vector activo en estructuras

El uso de barras para construir estructuras portantes no es nada nuevo. De hecho, existen ejemplos de estructuras ligeras hechas de madera y recubiertas con pieles o telas hechas por culturas nómadas para poder protegerse del entorno sin perder su capacidad de movimiento.

A partir del siglo XVIII, existe un avance en la teoría de las estructuras, primero en métodos gráficos y más tarde en analíticos, y del desarrollo tecnológico de la industria metalúrgica. A causa de esto se va hacia un marcado uso del acero para el diseño y la construcción de sistemas de vector activo, que se entienden como estructuras que soportan los esfuerzos cambiando la dirección de las fuerzas, dividiendo las solicitaciones en diferentes direcciones a través de 2 o más barras y equilibrándolas mediante las correspondientes reacciones (Engel, 2001, 2015).

Como ejemplo básico de este tipo de sistemas estructurales tenemos las celosías inicialmente utilizadas en la construcción de puentes, materia sobre la que ya en 1811 Thomas Pope (-) había tratado en su libro *A Treatise on Bridge Architecture: In which the Superior Advantages of the Flying Pendant Lever Bridge are Fully Proved*.

Actualmente, dentro del campo de la arquitectura, las celosías son utilizadas, en su mayoría, en espacios donde deben evitarse soportes intermedios y donde suele ser necesario cubrir luces de gran magnitud con cubiertas ligeras, por lo que es común verlas en todas sus variantes en naves industriales, aeropuertos o instalaciones deportivas, entre otros.

1.2. De grandes luces a grandes alturas

Ya a finales del siglo XIX se empieza a pensar que mediante el uso de entramados se pueden resolver elementos estructurales desarrollados en altura. Como ejemplo emblemático tenemos la Torre Eiffel, construida para la Exposición Universal de París de 1889. Este fue un paso revolucionario, ya que se adaptó una tipología estructural concebida en horizontal a una solución estructural en vertical, lo que dio paso a una nueva forma de construir las torres y los edificios en altura (Señis, 2014), (Billington, 1985).

En la segunda mitad del siglo XX empieza un pulso por construir edificaciones cada vez más altas cuyo fin no es solo la explotación económica del predio, sino que es un símbolo de poder político y empresarial. Bajo estas circunstancias se empieza a notar que a partir de cierta altura cada vez tienen más importancia los esfuerzos laterales producidos por el viento y el sismo sobre los esfuerzos verticales producidos por el peso propio de la estructura y las cargas vivas.

Se puede buscar el inicio del desarrollo de los sistemas estructurales tubulares en la tesis de máster hecha por Myron Goldsmith en 1953, bajo la supervisión de Mies Van de Rohe, en el Illinois Institute of Technology, Chicago. Es aquí donde se desarrolla la idea de la estructura tipo tubo, que consiste en agrupar y colocar los elementos estructurales en el perímetro creando una especie de cajón alrededor del edificio. Dicha estructura será la encargada de trasladar las cargas verticales de los forjados y de resistir los esfuerzos laterales que son los de mayor magnitud.

En aquella tesis se proponen 3 tipos de estructuras tubulares: Diagrid de malla irregular variable, Diagrid de malla regular estrecha y una solución de mega diagonales (Goldsmith, 1953). Fazlur Rhaman Khan prestó más atención al desarrollo del sistema de mega diagonales, mientras que los otros 2 sistemas propuestos se han desarrollado más recientemente, cuando la tecnología de construcción lo ha permitido y la necesidad de lograr edificaciones más altas con volumetrías más complejas lo han exigido (Montuori, 2015).

1.2.1. Fazlur Rhaman Khan (1929-1982)

Es considerado uno de los mejores ingenieros civiles y arquitectos de los últimos 150 años. Fazlur Khan, dentro del estudio Skidmore, Owings & Merrill (SOM),

revolucionó la forma de diseñar edificios de gran altura, convirtiéndose así en el padre conceptual de los grandes edificios desde la segunda mitad del siglo XX.

De acuerdo con David Billington, el trabajo de Khan ejemplifica el concepto de Arte estructural, que se define como “*El primer fundamento del arte estructural es la disciplina de la eficiencia, un deseo por la mínima materialidad, resultando en menos peso, menos costo y menos masa visual*” (Weingardt, 2011).⁶

La aplicación del Arte estructural se puede observar claramente en su obra maestra, el edificio John Hancock Center (1965), con su estructura perimetral en acero, que está compuesta de pilares muy separados entre sí y grandes diagonales que rigidizan el conjunto para que pueda soportar los esfuerzos laterales. Con este sistema estructural se construye una edificación que alcanza los 344 metros y los 100 pisos de altura.



Ilustración 3: Hancock Tower (Path2k6, 2006)

Además del cambio conceptual de la estructura, desde el menos eficiente sistema Vierendeel aporticado hasta el sistema más eficiente de cantiléver con diagonales

⁶ “The first fundamental of structural art is the discipline of efficiency; a desire for minimum materials, resulting in less weight, less cost and less visual mass”.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

(Iyengar, 2000)⁷, y de la evolución que esto significó para la construcción de edificios cada vez más altos, se hizo patente la necesidad de usar computadoras con programas especializados para un cálculo estructural más preciso y eficiente.⁸

En el diseño de la Sears Tower (1973), Khan propone el sistema estructural de tubos agrupados, la estructura está compuesta por 9 tubos cuadrados cuya dimensión es de 22,9 m por lado cortados cada uno a diferentes niveles. La expresión formal de la independencia de cada tubo es contrastada a nivel mecánico, donde cinturones de cerchas de acero envuelven el edificio a ciertos niveles agrupando los tubos (Sev, 2001). Además de crear el edificio que fue el más alto del mundo con sus 443 m, el sistema de tubos agrupados liberó la forma de plantear el volumen de los rascacielos, permitiendo ir más allá del cubo en su concepción formal.



Ilustración 4: Sears Tower viendo hacia arriba. (Hero, 2009)

⁷ “The Vierendeel form steel-tiered system has occupied the attention of tall building designers for nearly six decades until the early 1960s, with successive improvements in the same system without significant change in the form of the structure. However, during the decade of the 1960s, there was a dramatic improvement in the technology of tall building structures. The system evolution has gone from the less efficient Vierendeel structural system to the more efficient cantilever systems represented by the Hancock Center, Sears Tower, and other tall buildings” (Iyengar, 2000, pp. 44-45).

⁸ Hal Iyengar nos explica en su artículo “Reflections on the Hancock Concept” que utilizaron un computador IBM 1620 con un software que les permitía resolver problemas de máximo 51 nudos.

1.3. El sistema Diagrid

El sistema Diagrid consiste en una estructura tubular compuesta únicamente por barras diagonales que son capaces de transportar los esfuerzos verticales y laterales de una edificación prescindiendo de los pilares. Su configuración en diamante, unido a la rigidez de los forjados, permite un comportamiento axial de las fuerzas en las barras, lo que hace que sea un sistema muy eficiente y que a la vez tenga un gran potencial estético para el diseño de los elementos arquitectónicos.

1.3.1 Historia

La primera vez que se utilizó un sistema tubular compuesto de diagonales fue, tan solo, 30 años después de la construcción de la Torre Eiffel. Entre 1920 y 1922 se construye la torre Shújov en Moscú. Esta torre de telecomunicaciones es una estructura hiperboloide, resultado de la colaboración entre el Ing. Vladímir Shújov (1853-1939) y un matemático para conseguir el diseño más resistente con la mínima cantidad de material posible (Korsavi & Maqhareh, 2014).

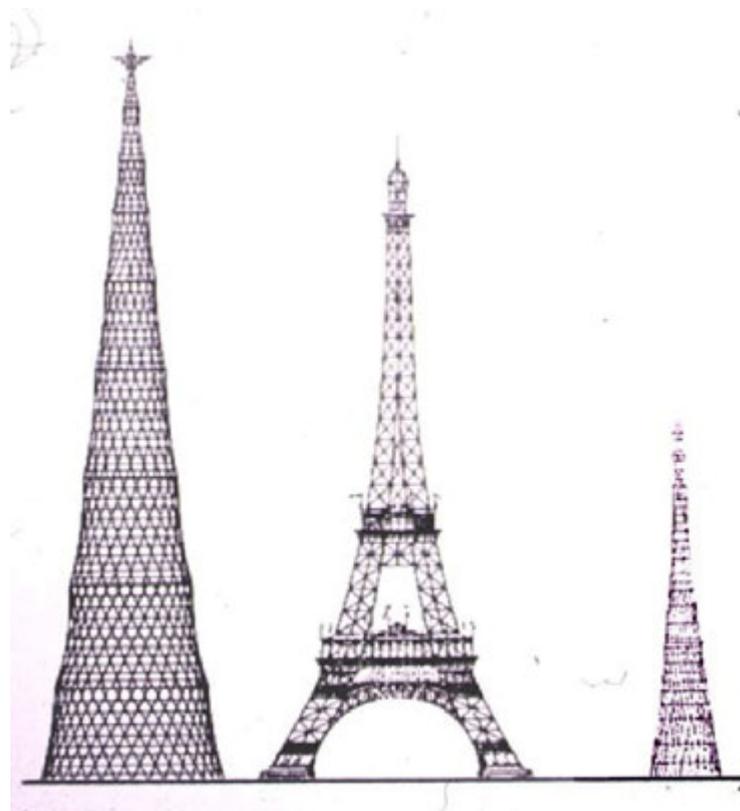


Ilustración 5: Torre Shújov: Diseño (izquierda) Torre Eiffel y construcción. (English, 2005)

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Como edificación, aunque se podría coger el IBM Building (1963), en Pittsburg, diseñado por Curtis and Davis, como un primer acercamiento al uso del sistema Diagrid, es a partir del inicio del siglo XXI que el arquitecto Norman Foster y ARUP usan en sus diseños⁹ el concepto de Diagrid (Boake, 2013) para estructuras de edificios de gran altura.

1.3.2. Estudios

En un inicio los estudios realizados sobre el sistema Diagrid pivotaron principalmente sobre 2 temas: el comportamiento mecánico de las mallas y los posibles métodos de precálculo y el proceso de construcción de los nudos de las mallas. Es aquí donde entra el trabajo realizado a nivel teórico por K.S. Moon¹⁰, que, dentro del sistema Diagrid, plantea una “*metodología simple para determinar el tamaño de las secciones [...] para edificios en un rango de 20 a 60 pisos...*” (Moon, et al., 2007). Su sistema de predimensionado basado en la rigidez demuestra ser más útil que el sistema convencional basado en la resistencia a los esfuerzos, esto enfocado a edificios altos, que son relativamente ligeros y flexibles y donde el diseño estructural está basado más en el movimiento que en los esfuerzos (Moon, et al., 2007, p. 230).

Moon continúa refinando su método de precálculo, incluso marcando un rango de acción basado en la esbeltez de los edificios marcados entre 4.3 y 8.7 (Moon, 2009, p. 401). Marcando las posibilidades estéticas de una malla Diagrid, pero también la dificultad y coste que suelen tener respecto a las uniones ortogonales más convencionales, se recomienda una estrategia que aproveche la prefabricación de elementos mientras se aprovecha también la configuración triangular de la malla, que hace posible que las conexiones de los nudos no sean rígidas.

T.M Boake profundiza el trabajo enfocándolo hacia el detalle y la construcción de las Diagrid e intentando “*...cerrar la brecha entre la investigación de ingeniería publicada y el diseño actual y la construcción de estructuras Diagrid*”¹¹ (Boake, 2013).

⁹ Nos referimos al London City Hall (2002), Swiss Re (2001-2003) y Hearst Tower (2003-2006).

¹⁰ Arquitecto que ha desarrollado su trabajo académico en Yale e Illinois Urbana Champaign mientras su trabajo profesional lo ha desarrollado en Skidmore, Owings & Merrill (SOM), al igual que Khan.

¹¹ There exists a large lag between the published engineering research and the actual design and construction of diagrid structures.

En sus publicaciones busca encontrar la correcta interacción entre la malla estructural y los distintos tipos de muros cortina.

A partir del año 2010 se han publicado una gran variedad de artículos que han profundizado en el conocimiento del comportamiento de las mallas Diagrid en edificaciones, incluso han llevado el concepto a tales niveles de afinación que las mallas son cada vez más elaboradas. Como ejemplos de este tipo de trabajo tendríamos el análisis de las direcciones principales identificadas por sus líneas isostáticas para la optimización de mallas estructurales de acero envolventes en edificios en altura, desarrollada por Roger Señis López en el año 2014 (Señis, 2014, p. 1), y la búsqueda de patrones geométricos alternativos para las mallas Diagrid, que juega con diferentes ángulos y densidades en una misma malla para alcanzar un mayor grado de eficiencia desde un punto de vista estructural, según estudios realizados en Italia (Montuori, et al., 2014) y China (Zhao & Chonghou, 2015).

1.4. El sistema Hexagrid

1.4.1. Los hexágonos en las estructuras

Jugando un rol de antítesis a la corriente principal¹² (HTA Association, 2007), el desarrollo de un lenguaje arquitectónico basado en hexágonos ha sido desarrollado a través del tiempo de un modo no lineal pero continuo, teniendo como ejemplos de referencia las mallas geodésicas de Buckminster Fuller, que fueron diseñadas para la feria mundial de Montreal de 1957, o la arquitectura islámica contemporánea de Zvi Hecker con Alfred Neuman.

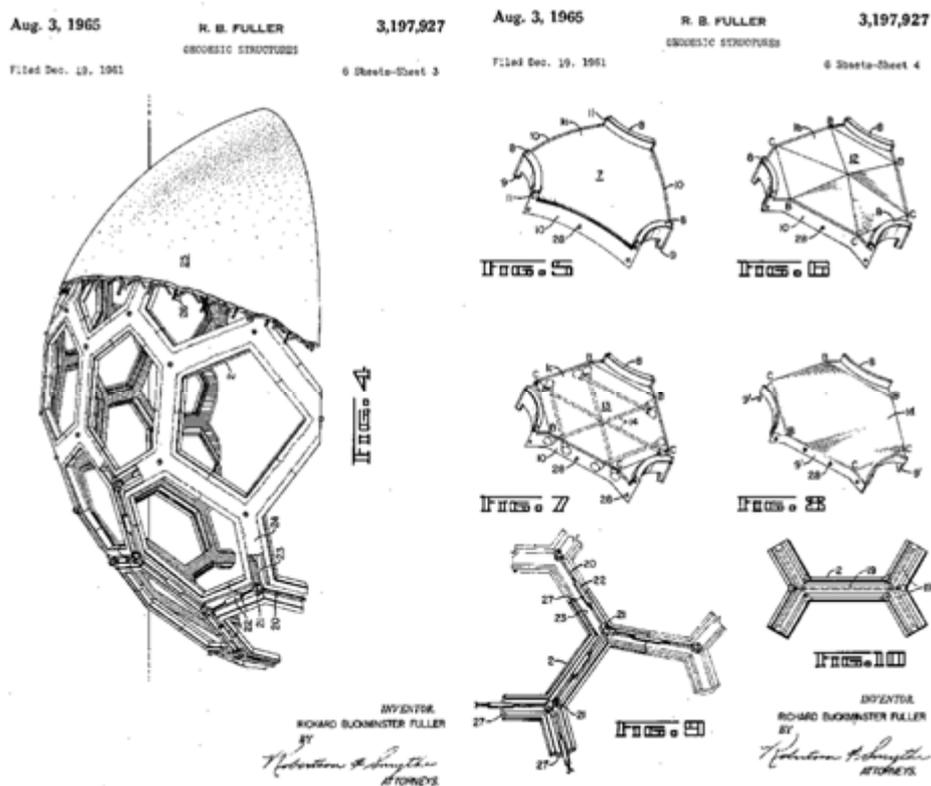


Ilustración 6: Figuras 4-10 de R.B. Fuller en *GEODESIC STRUCTURE*. (Fuller, 1965)

Una de las razones principales para utilizar la malla hexagonal en arquitectura es cuando se logra la comprobación de la conjetura del panal de abeja, que a pesar de ser un problema al que se refiere desde la antigüedad como en la antigua Roma (Weisstein,

¹² "Hexagonal architecture does not form a single flow in history, nor has it ever generated a dominant trend. However, looking back upon it now, we might perhaps say that these designs have always played the role of posing an antithesis to the main current".

2001), se logra demostrar matemáticamente a finales del siglo XX. La conjetura afirma que un teselado hexagonal es la mejor manera de dividir una superficie en regiones con una misma área y con el mínimo perímetro total (Hales, 1999).

En el enfoque de mallas de módulo hexagonal como sistemas estructurales para edificaciones toma especial relevancia las investigaciones y modelos realizados en la universidad de Dohan, Japón, por la HTA Association, que parten del conocimiento formal de la organización de átomos de carbono en un sistema de hexágonos para generar los nanotubos de carbono.

1.4.2. La arquitectura del tubo de panel de abeja¹³

La HTA Association planteó la hipótesis de que se puede desarrollar un sistema estructural tubular basado en mallas de módulo hexagonal lo suficientemente rígido como para que su uso en la construcción de estructuras para edificaciones pueda considerarse viable. A este sistema lo llamaron tubo de panel de abeja.

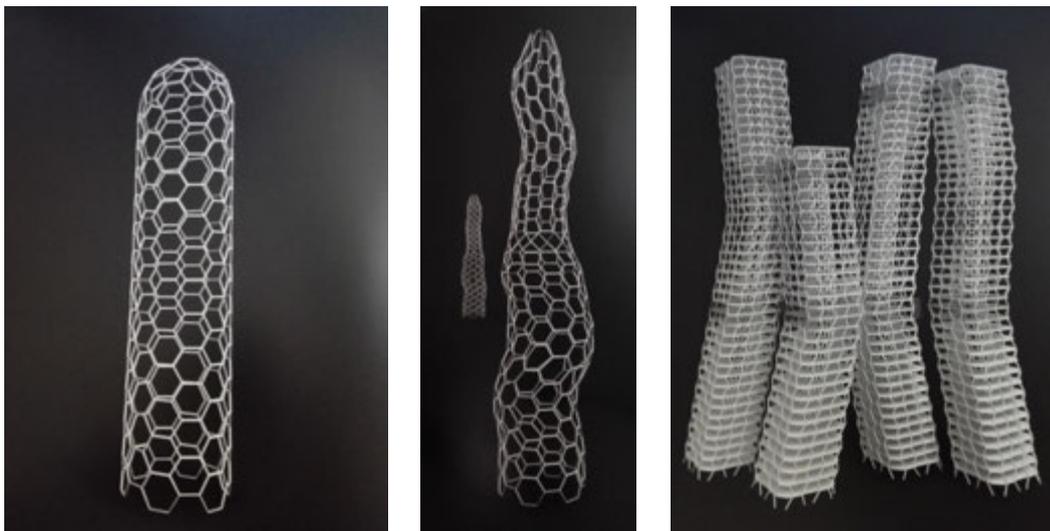


Ilustración 7: Modelos tridimensionales diseñados a partir de nanotubos de carbono (HTA Association, 2007)

El sistema de tubo de panel de abeja mostrado como un modo de diseñar y construir a todas las escalas se explica, desde su planteamiento hasta su posible aplicación, en 3 libros divulgativos de los que creemos que es necesario hacer una pequeña reseña debido a la importancia que tienen para esta investigación.

¹³ The Honeycomb Tube Architecture.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

1.4.2.1. Primer libro: Honeycomb Tube Architecture: The Spatial Potentialities of Hexagons (2007)

El primer libro es una suma de ensayos y transcripciones de coloquios que hacen un recorrido del uso de mallas hexagonales desde la antigüedad hasta nuestros días.

Después se presenta una suma de modelos virtuales y maquetas que aumentan en complejidad y muestran las diferentes formas que se han realizado con las mallas hexagonales en un intento de acercar el sistema cada vez más a la realidad.

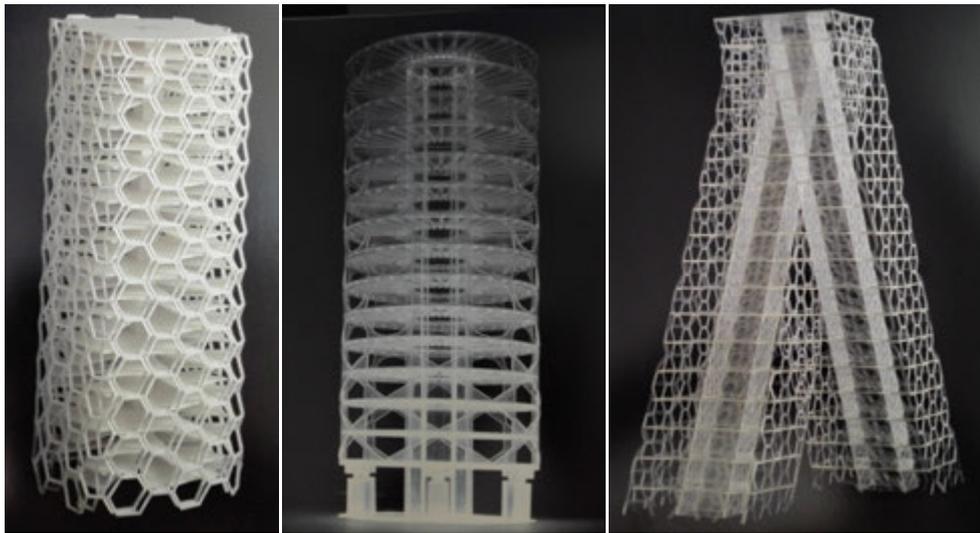


Ilustración 8: Maquetas conceptuales Hexagrid. (HTA Association, 2007)

En un apartado posterior se explora el comportamiento mecánico del sistema. Para eso se crea un conjunto de componentes de hormigón prefabricado y se estudia el comportamiento global de la estructura utilizando los modelos de cálculo informáticos, además, se estudia el comportamiento local fabricando componentes tipo a escala natural y trabajando sobre ellos en un laboratorio. Es necesario resaltar que en esta parte del libro se habla de las posibilidades de la malla para afrontar los esfuerzos producidos por terremotos con la inclusión de amortiguadores o sin ellos.

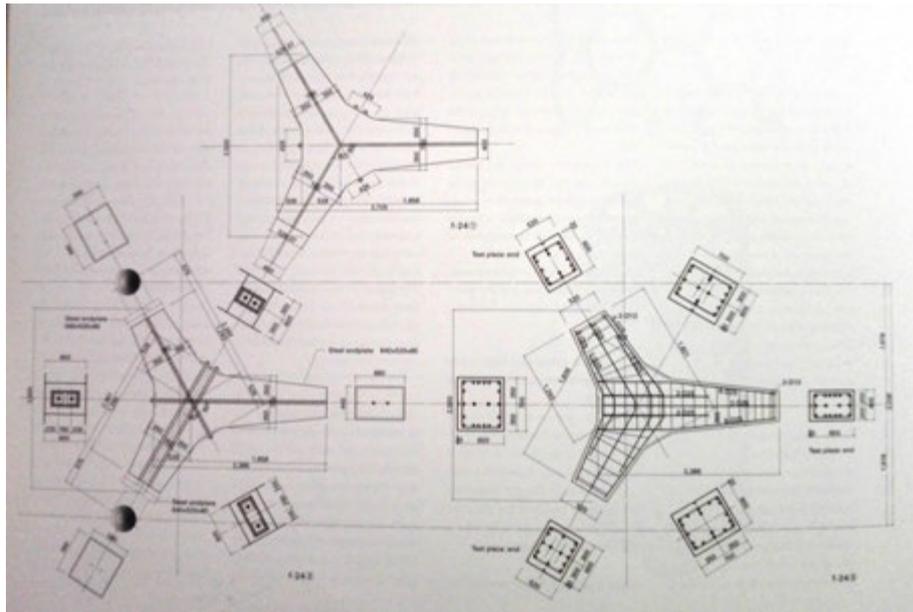


Ilustración 9: Detalle de componente de 3 brazos en concreto prefabricado. (HTA Association, 2007)

A partir del diseño de los componentes de hormigón prefabricado se exponen 2 casos de estudio en los que se va más allá del planteamiento estructural para llegar a presentar un anteproyecto total del edificio y sus posibles transformaciones a través del tiempo ajustándose al usuario tipo y la potencial capacidad del sistema para adaptarse.

1.4.2.2. Segundo libro: Honeycomb Dynamics Architecture (2008)

En este libro se lleva el concepto de panel de abeja hasta el límite de sus posibilidades, explorando sus límites formales en su posible aplicación desde la escala objeto hasta la escala ciudad. Aunque para esta investigación es el menos relevante, es importante describir su contenido para entender globalmente las intenciones del HTA con el sistema de panel de abeja.

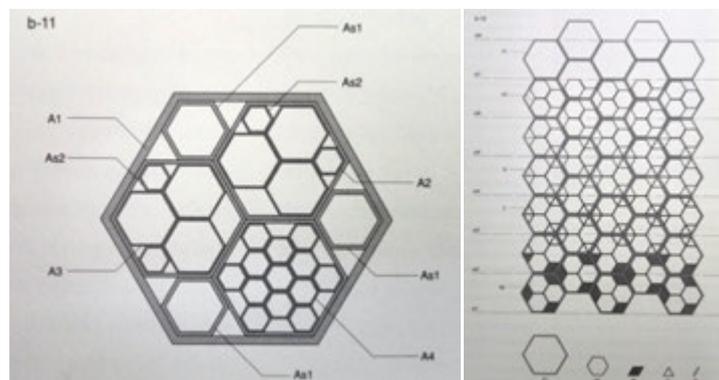


Ilustración 10: Posibilidades del módulo hexagonal y su uso dentro de una malla o entramado. (HTA Association, 2008)

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

En el primer capítulo, buscando la versatilidad y la capacidad de adaptación del sistema, se presenta lo que denominan en el libro un “*sistema de panel de abeja dinámico*”¹⁴, que aplica el concepto de geometría de fractales a la malla hexagonal. Esto permite reproducir su geometría ajustando su escala para variar la densidad y el tamaño de la trama de una forma más orgánica y natural siguiendo un patrón geométrico.

En el segundo se exploran las posibles relaciones del sistema de panel de abeja en la ciudad. Para esto se proponen 6 casos de estudio en los que se ha investigado cómo se puede utilizar el sistema para cambiar la ciudad teniendo en cuenta las condiciones urbanas que se dan en Japón.

Y en el tercero se propone el panel de abeja desde un punto de vista estructural a diferentes escalas de edificación. Se utiliza el sistema de fractales básico de auto reproducción de la forma, en este caso hexágonos, para lograr variados niveles de resistencia y ductilidad y así concebir estructuras mecánicamente racionales y bellas simulando la naturaleza (HTA Association, 2008, p. 038).

Para que la propuesta sea factible se diseñan 4 tipos de piezas que responden a 3 niveles de escala. Estas piezas pueden ser asociadas indistintamente para componer, según las características del edificio, la estructura adecuada.

1.4.2.3. Tercer libro: Honeycomb Tube Architecture Technology (2009)

Este libro trata más en profundidad los experimentos realizados en laboratorio en los diferentes tipos de estructuras de panel de abeja, los de hormigón prefabricado y los de acero. Hasta llegar a la última parte del libro, donde se habla sobre las posibilidades de hacer con el sistema de panel de abeja un conjunto de soluciones sostenibles y ecológicas.

El primer capítulo expone un caso de estudio de un edificio de 13 pisos de planta circular cuya estructura se ha planteado con piezas prefabricadas de hormigón prefabricado. Para poder obtener unos resultados fiables se considera que se puede utilizar una sección de 4 plantas a 1/3 del tamaño original construido con las mismas especificaciones que el modelo original. Como resultado de las pruebas realizadas se

¹⁴ “System of Honeycomb Dynamics” (HTA Association, 2008, p. 021).

obtienen suficientes datos como para considerar que la estructura tiene una gran capacidad antisísmica y que el desempeño de esta estructura no es inferior a una estructura de pórticos rígidos (HTA Association, 2009, p. 043).

En el segundo capítulo se introducen las pruebas de capacidad, resistencia al fuego y respuesta al sismo realizadas en sistemas de panel de abeja de acero. Para esto se plantea un edificio de 12 pisos de planta cuadrada con un núcleo central y 4 pilares en el núcleo. Se construyen 2 soluciones posibles, la primera con paneles regulares en área y sección¹⁵ y la otra con el sistema de fractales presentado en el segundo libro. Los modelos tienen una escala correspondiente al 1/4 del modelo original y corresponden a la sección comprendida entre los pisos 4° y 7°.

En el tercer y último capítulo se plantean 4 tipos de edificaciones pensadas para cumplir con unas bajas emisiones de carbono y se investigan sus potenciales comportamientos ambientales utilizando las herramientas CASBEE¹⁶ y LCCO₂¹⁷. De esta manera no solo se estudia el posible impacto de la edificación, sino el comportamiento ambiental del interior de las edificaciones, ya que se explica que en los países industrializados las personas pasan el 90% de sus vidas en el interior de los edificios (HTA Association, 2009, p. 145).

1.4.3. Otras publicaciones relativas a Hexagrid

Fuera de lo realizado por la HTA Association, se considera que la mayor contribución para el posible desarrollo y entendimiento de la malla Hexagrid se encuentra en el estudio hecho en la Eindhoven University of Technology. En dicha tesis, titulada *Lateral Stiffness of Hexagrid Structures* (de Meijer, 2012), se profundiza sobre las propiedades de las mallas hexagonales horizontales, que las conceptualiza como una bifurcación del sistema de Diagrid convencional y compara su eficiencia con otras mallas estructurales de uso común, concretamente las mallas Diagrid y trihexagonalgrid con la Hexagrid.

¹⁵ Llamada “earthquake resistant Honeycomb”.

¹⁶ CASBEE: Comprehensive Assesment System for Built Enviroment Efficiency (HTA Association, 2009, p. 145).

¹⁷ LCCO₂: Life-Cycle Carbon Dioxide (HTA Association, 2009, p. 109).

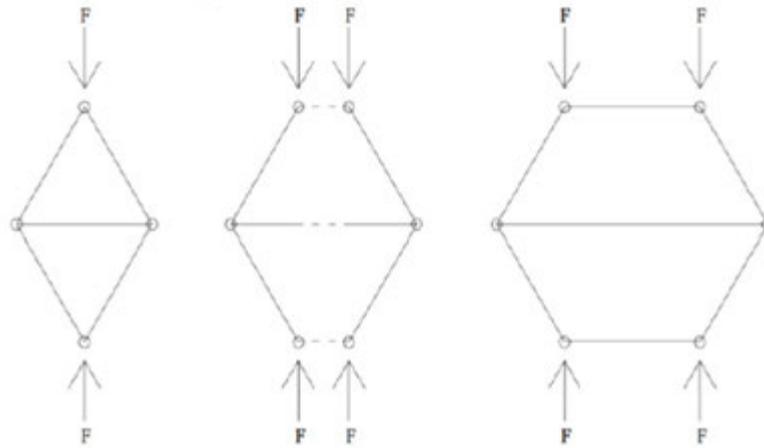


Ilustración 11: Transformación de una Diagrid a una Hexagrid (de Meijer, 2012, p. 77)

Aunque en sus conclusiones indica que es muy difícil comparar las 2 primeras mallas con la Hexagrid debido a que esta última funciona principalmente a flexión frente a la tracción-compresión de las otras mallas, lo que indica que al componer la malla con barras “esbeltas”, la rigidez de la malla Hexagrid será superior a la malla Diagrid, tendiendo a reducirse la diferencia cuando las secciones de las barras sean menos esbeltas (de Meijer, 2012, p. 76).

También indica, como recomendación, que es posible utilizar elementos horizontales, como los forjados como barras tensiles que rigidicen la estructura para reducir considerablemente los momentos producidos en los nudos, aunque sin eliminarlos por completo. Es decir, los nudos siempre tendrán que ser fijos, ya que el comportamiento estructural con nudos articulados sería el de un mecanismo (de Meijer, 2012, p. 77).

Siguiendo una línea similar de investigación en el cálculo de la estructura como si se tratara de un cantiléver, se continúa la investigación de las propiedades mecánicas del sistema Hexagrid comparándolas con el sistema Diagrid, del que ya se conoce su funcionamiento.

Es así como Giovanni María Montuori propone tanto en artículos (Montuori, et al., 2015) como en su tesis doctoral (Montuori, 2015, pp. 119-163) maneras de resolver adecuadamente el enfoque de homogenización en el criterio de diseño de rigidez de la estructura, teniendo en cuenta el arriostamiento que pueden otorgar los forjados.

Como conclusión remarca que, dentro de las mallas Hexagrid horizontales, la más eficiente es aquella en la que sus diagonales están a 60 grados, aunque el rango de funcionamiento de la malla esté entre los 50 y los 70 grados. También es importante señalar que indica que existe una mejora sustancial en el comportamiento de la malla cuando se tiene en cuenta la rigidez extra que otorgan los forjados, existiendo una disminución tanto en la deformación como en el uso de material.

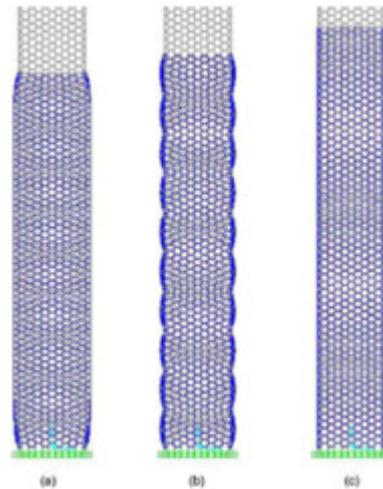


Ilustración 12: Comportamiento de la Hexagrid dependiendo del uso de los forjados como diafragmas rígidos (DR). (a) DR solo en la cubierta, (b) DR cada 9 pisos y (c) DR en cada piso (Montuori, 2015, p. 143)

La intención de poder conocer cómo cambia el comportamiento de la Hexagrid en función del ángulo de inclinación de sus barras diagonales y, además, tener un método fiable para poder precalcular a mano una edificación de gran altura, cuya estructura está basada en Hexagrid, para tener una herramienta fiable que permita elegir la estructura adecuada en el momento previo al diseño.

La necesidad de encontrar un método relativamente simple y seguro sigue siendo objeto de investigación, siempre dentro de las edificaciones de gran altura cuya fuerza dominante es el viento e intentando ir un paso más allá del volumen ortogonal (Lee & Kim, 2017) o enfocando su aplicación a mallas hexagonales verticales (Lee & Kim, 2017).

1.4.4. El sistema Hexagrid y el sismo

Tal y como se pudo leer anteriormente, desde que la HTA Association planteó las mallas Hexagrid, se han desarrollado ensayos en laboratorio y de forma virtual para

entender el comportamiento y la capacidad del sistema Hexagrid para soportar los esfuerzos dinámicos propios del sismo.

En todas las pruebas realizadas se ha podido constatar que la Hexagrid tiene un gran potencial para resistir cargas sísmicas, igualando e incluso, hablando de la Hexagrid vertical, superando al sistema Diagrid debido a su mayor ductilidad y sensibilidad a la rigidez, que es aproximadamente 3 veces mayor (Mashhadiali & Kheyroddin, 2013) sin tener en cuenta que, en igualdad de condiciones, la Hexagrid es menos vulnerable que la Diagrid para colapsar debido a su capacidad de redistribuir las fuerzas (Mashhadiali & Kheyroddin, 2014, p. 960).

El rendimiento sísmico del sistema Hexagrid vuelve a ponerse a prueba en Irán mediante un estudio estático y dinámico comparativo entre Diagrid, Hexagrid y entramados tubulares convencionales, con edificios de 30 y 50 pisos, donde se concluye que, para los modelos analizados, con el sistema Hexagrid se reduce el desplazamiento de la cubierta respecto al sistema Diagrid y al tubular convencional (Darbansari & NezamAbadi, 2017).

1.4.5. Otras investigaciones relacionadas con mallas hexagonales

A partir de la configuración hexagonal en una malla como sistema estructural tubular para edificaciones, se han hecho investigaciones que, de cierta manera, se relacionan con la Hexagrid regular, algunas veces dentro de un trabajo global que compara diferentes entramados de malla y otras como puntos de evolución que rompen la regularidad. A continuación se presentan algunas vías de investigación que se han encontrado mientras se realizaba la recopilación de datos para este documento.

El sistema denominado Beehive (Nejad & Kim, 2011) está basado en una malla mixta de hexágonos horizontales y diamantes intercalados unos con otros, eliminando los pilares exteriores y, en el caso presentado y analizado, eliminando la mayoría de pilares interiores, con una reducción del 10% al 15% del acero frente a una estructura convencional (Nejad & Kim, 2011, p. 499). Esta malla tiene ciertas propiedades de la Hexagrid convencional, como una mayor apertura en la fachada, pero conserva la propiedad esencial de la Diagrid, la de transmitir las cargas mediante esfuerzos de tracción/compresión puros.



Ilustración 13: Malla Beehive

La búsqueda de entramados que inviten a experimentar con el lenguaje visual y estético de la arquitectura y, también, elevar los niveles de eficiencia estructural son el motor de empuje de los investigadores que día a día proponen nuevos modelos para analizar y poder dar pequeños pasos en el campo de las estructuras tubulares.

Un claro ejemplo de esta búsqueda es la Pentagrid, que es un sistema basado en pentágonos irregulares invertidos tanto en vertical como en horizontal¹⁸, que visualmente podría explicarse como la superposición de una Hexagrid regular de módulo horizontal con una Diagrid. Al tener un mayor número de barras interactuando entre sí, se puede decir que este sistema soporta mejor la carga lateral que la Hexagrid, aunque el aumento y complejidad de sus nudos hace que su coste sea mayor y que se tenga que prestar una mayor atención a los detalles.

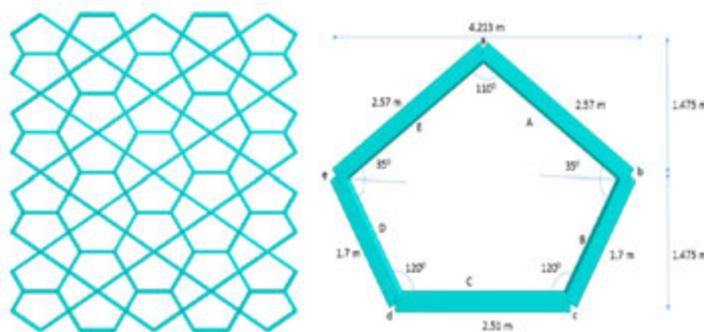


Ilustración 14: Pentagrid y módulo que la genera. (Taranath, et al., 2014, p. 11)

¹⁸ “The Pentagrid structural system is derived by smartly technically developed irregular pentagons – alternatively inverted both in horizontal as well as vertical directions. This structural system is developed by using multi angle concept by which all the elements share both gravity as lateral loads partially” (Taranath, et al., 2014, p. 11).

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

1.4.6. Aplicaciones de la Hexagrid

Actualmente existen muy pocas aplicaciones reales del sistema Hexagrid. Aunque hay algunos proyectos que utilizan una malla con módulos hexagonales:

1.4.6.1. Sinosteel International Plaza

Son un conjunto de edificios de uso múltiple planificados en Tianjin, China, cuya fachada estructural está compuesta por 5 tipos de módulos hexagonales para crear una imagen cambiante según la perspectiva (MAD Architects, 2018). La construcción se inició en el año 2006 y su finalización estaba prevista para el año 2018, pero, por ahora, sigue apareciendo en la página web de los autores como una propuesta.

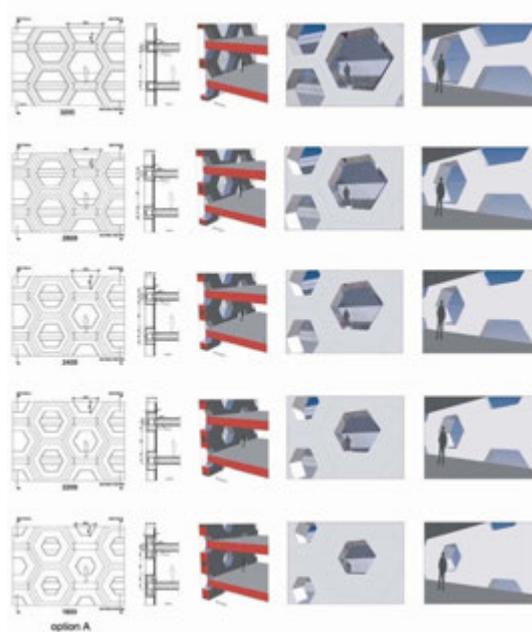


Ilustración 15: Sinosteel International Plaza, Vista estructura (MAD Architects, 2018)



Ilustración 16: Sinosteel International Plaza, composición de los paneles estructurales (izq.) y vista interior (MAD Architects, 2018)

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.



Ilustración 17: Sinosteel International Plaza, perspectiva exterior (MAD Architects, 2018)

1.5. Comparativa Diagrid vs. Hexagrid

Al entender la Diagrid y la Hexagrid como 2 entramados que cumplen las mismas funciones dentro de un sistema estructural tubular para edificaciones generalmente de gran altura, hacer un análisis comparativo entre los 2 tipos de malla es una forma natural de conocer el rendimiento de la Hexagrid tomando como base la Diagrid, que es el sistema más antiguo y cuyo comportamiento es de sobra conocido.

A pesar de que los 2 entramados son capaces de trasladar eficientemente hacia el suelo las fuerzas a las que una edificación puede estar sometida, y que las 2 son muy eficientes en el manejo de los esfuerzos producto de fuerzas dinámicas como el sismo y el viento, es importante remarcar que su funcionamiento es totalmente diferente debido a su geometría.

La Diagrid es una estructura que funciona teóricamente mediante esfuerzos de tracción-compresión puros, de tal forma que los nudos incluso podrían ser articulados sin que esto afectara al rendimiento de la malla. En cambio, la Hexagrid es un sistema que soporta los esfuerzos mediante la flexión de sus barras, de tal manera que la rigidez del sistema dependerá directamente de la rigidez de los nudos ya que, en caso de que estos fueran articulados, estaríamos hablando de un mecanismo que colapsaría.

Tras conocer estas características tan fundamentales que afectan al comportamiento global de las mallas, se puede considerar lo siguiente:

Tabla 1: Diferencias entre Diagrid y Hexagrid

| Diagrid | Hexagrid |
|--|---|
| Más rígido | Más dúctil |
| Deformación no dependiente de la rigidez de los forjados | Deformación dependiente de la rigidez de los forjados |
| Nudos articulados | Nudos fijos |
| Malla más densa (en igualdad de longitud de barras) | Malla más permeable (en igualdad de longitud de barras) |
| Mayor cantidad de nudos por m ² de malla | Menor cantidad de nudos por m ² de malla |
| Menor uso de acero | Mayor uso de acero |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

1.5.1. Mallas desplegadas sometidas a compresión: Diagrids y Hexagrids prefabricadas como estructuras resistentes a carga para edificaciones de mediana altura

En el año 2015, y como un trabajo de investigación previo, el autor plantea 4 tipos de mallas Hexagrid y 2 tipos de mallas Diagrid y se modelan como una estructura para un edificio de planta cuadrada de aproximadamente 10 m por lado y 6 plantas de altura. Se desarrollaron 36 modelos y los resultados se analizan en función de la deformación, el peso y el número de nudos de cada una de las mallas propuestas (Cantos Coronel, 2015).

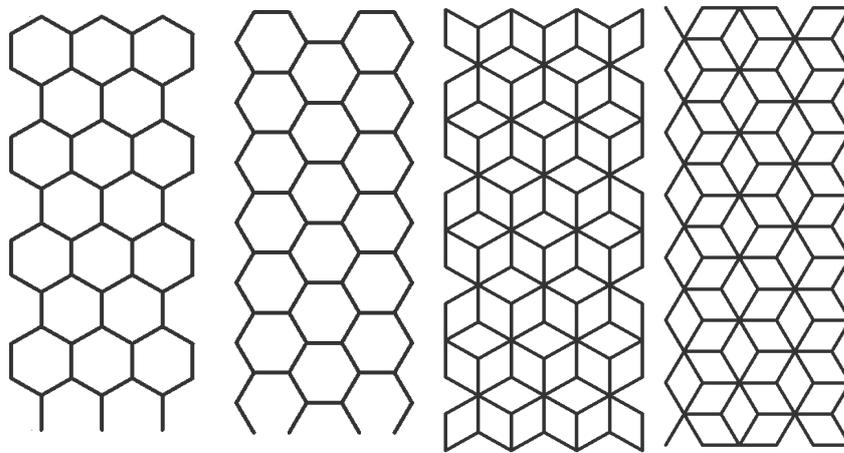


Ilustración 18: Tramas hexagonales propuestas de izquierda a derecha: Hexagrid vertical, Hexagrid horizontal, Hexagonal truncada vertical y Hexagonal truncada horizontal (Cantos Coronel, 2015, p. 39).

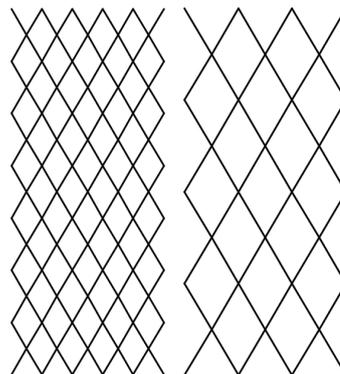


Ilustración 19: Diagrids propuestas comparten longitud de barra con Hexagrid (izq.) y comparten área con módulo Hexagrid (Cantos Coronel, 2015, p. 40)

En dicho trabajo se concluye que tanto las mallas Diagrid como Hexagrid, dentro de un sistema tubular, pueden ser utilizadas para el diseño de edificaciones de mediana altura de una forma eficiente y viable.

Que la diferencia de peso de la Diagrid se compensa con el peso extra que se necesita en la construcción de un mayor número de nudos, a la vez que tener un menor número de uniones simplifica el ensamblado de la estructura.

Que dentro de los sistemas Hexagrid y de base hexagonal propuestos, el que ha demostrado un mejor rendimiento en las condiciones analizadas es la Hexagrid horizontal.

Estas conclusiones se tuvieron en cuenta para la elaboración de esta tesis, tal como se podrá observar en los siguientes capítulos.

1.6. Conclusiones y discusión del capítulo

Todo desarrollo formal en la arquitectura va ligado a un desarrollo tecnológico que lo sustenta. Sin los avances hechos en la industria metalúrgica acompañados del desarrollo de los métodos de cálculo gráficos y, luego, analíticos, hubiera sido imposible conquistar las alturas por parte de los diseñadores. Esta relación se hace visible la estética de los grandes rascacielos de la segunda mitad del siglo XX, donde es más que notable el aporte realizado al plano formal por el desarrollo de estructuras tubulares con diagonales y su evolución hacia el uso de la Diagrid.

El enfoque que se les da a los nuevos estudios relacionados con Diagrid, tomando líneas más orgánicas y curvas con una modulación cada vez más irregular, ha logrado desarrollar un lenguaje mucho más plástico para la concepción de edificaciones. Sin embargo, este enfoque, que por un lado permite optimizar la estructura para edificaciones singulares, se aleja completamente de sistemas estandarizados que puedan ser producidos y reproducidos en masa.

La concepción de la malla Hexagrid puede ser interpretada como una deformación organizada de la Diagrid, tal y como lo plantea de Meijer, o como un entramado modular con sus propias leyes y propiedades que toma como referencia la organización de los átomos de carbono, tal y como lo plantea la HTA Association.

Para los intereses de este trabajo, lo que llama la atención es la capacidad de crear con la Hexagrid una trama regular y modulable, que desde el punto de vista constructivo permitiría crear un conjunto de piezas estandarizadas que podrían adaptarse a situaciones variables.

También es importante resaltar las propiedades que tiene la malla hexagonal de módulo regular, expresadas a través de la conjetura del panel de abeja, que en una superficie estructural implica ahorro de barras y uniones.

El enfoque que la HTA Association utiliza para el análisis de la malla Hexagrid, con modelos virtuales y maquetas reales a escala, y sus respectivos resultados garantizan que pueden darse pasos en firme y seguros dentro de este sistema.

En los ensayos hechos tanto por de Meijer como por Montuori se constata que la malla Hexagrid muestra un comportamiento estructural competitivo frente a la malla Diagrid, siempre y cuando se tenga en cuenta la rigidez que le pueden otorgar los forjados a la malla.

En cuanto al sismo, se ha comprobado la capacidad resistente del sistema Hexagrid, siendo su ductilidad y la facilidad para modular su rigidez sus 2 puntos fuertes.

Es una lástima que los proyectos basados en Hexagrid, tanto por la HTA Association y MAD Architects, no se hayan llevado a cabo. En todo caso, se considera que este sistema tiene posibilidades de ser viable en un futuro cercano.

Capítulo 2. Uniones articuladas: Estabilización de los nudos en su posición de uso

2.1. Una idea, diseñar estructuras modulares que se puedan plegar

El uso de barras de acero en la construcción de elementos estructurales ha permitido crear superficies o volúmenes modulados y modulares que organizan, distribuyen y protegen grandes espacios utilizando relativamente poco material, cumpliendo los parámetros de seguridad estructural y siendo una excelente base para la implementación de los diferentes sistemas que, trabajando conjuntamente, determinan una edificación.

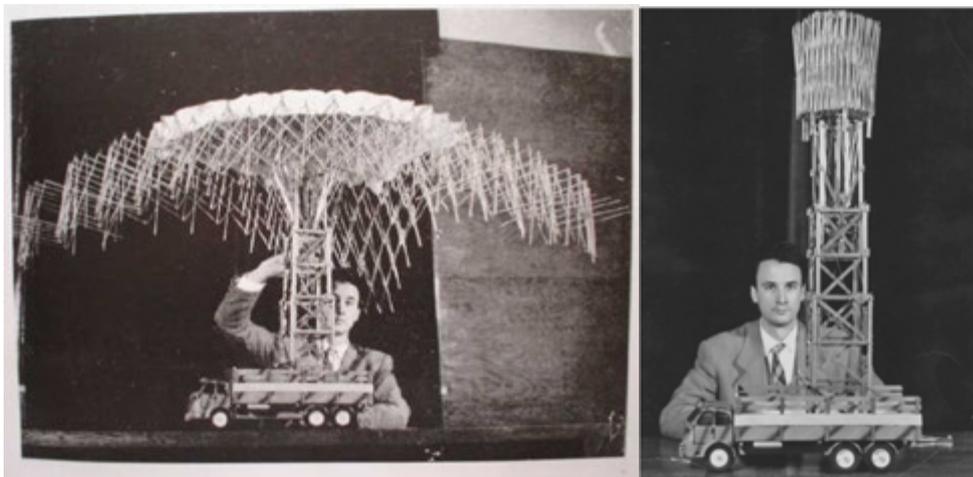


Ilustración 20: Emilio Pérez Piñero mostrando una maqueta de su estructura reticular estérea plegable en 1961 (Escrig, 1993)

La idea de aprovechar el poco peso de este tipo de estructuras que comprimen su volumen y, por ende, su espacio de almacenamiento no es algo nuevo. De hecho, algunas culturas, ya en la antigüedad, se percataron de las ventajas de tener elementos preconstruidos que se puedan ensamblar con cierta facilidad. Además de la posibilidad de reparar partes del sistema sin afectar al resto de los elementos.

La base de los sistemas plegables y lo que permite su aplicación han sido el correcto diseño de uniones que, mediante distintos tipos de articulaciones, permiten el movimiento de las barras desde su posición de uso hasta su posición de transporte.

Como veremos en este capítulo, durante años se han ido realizando aportaciones a través de estudios que han profundizado en el proceso de diseño y construcción de nudos articulados. Estos sistemas se han afinado para que puedan responder a las diferentes condiciones y escalas en las que ha sido posible implementar estructuras que cubren un

gran volumen pero que se pueden comprimir y transportar con un volumen relativamente reducido.

2.2. Nudos

En la concepción de un entramado, una vez se ha encontrado su forma y su modulación, es necesario enfrentarse a la resolución de los nudos, que no es más que el punto donde las barras se conectan entre sí para redireccionar las tensiones de la estructura hasta sus apoyos. En los apoyos puede haber diseños específicos de nudos que anclen la estructura al suelo.

Los nudos deben tener la capacidad de soportar los esfuerzos que reciben y, en caso de las estructuras desplegadas, deben hacer posible el movimiento durante el proceso de despliegado. Aunque, para posibilitar el movimiento de las barras, los nudos deben tener algún tipo de articulación.

Los nudos se pueden clasificar en función del movimiento relativo que permiten entre las barras que se encuentran entre sí, siendo las uniones fijas las que no permiten movimiento alguno y las articuladas las que permiten uno o más grados de movimiento, ya sea por el efecto de la rotación o el deslizamiento o de sus posibles combinaciones.

Al número de movimientos independientes que es capaz de realizar la articulación se le denomina grados de libertad (Calatrava, 1993) y se expresa con la letra f .

2.2.1. Tipos de nudos articulados

Siguiendo la línea de estudio propuesta por Calatrava, existen 4 tipos de articulaciones posibles:

- Articulaciones de rotación ($f = 1$): son las que permiten la rotación alrededor de un eje.
- Articulaciones deslizantes ($f = 1$): permiten el desplazamiento en una dirección.
- Articulación de rotación y deslizamiento ($f = 2$).
- Articulaciones esféricas o de rotación triple ($f = 3$).

En adición a estas 4 articulaciones, existe también la articulación de tornillo que, a través de la rotación de la articulación, permite el deslizamiento en el espacio, por lo que tiene 1 grado de libertad.

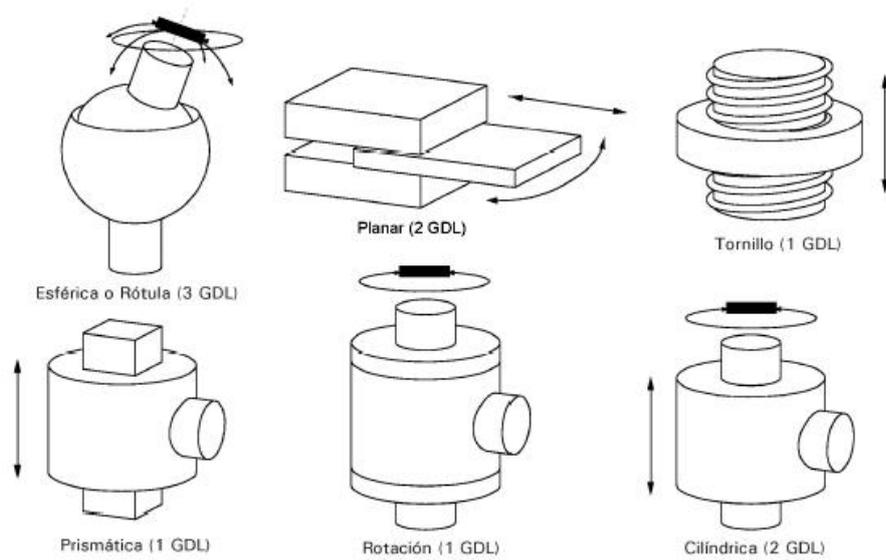


Ilustración 21: Tipos de nudos articulados posibles (Gil Llorca, 2019)

También existen articulaciones donde se encuentran más de 2 barras. A estas articulaciones se las denomina articulaciones con valencia simple, doble o triple según el número de barras que se unen, siendo su valencia igual a $n-1$ para un n número de barras que se encuentran (Calatrava, 1993).

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

2.3. Control de movimiento y fijación de posición en mallas

La plegabilidad de un entramado lleva intrínsecamente cierto nivel de inestabilidad en la malla, de tal forma que se podría hablar de un mecanismo con cierto grado de libertad que emite el movimiento controlado de sus partes.

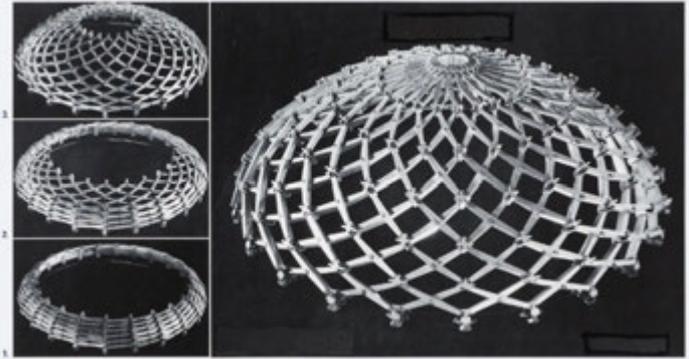


Ilustración 22: Iris Dome modelo de trabajo a escala: un entramado auto estable (Hoberman, 1993)

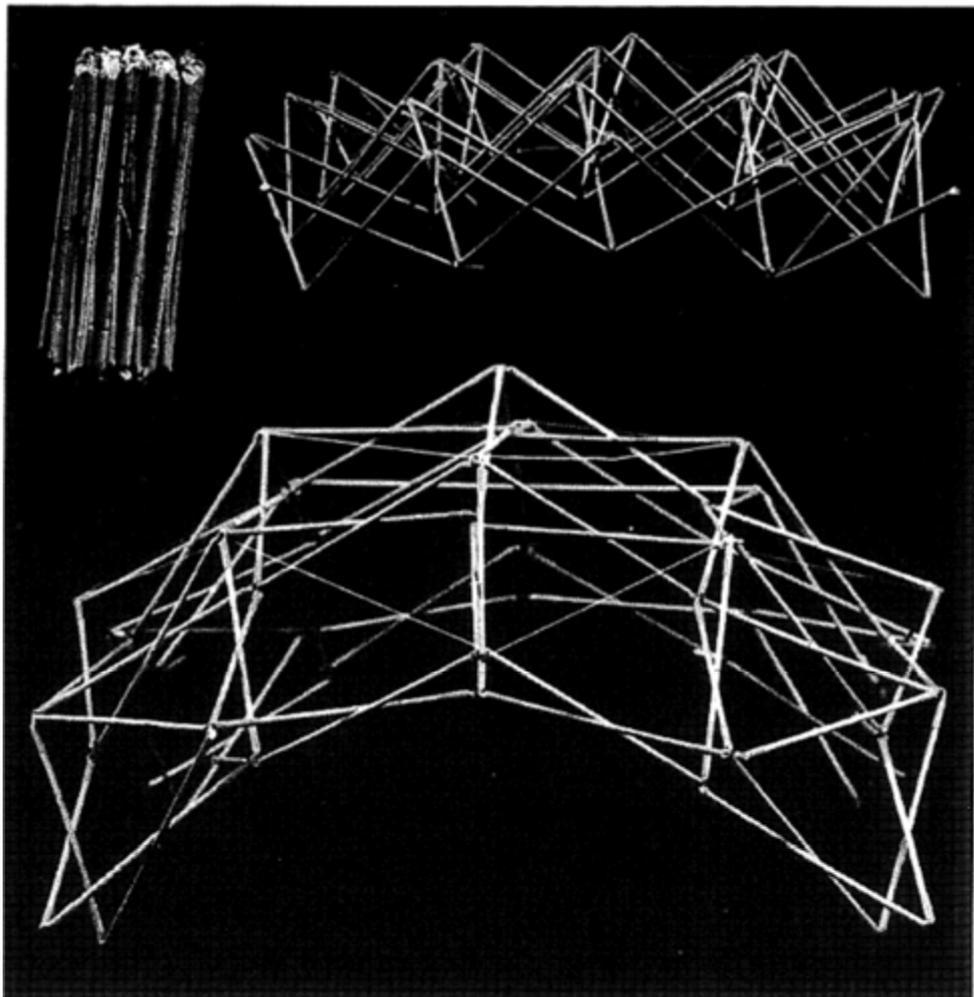


Ilustración 23: Malla cuadrangular desplegable, un sistema aparentemente auto estable pero que necesita la adición de una barra para encontrarla (Escrig, et al., 1996)

La mayoría de entramados requieren la adición de unos elementos, en forma de cables o barras, para estabilizar su forma y su comportamiento como estructura. Aunque también existen ciertos tipos de entramados que tienen la capacidad de autoestabilizarse en su posición de uso normalmente a costa de someter a sus elementos a grandes esfuerzos durante el proceso de desplegado (Franco, 2010), incluso hasta provocar una deformación en la estructura.

Cuando es manifiesta la imposibilidad de agregar nuevos elementos al entramado, se puede intentar estabilizarlo transformando el nudo articulado en un nudo fijo. Para lograr este cometido se suelen necesitar diseños complejos que se adapten a la escala, a las posibilidades constructivas y a los esfuerzos que la estructura deba soportar.

2.4. Algunos ejemplos de diseño de nudos

Se han buscado ejemplos de nudos articulados con capacidad para ser estables en su posición de uso. Los ejemplos mencionados han sido diseñados para funcionar a diferentes escalas, que van desde trípodes para cámaras fotográficas hasta construcciones de estructuras ligeras. Se encausa la búsqueda de diseño en patentes, ya que en estos diseños hay un enfoque hacia la solución específica de la pieza independientemente de las propiedades del sistema.

2.4.1. Patente I: Medios de bloqueo para trípodes¹⁹

Esta patente ofreció en 1917 un sistema sencillo y económico para ajustar/liberar un trípode en su posición de uso. El sistema, compuesto de 17 piezas, tiene 3 brazos, y cada uno de ellos abraza a una pata del trípode. En el encuentro de los extremos de estos brazos se forma un pivote en el que hay un tornillo provisto de una cabeza agrandada que bloquea las 3 articulaciones, de tal forma que anula el movimiento del sistema gracias al diseño de los bordes de las barras.

Este concepto de una pieza central que controla el movimiento de las barras y está encajado en otro elemento que se encarga de articularlas se irá desarrollando y modificando para adaptarlo a nuevos usos, sobre todo en el diseño de estructuras ligeras colapsables.

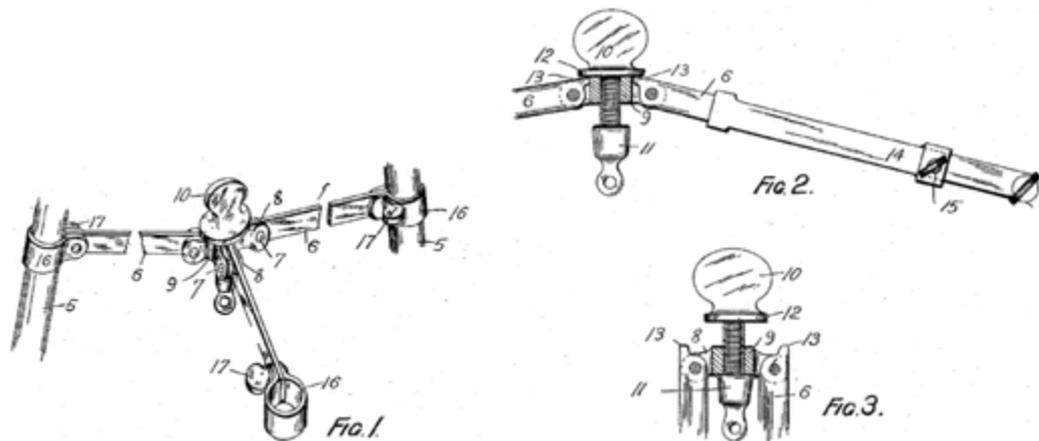


Ilustración 24: Figuras 1, 2 y 3 que ilustran el diseño del tornillo central que bloquea el pivote que a su vez bloquea todo el sistema (TORR., 1917)

¹⁹ Locking Means for tripods (TORR., 1917).

2.4.2. Patente II: Ensamble de tubos para estructuras colapsables²⁰

Este diseño, pensado para estructuras ligeras autoestables, plantea una solución para articular alrededor de un pasador único un conjunto de barras a través de sus extremos, que tienen unos conectores en forma de pletina con un agujero por donde se introduce el pasador.

Para controlar el movimiento de cada una de las barras, de tal manera que solo giren alrededor del pasador sin desplazarse por el mismo, se utilizan 2 elementos con forma de rosquilla que se conectan entre sí por un cilindro y un tornillo. Estos elementos simétricos actúan a través de un canal con forma de anillo, que es donde descansa y se asegura el pasador y un conjunto de ranuras transversales en las que se encajan las platinas de los extremos de las barras que están sujetas al pasador. El sistema se asegura mediante un cilindro de resina que, a su vez, contiene un tornillo que ejerce presión y expande la resina contra las paredes metálicas de los elementos simétricos.

Conceptualmente se podría decir que este nudo está compuesto por un elemento interior que se encarga de articular las barras y 2 elementos exteriores simétricos que controlan el movimiento de las barras.

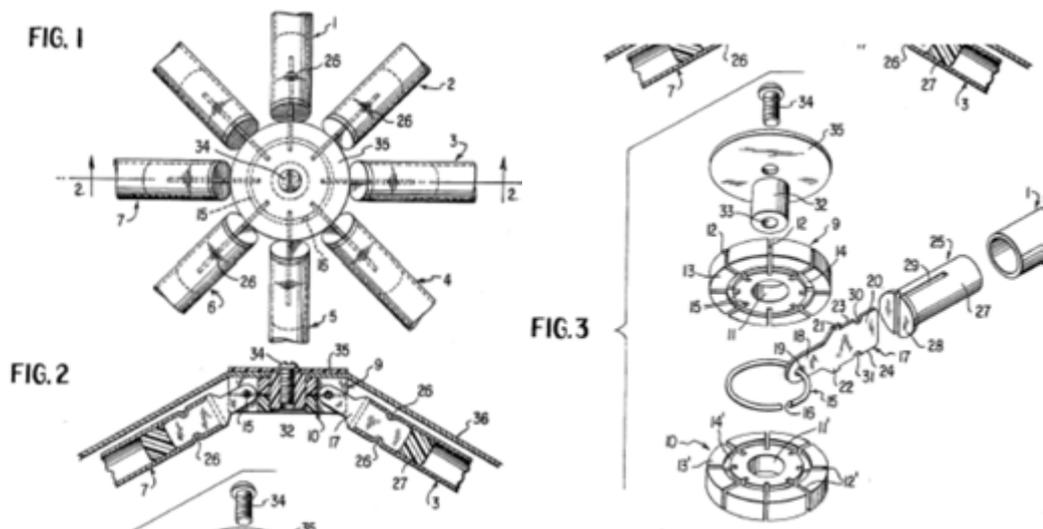


Ilustración 25: Figuras 1, 2 y 3 describiendo el diseño del nudo (Zeigler, 1981)

²⁰ Hub Assembly for Collapsible Structures (Zeigler, 1981).

2.4.3. Patente III: Ensamble de nudos para estructura colapsable²¹

Este diseño de nudo está compuesto por 2 piezas circulares del mismo diámetro, una hembra y un macho. El diseño está planteado para que no sea necesario tener una tercera pieza que haga de pasador gracias al diseño de los extremos de las barras que, a través de rótulas esféricas encajadas entre las piezas que conforman el nudo, quedan insertadas, permitiendo un grado de libertad de movimiento.

La pieza denominada hembra es un elemento en forma de rosquilla (torus) que tiene perforaciones esféricas, que es donde se insertan cada una de las cabezas de las barras y adjunto tiene perforaciones verticales que restringen el movimiento lateral de las barras permitiendo solo su movimiento perpendicular respecto al nudo. En el anillo interior hay unas pequeñas perforaciones verticales adaptadas al diseño de la pieza macho para lograr la sujeción de las piezas.

La pieza macho del diseño actúa como una tapa que, por un lado, confina los extremos esféricos de las barras dentro del nudo y, por el otro, limita la longitud del movimiento vertical de las barras. La unión de esta pieza se realiza mediante un apéndice en forma de bayoneta que se introduce a presión en el anillo interior de la pieza hembra. La sujeción, entonces, se consigue mediante unos salientes opuestos entre sí en el cuerpo de la bayoneta.

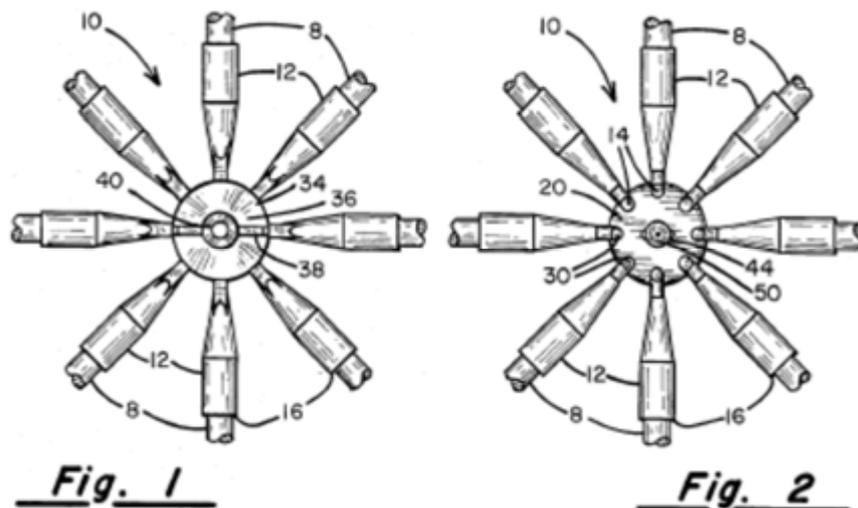


Ilustración 26: Vista superior (fig. 1) y vista inferior del diseño (Beaulieu, 1986)

²¹ Hub Assembly for Collapsible Structure (Beaulieu, 1986).

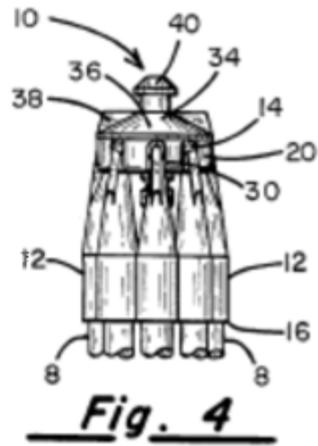
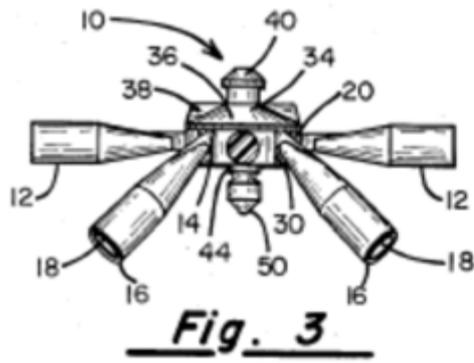


Ilustración 27: Vistas laterales en posición abierta (fig. 3) y cerrada. (Beaulieu, 1986)

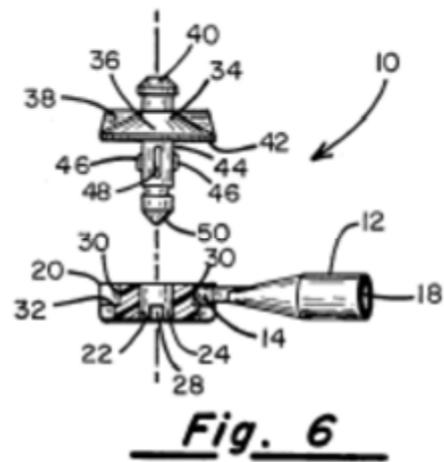
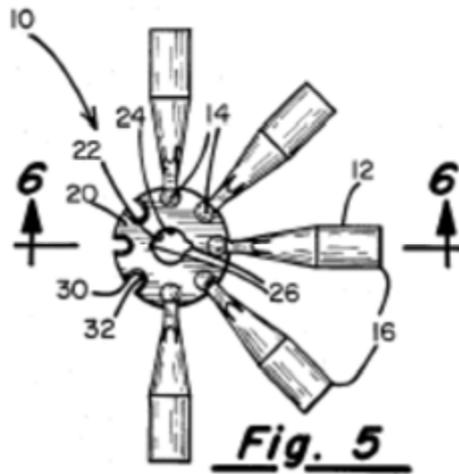


Ilustración 28: Ensamble del nudo, vista superior (fig. 5) y corte. (Beaulieu, 1986)

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

2.4.4. Patente IV: Ensamble de tubos para estructuras colapsables²²

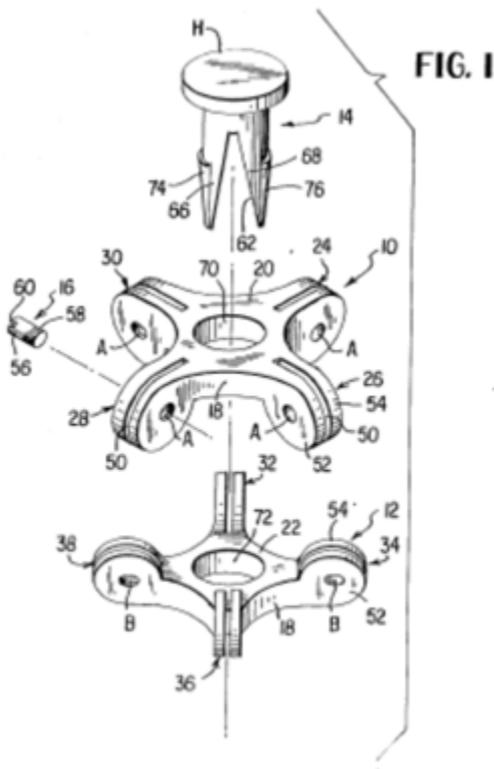


Ilustración 29: Componentes del nudo (Zeigler, 1989)

Este diseño consta de 2 piezas iguales en forma de cruz que se ensamblan enfrentadas entre sí y se sujetan a presión mediante un conector similar a un roblón, pero que trabaja en frío gracias a su geometría.

Lo que llama la atención de este modelo es la forma geométrica circular de los terminales del nudo, que forman las posibles articulaciones con cada una de las barras que recibe. Este detalle de diseño permite que el pasador pueda estar a una menor distancia del borde de la platina de la

barra sin perder su capacidad de giro.

En base a este nudo se desarrolló un diseño exploratorio propio (Cantos, 2015) que planteaba un nudo con solo 3 articulaciones, que son las necesarias para lograr la malla hexagonal.

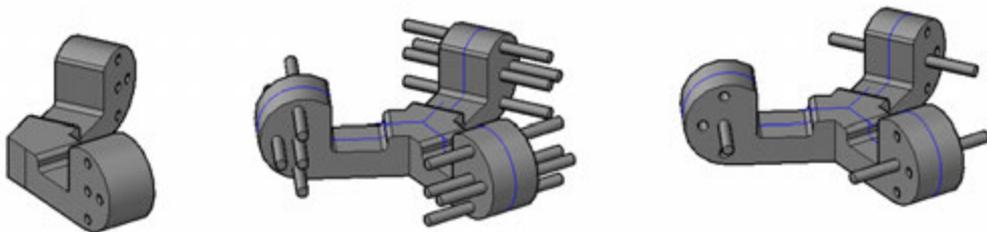


Ilustración 30: Primer diseño de nudo (Cantos, 2015, p. 60)

²² Hub Assembly for Collapsible Structures (Zeigler, 1989)

2.4.5. Patente V: Ensamble de tubos para estructuras colapsables²³

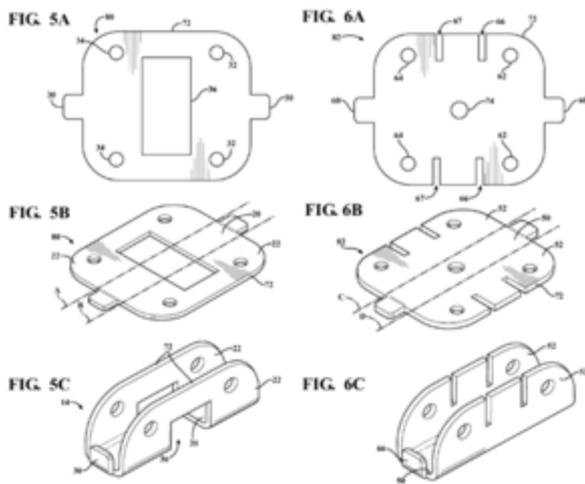


Ilustración 31: Figuras 5A, 6A, 5B, 6B, 5C, 6C; muestran el proceso de doblado de las láminas que se transforman en el nudo. (Kubica & Crandell, 2015).

Este es un diseño que resuelve la articulación con 2 platinas planas perforadas que se doblan creando 2 perfiles tipo “U”. Después estas 2 platinas encajan entre ellas a través de las ranuras y perforaciones que tienen en medio formando una cruz. Para asegurar la estabilidad del nudo se utiliza un único tornillo que ajusta las piezas.

Para crear la articulación se utilizan unas perforaciones circulares que hay en los extremos de cada cruz, y a través de un pasador el nudo abraza la barra que pivota en el pasador para poder girar respecto al nudo.

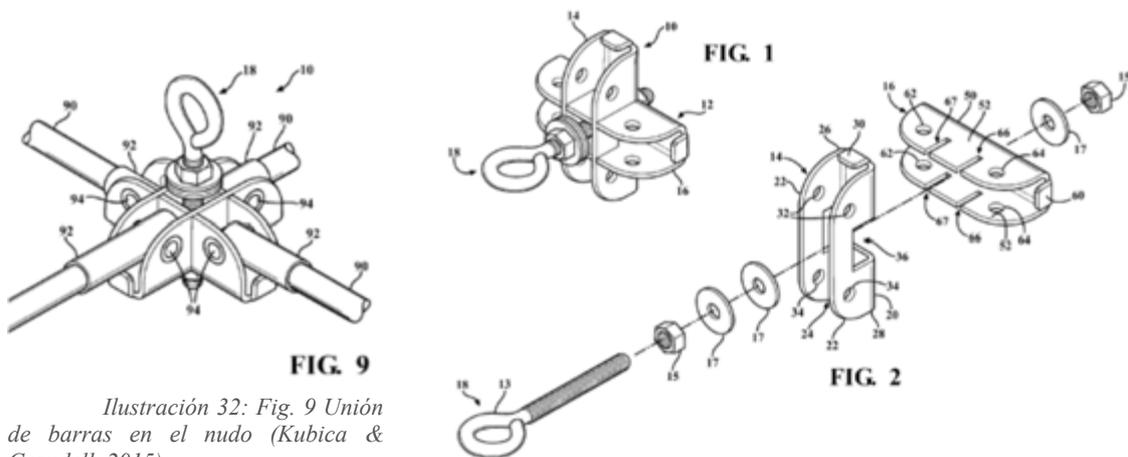


Ilustración 32: Fig. 9 Unión de barras en el nudo (Kubica & Crandell, 2015)

Ilustración 33: Fig. 1 Nudo completo. Fig. 2 Proceso de ensamblado (Kubica & Crandell, 2015)

La idea de poder construir el nudo a partir de láminas y no de bloques de acero puede ser útil para el desarrollo de un nudo ligero en una escala mayor.

²³ Hub Assembly for Collapsible Structures (Kubica & Crandell, 2015).

2.4.6. Patente VI: Sistema de tienda que usa un nudo tipo araña asociado a una estructura de marco y método para compactar el marco y reducir el tamaño de almacenamiento²⁴

En esta patente se tiene en cuenta todo el proceso industrial que se necesita para llevar al mercado un producto. Por lo que el diseño intenta aligerar, abaratar y reducir el empaquetado de una tienda de campaña pensando en el transporte, el almacenaje y, al mismo tiempo, en mantener un ensamblaje sencillo y rápido.

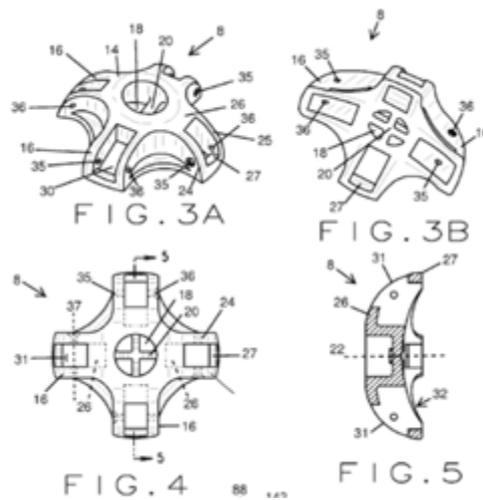


Ilustración 34: Nudo tipo araña de 4 barras (Samuel, 2018).

Aunque en el documento se explica todo el sistema, es relevante para esta investigación el diseño del nudo superior de la tienda. Lo que diferencia a este sistema es el uso que se hace de la propia barra para que el extremo de la misma limite su movimiento, tanto en el momento de plegado, al quedar en posición vertical, como en el momento del desplegado y de su posición de uso.

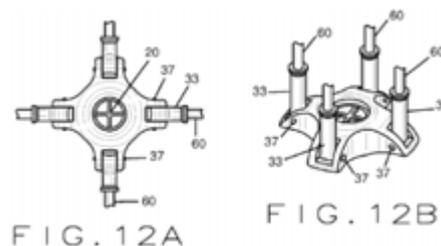


Ilustración 35: Nudo tipo araña de 4 barras desplegado (izq.) y plegado (Samuel, 2018)

²⁴ Tent System Employing an Improved Spider Hub and Associated Frame Structure and Method of Compacting the Frame for Reduced Storage Size (Samuel, 2018).

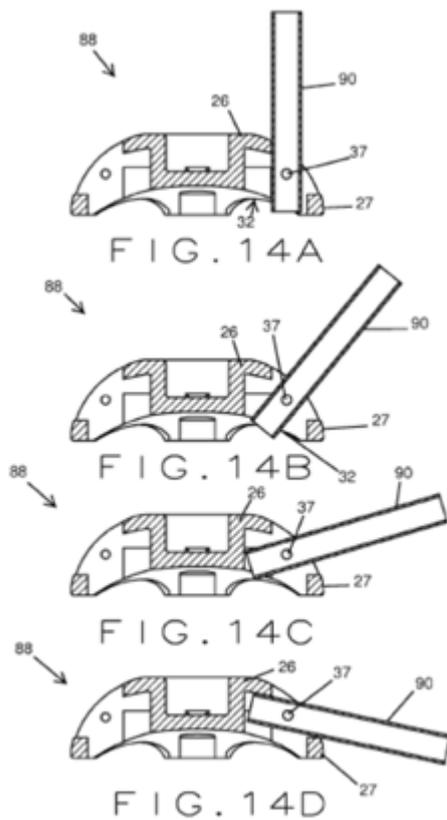


Ilustración 36: Proceso de giro de la barra dentro del nudo (Samuel, 2018)

2.4.7. Patente VII: Nudo autobloqueable para estructuras desplegadas²⁵

Este diseño tiene la particularidad de que asume que la estructura a la que pertenece no es estable por sí misma y que necesita que se bloqueen las articulaciones en el nudo para alcanzar su estabilidad. También asume que en una estructura no todas las barras llegan a su punto de despliegue de uso al mismo tiempo, y que un sistema que permita bloquear cada barra independientemente puede llegar a ser útil en el momento del despliegue del entramado.

El diseño resalta por la simetría de las piezas que conforman el nudo propiamente dicho. Son 4 perfiles tipo L con 4 agujeros lineales equidistantes entre sí y 2 chapas que se intersecan entre ellas en forma de cruz, con 2 agujeros en cada una de sus alas que equivalen a los agujeros centrales de los perfiles tipo L.

²⁵ (Pérez Valcárcel, et al., 2018).

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

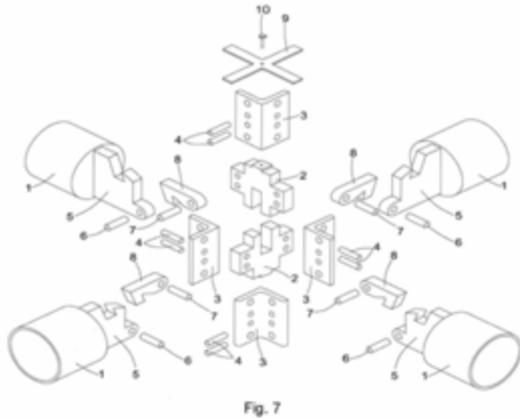


Ilustración 37: Despiece del nudo propuesto (Pérez Valcárcel, et al., 2018)

Al ensamblar los componentes se muestra la otra peculiaridad de este diseño, que la articulación de la barra está descentrada y se ubica en el pasador del extremo inferior de los perfiles, y dicha articulación también está descentrada respecto al núcleo de la barra. Esto se hace para que la barra articule en un extremo mientras en el otro funciona el sistema de autobloqueo. Lo que hace que la barra se fije

por los extremos, algo muy útil cuando se trabaja en una escala mayor con esfuerzos a momento considerables.

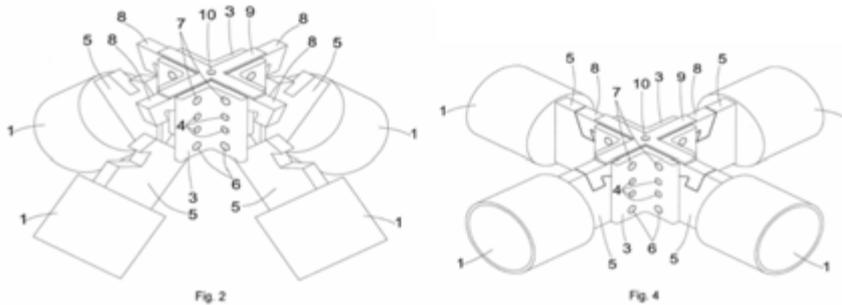


Ilustración 38: Axonometrías del nudo con las barras en proceso de despliegue (izq.) y desplegadas. (Pérez Valcárcel, et al., 2018)

2.4.8. Enlaces sobre restringidos tipo Bricard

Dentro de los enlaces articulados existe un tipo de enlace especial que se denomina enlace sobre restringidos²⁶ con un grado de libertad de movimiento. El término de sobre restringidos se refiere al hecho de que tienen más grados de libertad que los que el análisis predice (Bouten, 2015).

Aunque no se trata del diseño de un nudo en sí, esta propuesta para módulos hexagonales, cuyas barras y ángulos son iguales, plantea que ciertas hibridaciones de los enlaces tipo Bricard pueden hacer que las barras lleguen a condiciones de plegado mínimas y máximas como, por ejemplo, estos enlaces desarrollados por Gan y Pellegrino

²⁶ Overconstrained linkages

(2003), que permiten pasar de un estado de desplegado completamente plano a un estado de plegado máximo.

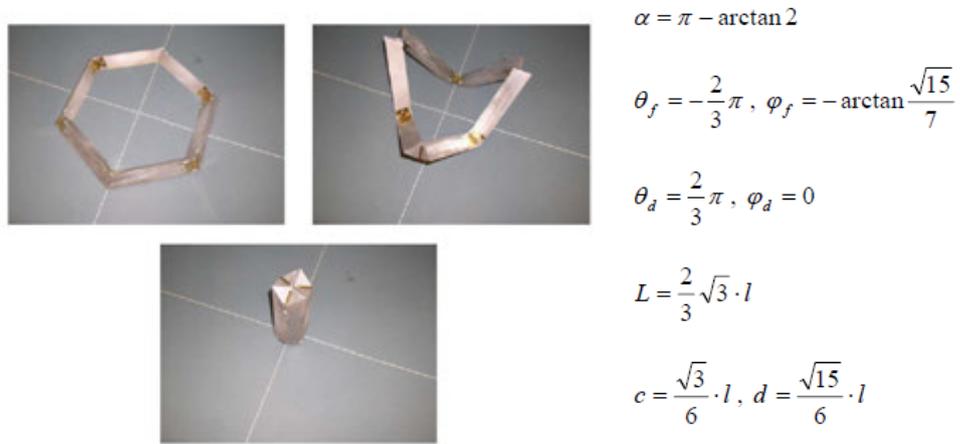


Ilustración 39: Enlaces I tipo Bricard híbridos y sus parámetros geométricos (Chen, 2003)

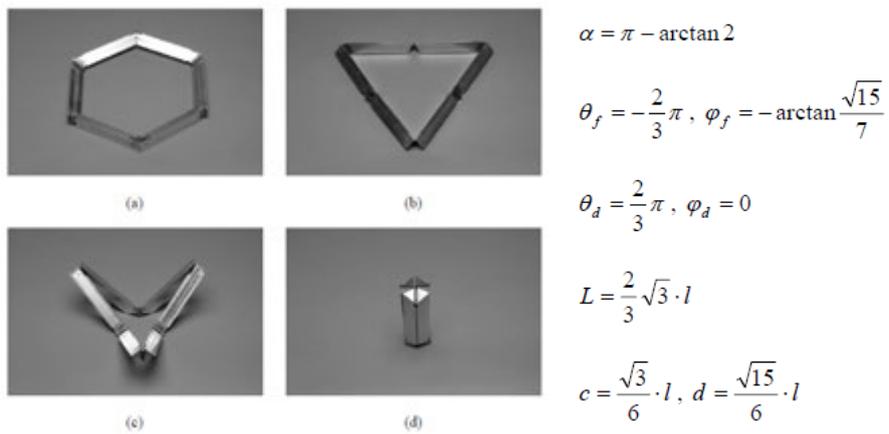


Ilustración 40: Enlaces II tipo Bricard híbridos y sus parámetros geométricos (Chen, 2003)

2.5. Conclusiones y discusión del capítulo

La mayoría de soluciones que aquí se presentan pertenecen al entorno de las estructuras ligeras colapsables que, aunque tienen una historia corta porque nacieron en el siglo XX, desde sus inicios se han presentado como fácilmente transportables y de fácil montaje por su plegabilidad.

El correcto equilibrio entre la resistencia de las piezas y la simpleza del mecanismo lleva a buscar un diseño que evite el uso superfluo de material.

De todos los tipos de nudos articulados posibles, se considera que el que tiene más probabilidades de ser utilizado en un posible diseño es el nudo de rotación con un grado de libertad. Por este motivo todos los ejemplos presentados están basados en este tipo de nudo.

Durante la investigación se detectó que la búsqueda de diseños de nudos en registros de patentes era de gran utilidad ya que, independientemente del objeto al que estén destinados, las soluciones se muestran de una forma clara y concisa que resulta fácil de analizar y tomar como referencia para futuros diseños propuestos por el autor de esta investigación.

En general, los ejemplos presentados (patentes de I a VII) intentan encontrar una respuesta al problema de resolver un nudo al que llegan 3 o más barras que tienen la capacidad de rotar independientemente entre sí (patentes II a VII). Esto muestra cómo se pueden crear múltiples soluciones para el mismo problema principal, pero cada solución se ajusta y optimiza para el conjunto de condicionantes propios del sistema al que pertenece el nudo.

En la patente VII se agrega un sistema que funciona mediante un mecanismo sencillo de muelle que permite que cada barra gire independientemente pero, al mismo tiempo, se auto bloqueen en su punto de mayor extensión. Para que este sistema sea posible se mueve el punto de pivote al extremo inferior o superior, ya que el nudo es simétrico, para hacerle espacio en el extremo opuesto a otro pivote, lugar en el que se inserta el sistema de autobloqueo.

Los enlaces sobre restringidos tipo Bricard se presentan *a priori* como un concepto que tiene mucho potencial para desarrollarse, pero lamentablemente, tras un estudio más profundo, se hace notorio que el sistema solo funciona en unas condiciones muy específicas de forma del perfil y que las articulaciones se intercalan en el interior y exterior del módulo hexagonal. Así que se ve inviable, al menos de momento, su uso en el plegado de mallas estructurales.

En el momento de proponer un diseño propio se debe tener en cuenta la diferencia de escala, tanto de dimensiones físicas como de esfuerzos que debe soportar la estructura, para crear un modelo que se ajuste a las condiciones de uso. Los ejemplos que se han tocado en este capítulo se han utilizado como referentes para explicar la posible mecánica de la rotación de la articulación, pero nunca podrán utilizarse o imitarse modificando solo el tamaño de sus componentes.

Capítulo 3. **Creando un modelo** con estructura Hexagrid

3.1. Introducción. ¿Cuáles deben ser las características de una edificación con estructura Hexagrid?

Teniendo el Hexagrid como el sistema estructural que se quiere explorar, es necesario buscar una configuración de edificio adecuada que permita cumplir con los objetivos de esta investigación.

Se define la forma volumétrica del edificio y su tipología estructural. Aunque se sabe que la malla Hexagrid ofrece una gran versatilidad para lograr formas y volúmenes no convencionales, para entender el sistema lo mejor es plantear un modelo lo más sencillo posible. Se prefiere que el modelo sea ortogonal, específicamente de base cuadrada, cuyas caras se eleven verticalmente y cuya altura esté relacionada con el número de pisos.

La tipología estructural elegida sigue el patrón propio de la estructura Hexagrid, que es un sistema tubular perimetral al que se le adiciona un núcleo central que responda a la geometría de la Hexagrid.²⁷

Como se pudo apreciar a través de los ensayos de Montuori²⁸ y de Meijer²⁹, la rigidez de la malla se beneficia de una mayor densidad (cantidad de módulos por m² de superficie). Pero cuando se agrega un mayor número de nudos es posible que el sistema sea más costoso de construir y más pesado. Se debe buscar un equilibrio en el tamaño del módulo que tenga en cuenta la escala de los modelos propuestos y no comprometa su comportamiento estructural ni su viabilidad constructiva.

La malla Hexagrid, desde el punto de vista de una membrana, puede ser comprendida como una envolvente continua que marca los cambios de dirección dentro de la misma lógica de hexágonos que se deforman para ajustarse a una nueva orientación. O se puede entender como la suma de superficies independientes y cerradas que se unen entre sí en los bordes de la malla formando nuevas figuras geométricas romboidales en las intersecciones.

²⁷ En el modelo propuesto por la HTA Association (HTA Association, 2007) se analiza un edificio cuadrado de 12 pisos con una Hexagrid perimetral y 4 pilares interiores, aquí se propone reemplazar los pilares por un núcleo que sigue el patrón de construcción de la Hexagrid.

²⁸ (Montuori, 2015).

²⁹ (de Meijer, 2012).

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

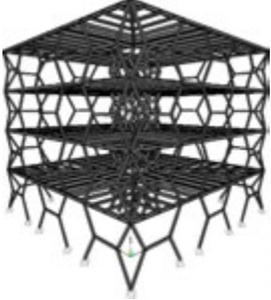
Conociendo la importancia que tiene el forjado en la rigidez de la malla Hexagrid y, a través de esta, de toda la estructura del edificio, se debe encontrar una configuración de forjado que se adapte a la malla para que puedan colaborar de una forma eficiente.

3.1.1. Modelos exploratorios

Como paso previo a la definición de los modelos que van a ser el objeto de estudio, se crea un conjunto de ejemplos exploratorios que permita probar, analizar empíricamente y entender todas las características antes mencionadas de las Hexagrid.

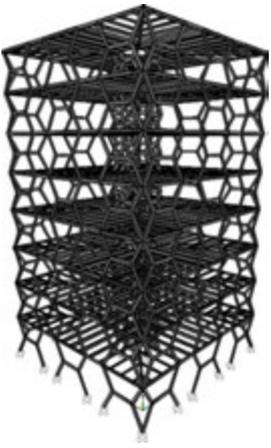
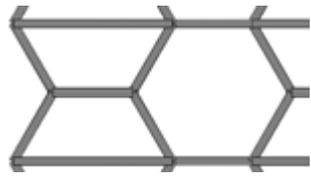
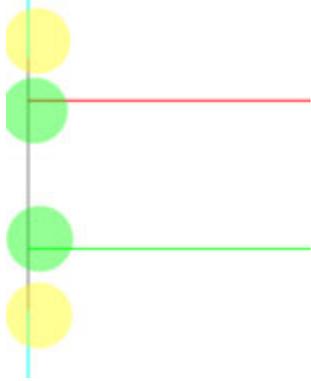
En total se crearon 8 familias de modelos en las que se plantean 2 densidades diferentes de malla, 2 formas de relación del forjado con las Hexagrid y 2 configuraciones de continuidad de malla. Cada una de las familias de modelos fue probada aplicando su peso propio y cargas vivas verticales a 4 alturas diferentes³⁰ para que los patrones de comportamiento fueran más reconocibles y más fáciles de comparar.

Tabla 2: Modelos exploratorios Familia 1

| Familia 1 (Referencia modelo 4 pisos) | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Discontinuo con nuevo polígono en forma de diamante | Un módulo de altura entre forjados | Forjado independiente que se conecta a la Hexagrid |

³⁰ 4 pisos, 8 pisos, 12 pisos, 16 pisos

Tabla 3: Modelos exploratorios Familia 2

| Familia 2 (Referencia modelo 8 pisos) | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Discontinuo con nuevo polígono en forma de diamante | Un módulo de altura entre forjados | Forjado y Hexagrid dependientes y conectados en el mismo plano |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Tabla 4: Modelos exploratorios Familia 3

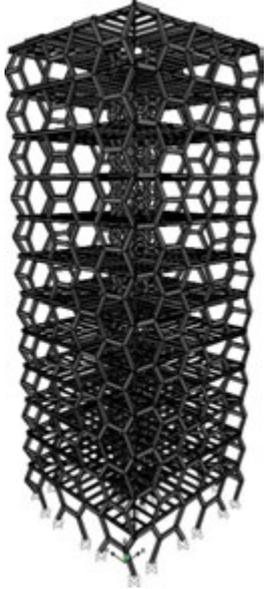
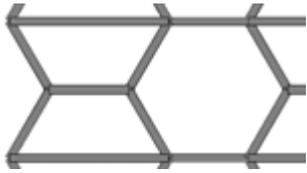
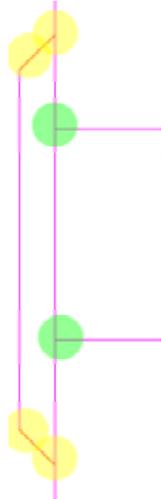
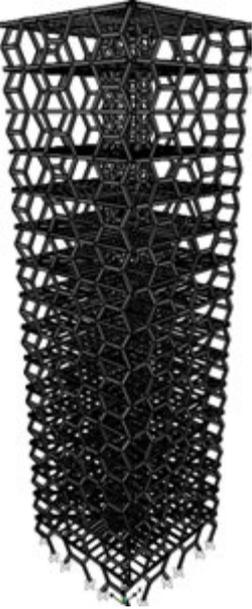
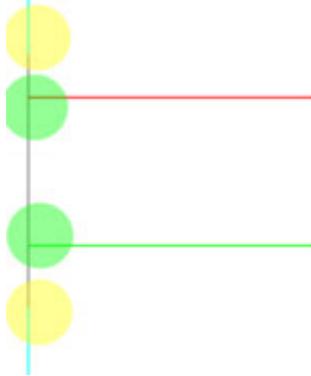
| Familia 3 | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Continuo, los polígonos de borde comparten barras | Un módulo de altura entre forjados | Forjado independiente que se conecta a la Hexagrid |

Tabla 5: Modelos exploratorios Familia 4

| Familia 4 | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Continuo, los polígonos de borde comparten barras | Un módulo de altura entre forjados | Forjado y Hexagrid dependientes y conectados en el mismo plano |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Tabla 6: Modelos exploratorios Familia 5

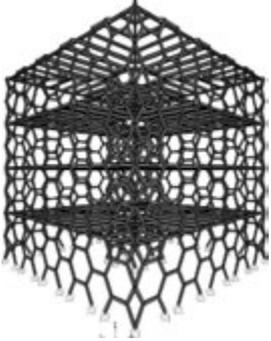
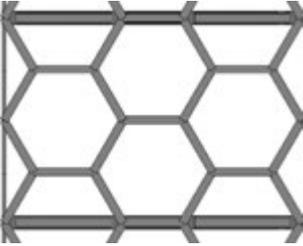
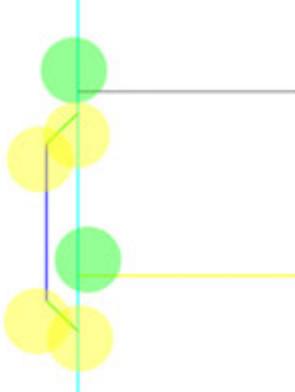
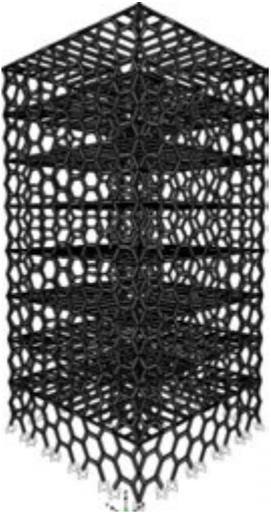
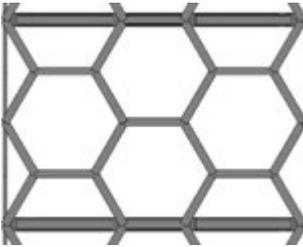
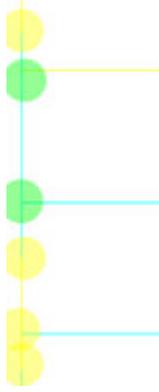
| Familia 5 | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Discontinuo con nuevo polígono en forma de diamante | Dos módulos de altura entre forjados | Forjado independiente que se conecta a la Hexagrid |

Tabla 7: Modelos exploratorios Familia 6

| Familia 6 | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Discontinuo con nuevo polígono en forma de diamante | Dos módulos de altura entre forjados | Forjado y Hexagrid dependientes y conectados en el mismo plano |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Tabla 8: Modelos exploratorios Familia 7

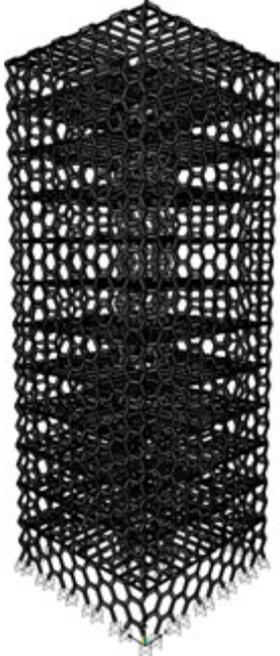
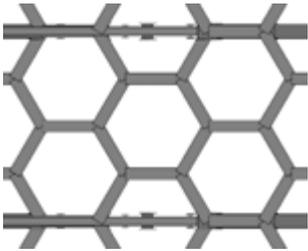
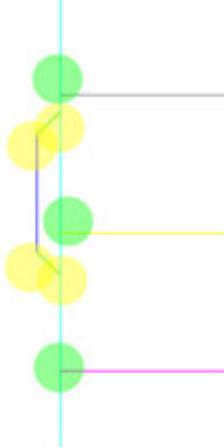
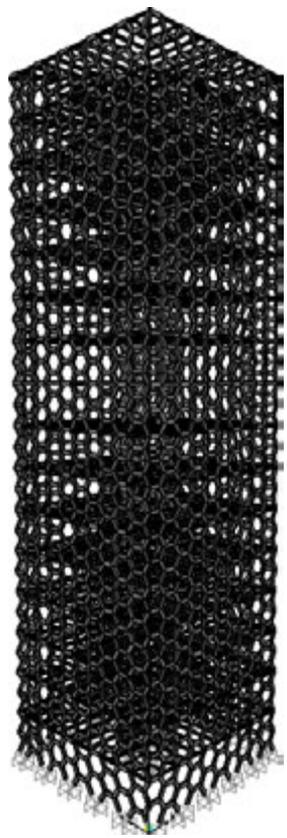
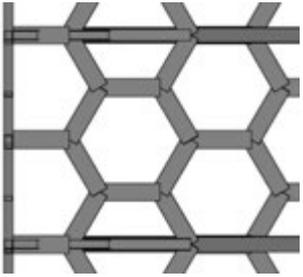
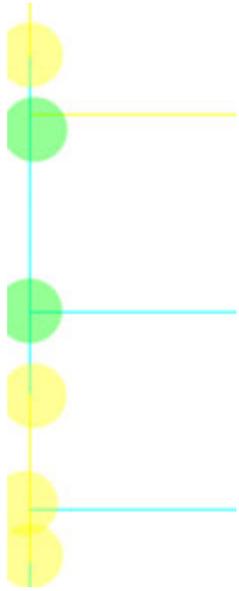
| Familia 7 | | |
|--|---|---|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Continuo, los polígonos de borde comparten barras | Dos módulos de altura entre forjados | Forjado independiente que se conecta a la Hexagrid |

Tabla 9: Modelos exploratorios Familia 8

| Familia 8 | | |
|--|---|--|
|  |  |  |
| Giro de malla | Densidad de malla | Relación forjado malla |
| Continuo, los polígonos de borde comparten barras | Dos módulos de altura entre forjados | Forjado y Hexagrid dependientes y conectados en el mismo plano |

A partir del estudio previo, se considera que la familia de modelos definitivos que se planteen para su análisis debe cumplir las siguientes características:

Una estructura de Hexagrid modulada en función de la altura entre forjados, que se plantee como un conjunto de superficies independientes y cerradas que se intersecan entre sí formando la envolvente que conforma el volumen del edificio.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Se debe intentar que cada una de las mallas sea simétrica y que las caras que se enfrentan entre sí en el volumen ortogonal sean el reflejo la una de la otra para facilitar la concepción del entramado del forjado.

Es preferible que la modulación del entramado de los forjados siga la regularidad que puede ofrecer la Hexagrid. La idea de evitar los apoyos intermedios y hacer que los forjados descansen en la envolvente perimetral y un núcleo es lo más conveniente y lo más recomendable.

Se considera que la malla Hexagrid perimetral ofrece suficiente rigidez lateral, por lo que se entiende que el núcleo es más bien un apoyo en el que descansa el forjado y descarga su peso, como para permitir manejar más eficientemente su deformación. Por lo tanto, se considera al núcleo un gran pilar hueco que mantiene una modulación y un diseño similar al de la Hexagrid con la intención de resolver toda la estructura dentro del mismo sistema constructivo que cumpla la posibilidad de plegar y desplegar sus barras.

3.2. Modelos propuestos

Se propone un modelo geométrico de base cuadrada cuyo volumen se encuentra contenido en un paralelepípedo con unas dimensiones de 16,17 m por 16,17 m de base por (n pisos) * 3,50 m de altura. Con una disposición estructural que se asemeja a un *Tube-in-tube*, que es aquel que reparte la distribución de cargas entre la estructura perimetral y un núcleo.

El núcleo está compuesto por 4 módulos hexagonales, uno por cara, que forman un cuadrado en planta y que tiene tantos módulos de altura como pisos tiene el edificio.

El sistema tubular perimetral está constituido por 4 superficies idénticas y simétricas en su geometría, y la distribución de cargas hace que cada una de las caras esté sometida a esfuerzos iguales con un comportamiento y deformación que se puede correlacionar.

Cada superficie está compuesta de una malla hexagonal horizontal formada por 5 módulos de ancho por tantos módulos hexagonales de alto como número de pisos tenga el modelo.

En total se dimensionan y analizan 13 modelos que van desde los 4 hasta los 16 pisos de altura, distribuidos en 3 grupos en función de la posible distribución de perfiles de acero en la Hexagrid perimetral o exterior.

Tabla 10: Lista de modelos propuestos

| Pisos | h (m) | A | B | C |
|------------------|-------|----|------------------|----|
| 4 | 14.00 | SI | NO ³¹ | SI |
| 8 | 28.00 | SI | SI | SI |
| 12 | 42.00 | SI | SI | SI |
| 15 | 52.50 | SI | SI | SI |
| 16 ³² | 56.00 | SI | NO | SI |

³¹ La configuración obtenida en el modelo tipo A hace innecesario utilizar el modelo tipo B. De hecho, se plantea el modelo tipo C solo para comprobar que el modelo tipo A y el modelo tipo C llegan al mismo resultado incluso utilizando metodologías de dimensionado de perfiles diferentes.

³² El modelo geométrico propuesto, junto a los posibles perfiles y espesores que se podían utilizar en el dimensionado de la estructura, muestra que la estructura para 16 pisos colapsa y no es viable. Se realiza el modelo tipo C para confirmar los resultados, aunque de desestiman los modelos.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Los modelos se agrupan en función de las posibles distribuciones de los perfiles en la Hexagrid³³ perimetral, en la que la malla de cada lado distribuye el volumen verticalmente en 3 grupos. De estos, 2 grupos de barras iguales correspondientes a los módulos de borde de malla y 1 módulo correspondiente al módulo central de la malla. Cada uno con unas posibles características que se detallan a continuación.

Serie A: se agrupan los perfiles de tal manera que los módulos de los extremos y los módulos centrales pueden tener diferente espesor y tamaño de sección.

Serie B: se mantiene la agrupación de la serie A pero permitiendo que los perfiles varíen solo en espesor. Aunque deben mantener las mismas dimensiones volumétricas en todas sus secciones para que exista uniformidad en la densidad visual de la malla.

Serie C: toda la Hexagrid perimetral se calcula para el mismo perfil y espesor.

El objetivo de esta propuesta es encontrar un dimensionado coherente de las barras de acero que componen los modelos, para luego analizar el comportamiento de las estructuras resultantes en función del dimensionado de las barras, de su deformación y del peso por m² de forjado, y para determinar las cualidades y defectos de los posibles edificios.

³³ Ver más adelante: Grupos de elementos para la aplicación de propiedades.

3.3. Metodología aplicada

La metodología utilizada para cada uno de los modelos propuestos sigue el mismo proceso.

3.3.1. Construcción del modelo virtual

En el programa AutoCAD se construye, mediante líneas y elementos superficiales llamados *3dface*, un modelo³⁴ de barras que simula la Hexagrid y las vigas al que se le agregan los forjados simulados mediante placas con la intención de aplicar las fuerzas distribuidas en dichas superficies.

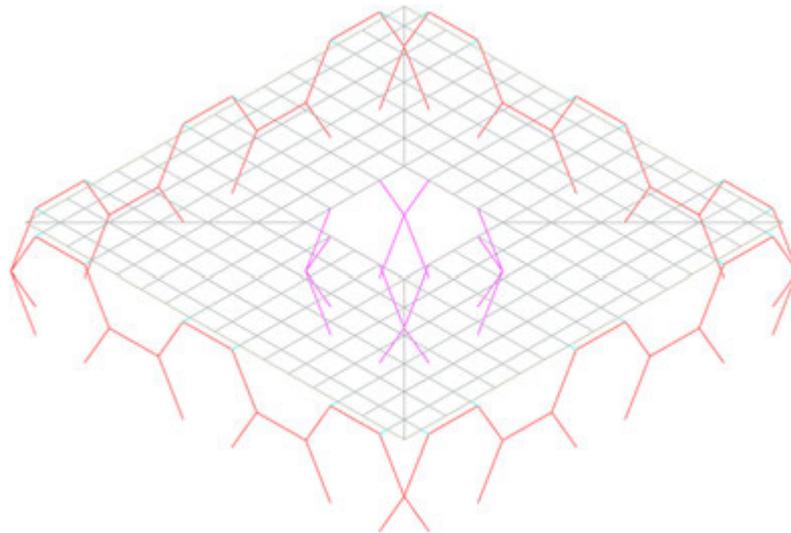


Ilustración 41: Isometría modelo base realizado en AutoCAD

Los modelos tridimensionales, dibujados en escala 1:1, contienen toda la información geométrica necesaria para introducir los datos de las propiedades mecánicas de cada modelo y aplicar las respectivas cargas y los apoyos.

Para poder continuar con el proceso es necesario importar el modelo virtual al programa SAP2000, v.19.

³⁴ El modelo corresponde al módulo de un piso con su correspondiente forjado. El ajuste en el número de pisos se hace en el programa SAP2000 mediante la copia de elementos.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

3.3.2. Grupos de elementos para la aplicación de propiedades

Se importa el modelo virtual a SAP2000 y se ajusta el número de pisos de acuerdo al modelo que se va a calcular. Con el fin de organizar la introducción de datos en el modelo, se coloca en grupos diferenciados cada uno de los elementos de la estructura. El criterio que se impone en el momento de agrupar las barras es el de colocar en el mismo conjunto las barras que comparten propiedades y de las que se espera que tengan un comportamiento similar con una sollicitación parecida de esfuerzos.

Tabla 11: Grupos de barras en modelo I

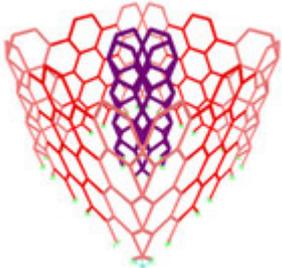
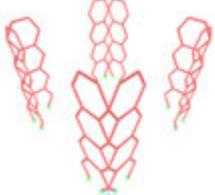
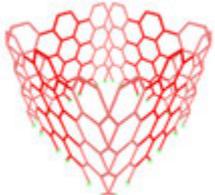
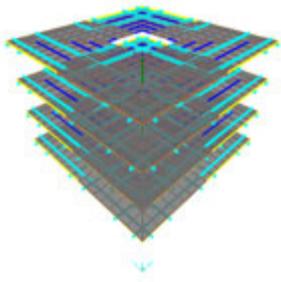
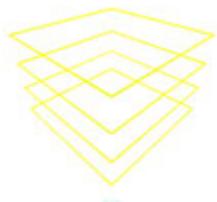
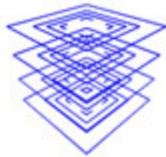
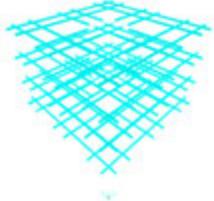
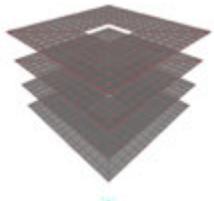
| Grupos correspondientes a Hexagrid (Modelo de referencia 4 pisos) | | |
|--|---|---|
| Grupo | Ubicación / Uso | |
| H1 | Sección central de cada una de las mallas superficiales en la Hexagrid perimetral. Se utiliza en los modelos tipo A y tipo B |  |
| H2 | Núcleo de la estructura propuesta |  |
| H3 | Secciones laterales de cada una de las mallas superficiales que forman las esquinas en la Hexagrid perimetral. Se utilizan en los modelos tipo A y tipo B |  |
| H4 | Todas las barras que componen las superficies que forman la Hexagrid perimetral comparten las mismas propiedades mecánicas. Uso en modelos tipo C |  |

Tabla 12: Grupos de barras en modelo II

| Grupos correspondientes a forjados (Modelo de referencia 4 pisos) | |  |
|---|--|---|
| Grupo | Ubicación / Uso | |
| F1 | Vigas de borde que marcan los límites del forjado |  |
| F2 | Serie de anillos concéntricos que colaboran en la distribución de cargas |  |
| F3 | Vigas diagonales que unen y rigidizan a los componentes del forjado |  |
| F4 | Vigas principales que conectan el forjado con la Hexagrid |  |
| SHELL | Capa de hormigón armado sobre vigas de forjado. Compuesta por 264 módulos cubriendo un área de 295,26 m ² por forjado |  |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

3.3.3. Propiedades mecánicas de la estructura

A cada grupo de elementos se le otorga las propiedades mecánicas³⁵ que corresponden al modelo que se va a calcular. Hay que tener en cuenta que para cada barra se elige un rango de perfiles posibles, ya que las secciones definitivas se determinarán mediante el cálculo avanzado de secciones de acero del programa informático.

3.3.3.1. Hexagrid

Para las mallas Hexagrid se elige, dentro del catálogo europeo de perfiles de SAP2000, un conjunto de perfiles tubulares rectangulares que van desde los 180 mm * 126 mm * 10 mm hasta los 400 mm * 400 mm * 40 mm en acero S355.

Los perfiles utilizados en la Hexagrid son *hollow tubes* rectangulares, similares a los utilizados en análisis desarrollados por otros autores (Montuori, et al., 2015), (de Meijer, 2012), porque simplifican el diseño de las uniones y funcionan adecuadamente para estructuras que están sometidas a flexo compresión.

3.3.3.2. Forjado

Los forjados son mixtos, por lo que tenemos un entramado metálico sobre el que descansa una capa de hormigón armado. Las 2 partes del forjado están modeladas de tal manera que trabajan conjuntamente con una conexión total, donde las deformaciones de las vigas de acero son las mismas que las de la capa de hormigón.

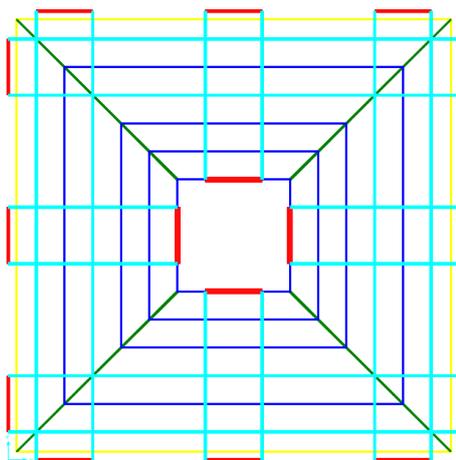


Ilustración 42: Disposición de vigas en forjado tipo

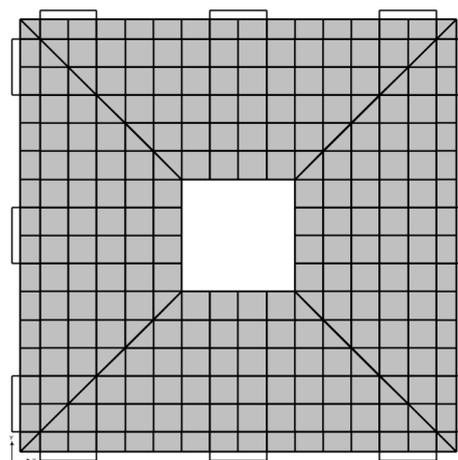


Ilustración 43: Modulación de capa de hormigón en forjado tipo

³⁵ Se entiende por propiedades mecánicas el material, la sección y el tipo de perfil de los elementos.

Para el entramado se propone un conjunto de perfiles tipo IPE que van desde el IPE 100 al IPE 600 en acero S355.

Para la capa de hormigón armado se propone un hormigón C30/37 de 12 cm de espesor. Se simula esta capa a través de un conjunto de módulos cuadrados regulares cuyas dimensiones son de 101 cm por lado. La modulación se ajusta concéntricamente desde el interior hacia el exterior, siendo los módulos de borde los que ajustan su tamaño para completar la superficie de forjado.

3.3.4. Apoyos y cargas aplicadas

Todos los modelos tienen 32 apoyos³⁶ distribuidos entre la Hexagrid perimetral con 24 apoyos (6 por cara) y el núcleo central con 8 (2 por cara). Los desplazamientos y giros están limitados, considerando todos los apoyos como empotrados.

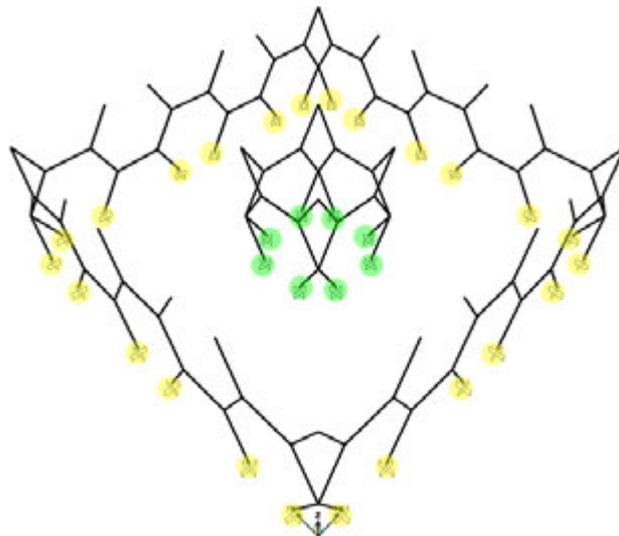


Ilustración 44: Disposición de apoyos en modelo

Además del peso propio de la estructura, se aplica en todos los forjados, excepto en el de la cubierta, una carga permanente de 1,5 kN/m² (DEAD) y una sobrecarga de uso (LIVE) de 2 kN/m².

³⁶ Todos los apoyos se encuentran ubicados en el mismo plano de referencia $n = \pm 0.00$ m.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

En el forjado de cubierta se aplica una sobrecarga de uso de 1 kN/m² (ROOF LIVE) y una carga puntual de 2 kN (ROOF LIVE) en el punto más desfavorable.

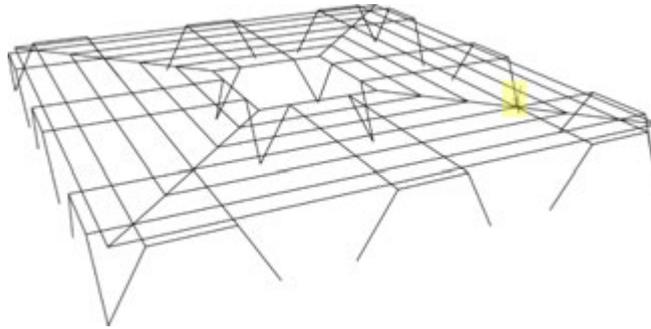


Ilustración 45: Aplicación de carga puntual de 2 kN en forjado de cubierta

3.3.5. Viento, metodología y aplicación

Se utiliza el método automático de aplicación de fuerzas debido al viento que viene en el programa SAP2000 V19 (Computers and Structures, Inc., 2017) aplicando la normativa Euro código 1 2005. El sistema aplica fuerzas horizontales en los forjados, considerando que los forjados son infinitamente rígidos en el eje z. Se crean vientos en la dirección de las coordenadas x e y.³⁷

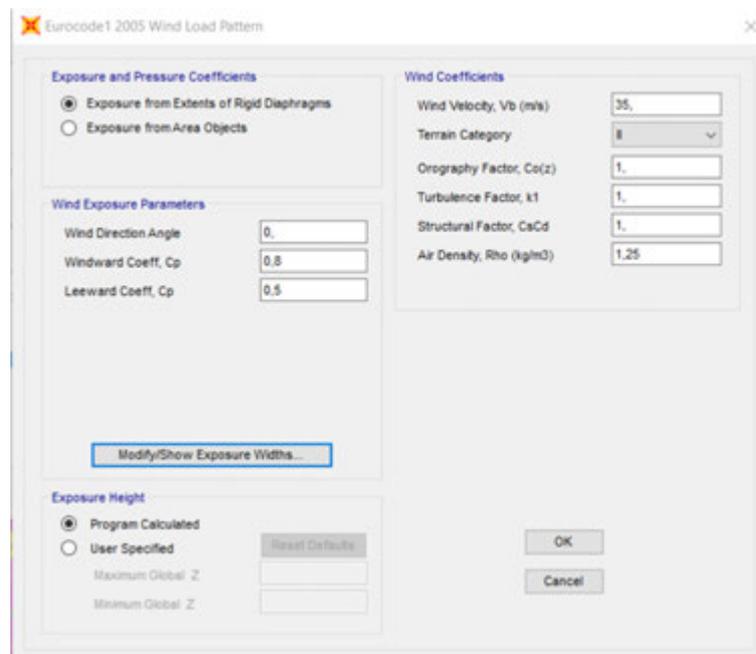


Ilustración 46: Coeficientes aplicados en programa SAP2000 V.19 para la obtención de cargas de viento (WIND_X) en modelos propuestos

³⁷ Los vientos en direcciones x e y (WIND_X y WIND_Y) son exactamente iguales. Solo se cambia la dirección del viento de 0 a 90 grados para ajustar la dirección y.

3.3.6. Estados de carga

Tabla 13: Casos de carga (LOAD CASES) aplicados a todos los modelos propuestos

| Combo Name | Case Name | Scale Factor | Steel Design | Notes |
|------------|------------------------|----------------------|--------------|-----------------------------|
| UDSTL1 | DEAD | 1,35 | Strength | Dead Only; Strength |
| UDSTL2 | DEAD LIVE | 1,35 1,5 | Strength | Dead + Live; Strength |
| UDSTL3 | DEAD LIVE WIND X | 1,35 1,5 0,9 | Strength | |
| UDSTL4 | DEAD LIVE WIND X | 1,35 1,5 -0,9 | Strength | |
| UDSTL5 | DEAD LIVE WIND Y | 1,35 1,5 0,9 | Strength | |
| UDSTL6 | DEAD LIVE WIND Y | 1,35 1,5 -0,9 | Strength | |
| UDSTL7 | DEAD LIVE WIND X | 1,35 1,05 1,5 | Strength | |
| UDSTL8 | DEAD LIVE WIND X | 1,35 1,05 -1,5 | Strength | |
| UDSTL9 | DEAD LIVE WIND Y | 1,35 1,05 1,5 | Strength | |
| UDSTL10 | DEAD LIVE WIND Y | 1,35 1,05 -1,5 | Strength | |
| UDSTL11 | DEAD WIND X | 1,35 1,5 | Strength | Dead + Wind; Strength |
| UDSTL12 | DEAD WIND X | 1,35 -1,5 | Strength | Dead - Wind; Strength |
| UDSTL13 | DEAD WIND Y | 1,35 1,5 | Strength | Dead + Wind; Strength |
| UDSTL14 | DEAD WIND Y | 1,35 -1,5 | Strength | Dead - Wind; Strength |
| UDSTL15 | DEAD WIND X | 1 1,5 | Strength | Dead (min) + Wind; Strength |
| UDSTL16 | DEAD WIND X | 1 -1,5 | Strength | Dead (min) - Wind; Strength |
| UDSTL17 | DEAD WIND Y | 1 1,5 | Strength | Dead (min) + Wind; Strength |
| UDSTL18 | DEAD WIND Y | 1 -1,5 | Strength | Dead (min) - Wind; Strength |
| UDSTL19 | DEAD | 1 | Deflection | Dead Only; Deflection |
| UDSTL20 | DEAD LIVE | 1 1 | Deflection | Dead + Live; Deflection |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Para todos los modelos se utilizarán los casos de carga que indica la normativa Eurocódigo 1 2005. Se obtienen 20 casos de carga con diferentes combinaciones y coeficientes de seguridad para cada una de las cargas aplicadas.

3.3.7. Cálculo y dimensionado de las estructuras

Se plantea un cálculo estático lineal para cada uno de los tipos de carga aplicados. El predimensionado para iniciar el cálculo viene condicionado por el conjunto de perfiles que se aplica a cada uno de los grupos de barras, ya que por defecto el sistema adjudica a las barras la sección promedio del conjunto de los perfiles posibles.

Tabla 14: Perfiles dimensionados en Hexagrids perimetrales y núcleos para cada uno de los modelos propuestos

| Pisos | Perfiles utilizados en Hexagrids (medidas en mm) | | | | |
|-------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H1 | H2 | H3 | H4 | |
| 4 | A | Tubo 180*90*5,4 | Tubo 260*182*10 | Tubo 180*90*5,4 | |
| | B | | | | |
| | C | | Tubo 260*182*10 | | Tubo 180*90*5,4 |
| 8 | A | Tubo 200*140*8 | Tubo 360*252*14,2 | Tubo 200*140*8 | |
| | B | Tubo 200*140*8 | Tubo 360*252*14,2 | Tubo 200*140*8 | |
| | C | | Tubo 360*252*14,2 | | Tubo 200*140*8 |
| 12 | A | Tubo 280*140*10 | Tubo 400*280*17,5 | Tubo 260*182*10 | |
| | B | Tubo 280*140*12,5 | Tubo 400*280*16 | Tubo 280*140*12,5 | |
| | C | | Tubo 400*280*17,5 | | Tubo 260*182*10 |
| 15 | A | Tubo 300*150*12,5 | Tubo 360*360*20 | Tubo 340*170*12,5 | |
| | B | Tubo 320*160*12,5 | Tubo 360*360*20 | Tubo 320*160*12,5 | |
| | C | | Tubo 400*280*20 | | Tubo 340*170*12,5 |

El dimensionado de los perfiles y el cálculo de la estructura comparten un proceso en el que se calcula la estructura predimensionada. Con los resultados obtenidos el programa se encarga de elegir³⁸, dentro de las posibilidades del conjunto de perfiles asignado, las secciones óptimas para las tensiones producidas por los esfuerzos, después se recalcula la estructura. Este proceso se realiza hasta que los perfiles elegidos son los

³⁸ El dimensionado de los perfiles se hace en base al Eurocódigo 3 2005.

adecuados para los esfuerzos resultantes y ya no cambian las secciones, finalizando así el proceso.

Tabla 15: Perfiles propuestos para su uso en los forjados y el perfil utilizado en cada edificio

| Grupo asignado | Nombre Perfil | 4 pisos | 8 pisos | 12 pisos | 15 pisos |
|-----------------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| F1 | IPE100 | | | | |
| F1 | IPE120 | | | | |
| F1 | IPE140 | | | | |
| F1 | IPE160 | | | | |
| F1 | IPE180 | | | | |
| F1 | IPE200 | | | | |
| F1 | IPE220 | | | | |
| F1 | IPE240 | | | | |
| F1 | IPE270 | | | | |
| F1 | IPE300 | | | | |
| F1 | IPE330 | | | | |
| F1 | IPE360 | | | | |
| F1 | IPE400 | | | | |

Una vez finalizado el proceso de dimensionado de perfiles se puede dar por concluida la construcción de los modelos.

3.4. Análisis de resultados

El análisis de resultados tiene como finalidad entender un poco más el comportamiento de los modelos propuestos y buscar los parámetros que indiquen el rango en el que mejor podría funcionar el sistema tal y como está planteado. Después de observar los resultados del dimensionado de barras, se decide enfocar el análisis de los resultados en los modelos tipo C.

3.4.1. Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil

En los modelos tipo C en los que toda la Hexagrid perimetral tiene asignado el mismo perfil, se puede hacer una correlación de la magnitud de las tensiones que reciben cada uno de los elementos de las mallas y el aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Se ve que el comportamiento de la estructura es simétrico e idéntico en cada una de las 4 mallas que componen el modelo, lo que es de esperar ante edificaciones de base cuadrada con vientos equivalentes en las direcciones x e y con sentido positivo y negativo.

Causa cierta sorpresa la posición de las barras más solicitadas³⁹ en la Hexagrid perimetral (H4), ya que no se encuentra ni en los extremos laterales ni en la base de la malla. La explicación de este fenómeno puede estar en el diseño de la esquina de los modelos en los que los nudos recogen 4 barras y no 3 como en los demás. Por un lado, esto hace que los esfuerzos se puedan repartir más y, por otro, la geometría de diamante que forman las barras en el borde más la rigidez otorgada por el forjado hace que esas barras trabajen más eficientemente.

³⁹ Se muestra la posición de las barras más solicitadas al encontrar un punto rojo sobre la barra correspondiente en cada modelo.

Tabla 16: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 4 pisos tipo C

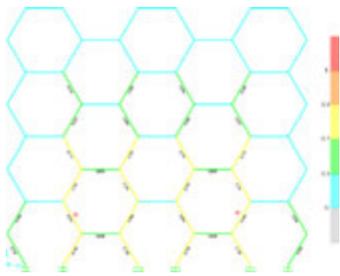
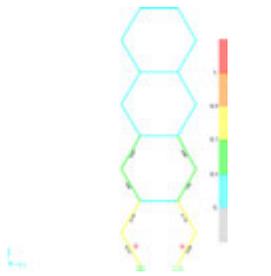
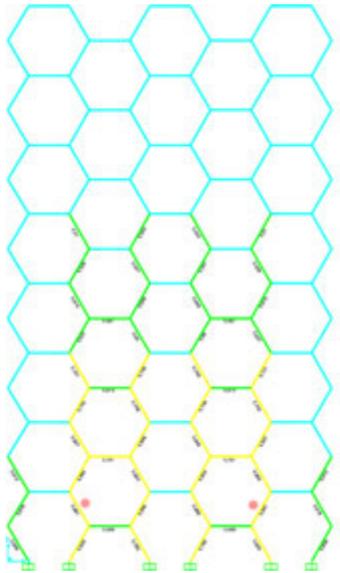
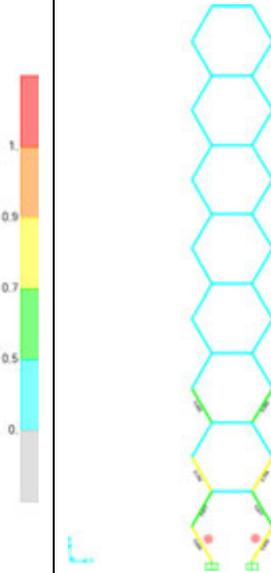
| Grupo | H4 (Perimetral) | H2 (Núcleo) |
|----------------------------|---|--|
| Vista frontal de malla x-x |  |  |
| Aprovechamiento máx. | 0.883 (min. = 0; máx. = 1) | 0.839 (min. = 0; máx. = 1) |

Tabla 17: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 8 pisos tipo C

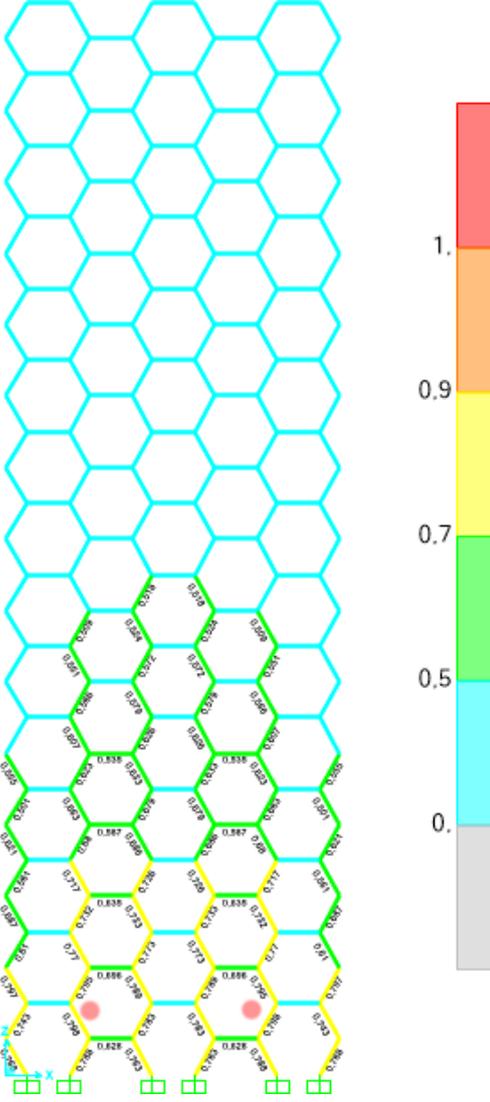
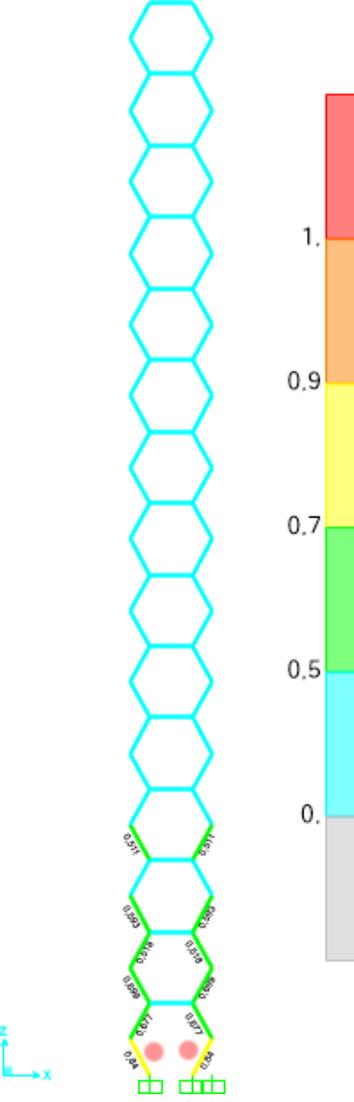
| Grupo | H4 (Perimetral) | H2 (Núcleo) |
|----------------------------|---|--|
| Vista frontal de malla x-x |  |  |
| Aprovechamiento máx. | 0.881 (min. = 0; máx. = 1) | 0.834 (min. = 0; máx. = 1) |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Tabla 18: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 12 pisos tipo C

| Grupo | H4 (Perimetral) | H2 (Núcleo) |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Vista frontal de malla x-x | | |
| Aprovechamiento máx. | 0.845 (min. = 0; máx. = 1) | 0.872 (min. = 0; máx. = 1) |

Tabla 19: Aprovechamiento de la capacidad resistente del perfil. Modelo 8 pisos tipo C

| Grupo | H4 (Perimetral) | H2 (Núcleo) |
|-----------------------------|--|---|
| Vista frontal de malla x-x. |  |  |
| Aprovechamiento máx. | 0.798 (min. = 0; máx. = 1) | 0.84 (min. = 0; máx. = 1) |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

3.4.2. Peso de la estructura

A través del cambio de peso en los diferentes modelos, se pretende ver la evolución de cada parte de la estructura según aumenta el número de pisos. Para tener una visión más adecuada es importante no solo saber el peso absoluto de los modelos, sino el peso por m² de superficie construida.

Se analizan los modelos tipo C con 4, 8, 12 y 15 pisos de altura, siendo kilogramos (kg) la unidad de peso.

Tabla 20: Peso de estructura en modelos propuestos tipo C (kg)

| Modelo | Hexagrids | | Forjados | | Total | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------------|
| | H2 | H4 | IPE | Hormigón | Acero | Acero + hormigón |
| 4 pisos | 10709,19 | 12075,25 | 22638,49 | 276417,7 | 45422,93 | 321840,63 |
| 8 pisos | 42050,08 | 44728,91 | 64708,78 | 552835,4 | 151487,77 | 704323,17 |
| 12 pisos | 85952,71 | 109233,79 | 110290,37 | 829253,09 | 305476,87 | 1134729,96 |
| 15 pisos | 121810,74 | 196239,01 | 137862,96 | 1036566,37 | 455912,71 | 1492479,08 |

Tabla 21: Peso de estructura por m² de forjado en modelos propuestos tipo C (kg/m²)

| Modelo | Hexagrids | | Forjados | | Total | |
|-----------------------------|-----------|-------|----------|----------|--------|------------------|
| | H2 | H4 | IPE | Hormigón | Acero | Acero + hormigón |
| Área c/forjado | | | | | | |
| 295,26 m² | | | | | | |
| 4 pisos | 9,07 | 10,22 | 19,17 | 234,05 | 38,46 | 272,51 |
| 8 pisos | 17,8 | 18,94 | 27,39 | 234,05 | 64,13 | 298,18 |
| 12 pisos | 24,26 | 30,83 | 31,13 | 234,05 | 86,22 | 320,26 |
| 15 pisos | 27,5 | 44,31 | 31,13 | 234,05 | 102,94 | 336,99 |

Tal y como se observa, la mayoría del peso de las edificaciones corresponde al de la capa de 12 cm de espesor de los forjados, que se incrementa linealmente según aumenta el número de pisos.

Centrándonos en el análisis del peso de la estructura de acero, se puede ver que en el rango de 4 a 8 pisos de altura el peso de la Hexagrid perimetral (H4) y del núcleo (H2) es similar y proporcional. A partir de los 12 pisos se nota un incremento mayor en la malla

H4, de tal forma que la proporción entre el peso de las 2 mallas pasa a ser de casi 1,06 en el modelo de 8 pisos, a 1,27 en el modelo de 12 pisos y a 1,61 en el modelo de 15 pisos.

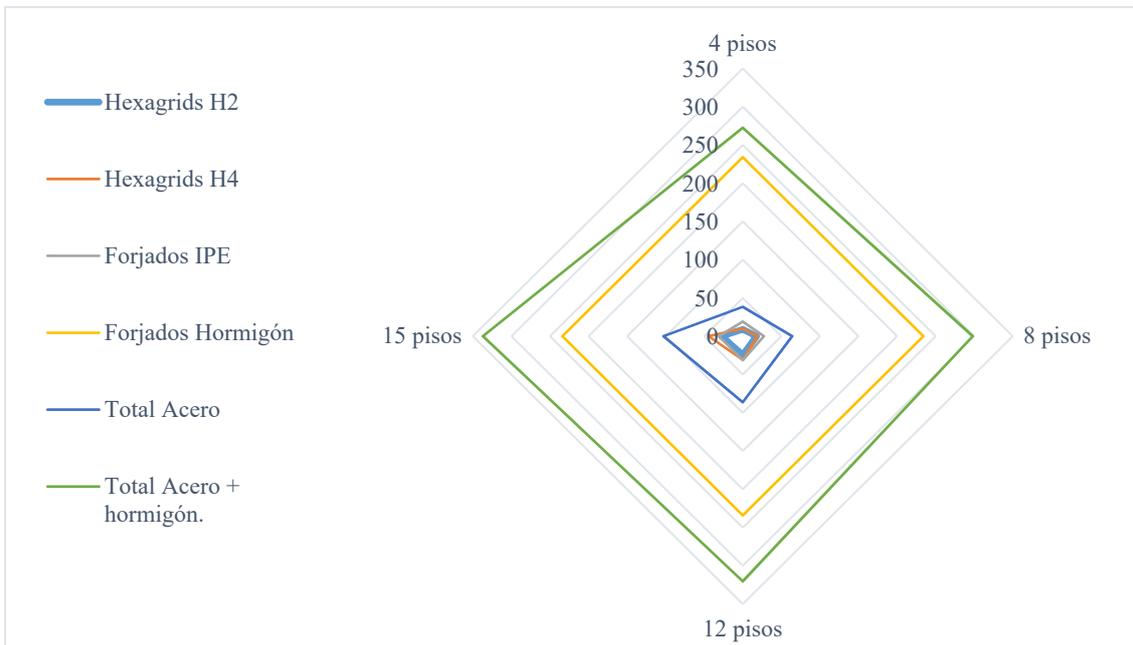


Ilustración 47: Peso por m2 de forjado de estructura en modelos propuestos tipo C

Se considera que este aumento de peso, que refleja una mayor importancia de la Hexagrid perimetral en el conjunto del modelo, tiene que ver con el aumento de los esfuerzos debidos al viento y en cómo esta malla se hace cargo de soportar estos esfuerzos frente al núcleo, que tiene una mayor participación en la transmisión de cargas verticales al suelo.

Los perfiles de acero IPE, que pertenecen al forjado, son los que contribuyen con más peso en los modelos de 4 y 8 pisos, llegando a un punto de equilibrio entre estos perfiles y la malla H4 del modelo de 12 pisos y estabilizando su peso para el edificio de 15 pisos.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

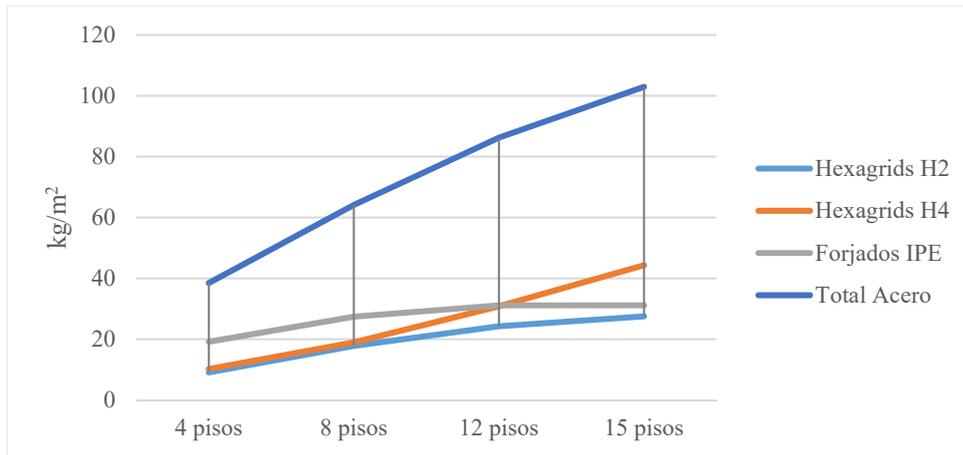


Ilustración 48: Peso por m2 de forjado de estructura de acero en modelos propuestos tipo C

3.4.3. Comparación entre deformaciones producidas por acción del viento versus deformaciones producidas por las cargas permanentes y la sobrecarga de uso

Se busca hacer una comparación de las deformaciones máximas absolutas acumuladas producidas por cargas verticales en el eje z versus la deformación máxima producida por el viento en el eje x en la Hexagrid perimetral (H4) y el núcleo (H2).

Se buscan patrones que se puedan correlacionar con los datos obtenidos en los anteriores análisis para definir el rango de acción adecuado para las estructuras Hexagrid que aquí se están proponiendo. Para realizar la comparación se recurre al cálculo del estado de carga UDSTL20 (DEAD*1 + LIVE*1) y al cálculo del viento en el eje x (WIND_X).

Tabla 22: Deformaciones máx. absolutas debido a WIND_x y UDSTL20 en modelos propuestos tipo C

| Modelo | Def. máx. eje x (mm) | Def. máx. acumulada eje z (mm) | (Def. WIND_x) / (Def. UDSTL20) |
|----------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | WIND_x | UDSTL20 | |
| 4 pisos | 20,14 | 12,98 | 1,55 |
| 8 pisos | 50,24 | 19,13 | 2,63 |
| 12 pisos | 78,33 | 24,48 | 3,20 |
| 15 pisos | 92,60 | 30,15 | 3,07 |

Se puede ver que en el rango de 4 a 12 pisos, a medida que aumenta la altura, la relación entre la deformación vertical y la deformación horizontal aumenta. Mientras que

en el modelo de 15 pisos disminuye levemente respecto al modelo de 12 pisos. Este hecho puede estar relacionado con la posible tendencia que se observó en el aumento de cantidad de material en la Hexagrid perimetral (H4) para el modelo de 15 pisos.

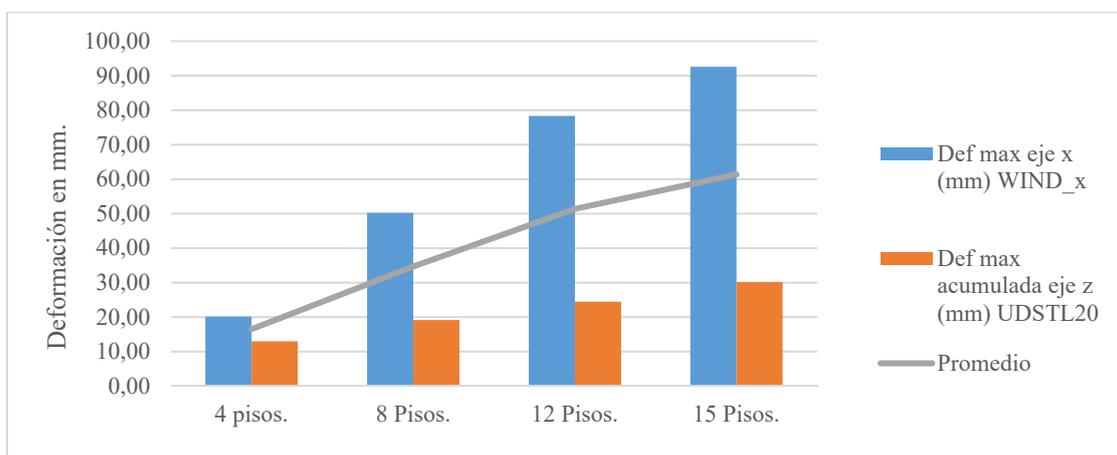


Ilustración 49: Deformaciones máx. absolutas debido a WIND_x y UDSTL20 en modelos propuestos tipo C

3.5. Conclusiones y discusión del capítulo

La resolución de los bordes de las superficies, que se forman al cambiar de dirección la malla, afecta al comportamiento global de la estructura.

El sistema de superficies cerradas que forma en las esquinas nuevos módulos geométricos con forma de diamante, ofrece un aumento de la rigidez de la malla disminuyendo las deformaciones y los desplazamientos.

A nivel global, a medida que aumenta la densidad de la Hexagrid (por ejemplo, de 1 a 2 módulos por piso) o que aumenta el número de módulos a lo ancho de cada una de las superficies que forman la malla (aumenta el ancho de la base del edificio), el efecto de la rigidez causado por el módulo de diamante que se forma en los cambios de dirección se diluye. A nivel local, en cambio, el efecto se diluye solo al aumentar la densidad de la malla.

La modulación de la Hexagrid condiciona la configuración del forjado a través de la disposición de las vigas principales que recogen las cargas. En todo caso es mucho más eficiente diseñar el forjado del entramado siguiendo la semirregularidad de la Hexagrid que buscando una regularidad independiente de la misma.

Encontrar las dimensiones adecuadas para el módulo que va a conformar la Hexagrid es un punto crítico donde hay que mantener un compromiso entre eficiencia estructural (prima la mayor densidad de módulos posible) y eficiencia constructiva (prima el menor número de nudos posible).

Debido a que se trabaja solo con módulos regulares sin capacidad de transformación, las dimensiones que puede tener el edificio tanto en planta como en altura son limitadas y siempre dentro de las posibilidades del entramado hexagonal.

La condicionante del módulo regular indeformable es uno de los mayores puntos débiles del sistema propuesto. Aunque las posibles ventajas que se encuentran en el momento del proceso de estandarizado, construcción y ensamblado de los componentes de la estructura son mayores que las desventajas del dimensionado de la estructura.

El proponer el mismo modelo y modelarlo y calcularlo en diferentes alturas tiene como fin entender el comportamiento de la estructura, tal y como está propuesta, además de encontrar los límites de uso de la configuración planteada. El diseño y cálculo de edificios que llegan a los 15 y 16 pisos, con cerca de 60 m de altura, se hace con interés estrictamente académico, ya que se mantiene que el sistema que se propone debe ser factible y útil en el rango de los 8 pisos de altura.

El crear diseños alternativos englobados dentro de la misma propuesta, con cambios que no afectan al concepto del modelo planteado, sino que buscan en este caso un mejor aprovechamiento del material, sirve para explorar caminos que nos pueden llevar o no a nuevas soluciones útiles al sistema. En este caso las propuestas englobadas dentro de los modelos tipo A y tipo B se descartaron, ya que los resultados finales o bien eran los mismos que con la metodología de los modelos tipo C o variaban tan poco que esa diferencia no representaba una ventaja a tener en cuenta.

La metodología utilizada es bastante convencional y se ha hecho de tal manera que las propiedades aplicadas a los modelos, el cálculo y el dimensionado de la estructura se realizan dentro del entorno que se encuentra en los códigos estructurales europeos. La elección del Eurocódigo 1⁴⁰ y Eurocódigo 3⁴¹ para el tratamiento de los modelos es hecha en base a la experiencia previa del autor de esta investigación, que se encuentra familiarizado con esta normativa, y a la aceptación mundial de la misma.

El cálculo y el análisis de los modelos propuestos en este capítulo muestran que es posible utilizar la Hexagrid como un sistema estructural para edificaciones, coincidiendo con los estudios descritos en el capítulo 2 de esta investigación.

También se ha encontrado un conjunto de estructuras que tienen unas dimensiones de perfil que se puede decir que son potencialmente construibles, lo que permite continuar con la investigación tomando como referentes los modelos con resultados obtenidos en este capítulo.

A diferencia de una edificación convencional de pórticos, en el modelo de Hexagrid los forjados colaboran activamente en la rigidez de la malla Hexagrid, por lo

⁴⁰ EN 1991-1-4:2005.

⁴¹ EN 1993-1-4:2006.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

que se ve un aumento en el canto de las secciones de las vigas IPE de los forjados a medida que aumentan los modelos en altura.

Dentro del modelo propuesto, el peso de la capa de hormigón de los forjados ha condicionado los resultados y el dimensionado de los perfiles de las mallas. Se cree que encontrando la manera de disminuir la cantidad de hormigón utilizado en los forjados se aligeraría la estructura reflejándose directamente en el tamaño, que disminuiría, y en el espesor de los perfiles utilizados en la Hexagrid.

La viabilidad de la Hexagrid como un sistema estructural que pueda ser prefabricado, transportado y ensamblado dependerá del diseño de la unión que permita construir la malla con las condicionantes propuestas. Ese es el siguiente punto en el que se enfocará esta investigación.

Capítulo 4. Planteamiento de un sistema de plegado de malla y diseño de un nudo tipo

4.1. Introducción

A partir de los estudios realizados en el capítulo 2, se encuentra que el desarrollo de un nudo que permita la articulación de sus barras es factible y que existen innumerables ejemplos de diseños previamente realizados. Además, los diferentes diseños encontrados indican que pueden llegar a existir múltiples vías de desarrollo potencialmente adecuadas y que todo depende de las condiciones que el sistema genere y a las que el nudo diseñado deba responder.

En el tercer capítulo se han validado las capacidades estructurales de la Hexagrid mostrando sus cualidades y defectos reafirmando el uso potencial dentro del ámbito de la construcción de las estructuras prefabricadas.

Siguiendo el desarrollo marcado por las hipótesis de esta investigación, en este capítulo se intentará diseñar una solución que permita potenciar la capacidad de transporte del sistema Hexagrid. Para lograr esto se cree que un sistema de plegado que reduzca el volumen de la estructura, similar al de los sistemas utilizados en estructuras ligeras, es la vía a seguir.

La plegabilidad de la malla solo es posible si se diseña un nudo que ofrezca la movilidad requerida en el momento de la transformación. Pero que, al mismo tiempo, ofrezca la suficiente seguridad para que la estructura, una vez desplegada y fijada en su posición, pueda comportarse adecuadamente y soportar las cargas y los esfuerzos que se le presuponen.

Para realizar este diseño se seguirá una metodología de trabajo que partirá del planteo de un sistema general de plegado aplicable a la Hexagrid. Después se buscará el modelo de nudo tipo a través de una concepción geométrica funcional que garantice el movimiento y bloqueo de nudo y una validación estructural que asegure que tiene la capacidad resistente suficiente.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

4.2. Descripción de la estructura a resolver

Dentro de los modelos de edificación previamente desarrollados y analizados en el capítulo 3, se toma como muestra el modelo propuesto tipo C de 15 pisos, que corresponde a una edificación de base cuadrada cuyo volumen se encuentra contenido en un paralelepípedo cuyas dimensiones son de 16.17 m por 16.17 m de base por 52.5 m de altura. Su disposición estructural es de tubo en tubo, que reparte la distribución de cargas entre la estructura perimetral y un núcleo.

El sistema tubular perimetral, sobre el que concentraremos nuestra atención y desarrollo, está constituido por 4 superficies idénticas en su geometría y la distribución de cargas hace que estén sometidas a esfuerzos similares con un comportamiento y deformación que se puede correlacionar.

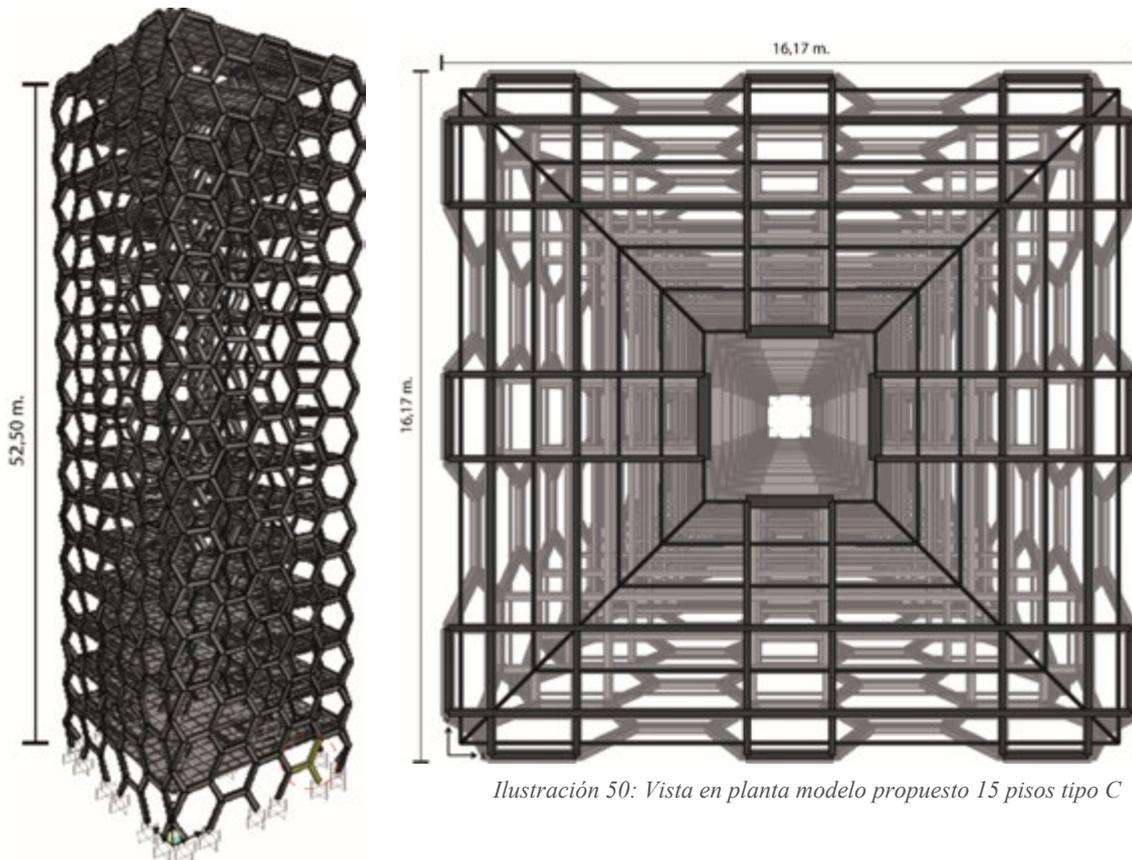


Ilustración 50: Vista en planta modelo propuesto 15 pisos tipo C

Ilustración 51: Axonometría modelo propuesto 15 pisos tipo C

Cada superficie lateral está compuesta de una malla formada por 5 módulos hexagonales a lo ancho por 15 módulos hexagonales a lo alto. Los módulos están acomodados de tal forma que 2 de los lados de cada módulo son paralelos a los forjados, con una distancia

entre ejes de 3,50 m. Mientras que en el sentido vertical se encuentran barras diagonales que forman los hexágonos regulares.

De todos los nudos y barras que conforman las mallas perimetrales, se decide utilizar como referencia el nudo número 14, que corresponde a la intersección de las barras 11, 12 y 17. La elección de este punto se justifica en el análisis estructural que indica que es en este nudo donde se concentra la mayor cantidad de esfuerzos.

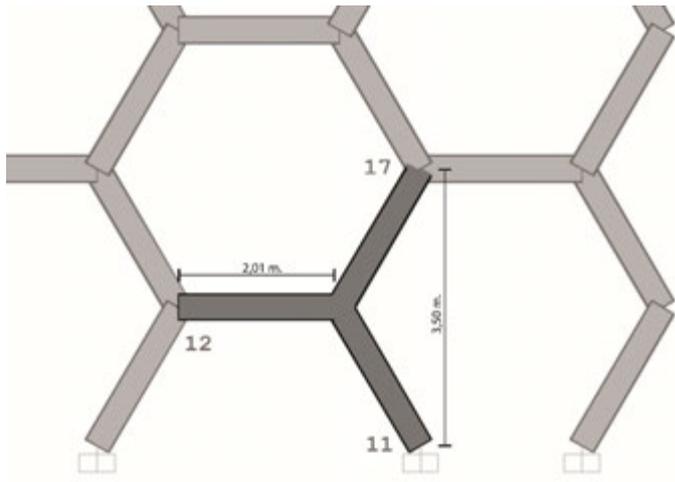


Ilustración 52: Nudo No. 14, Intersección de barras 11, 12 y 17

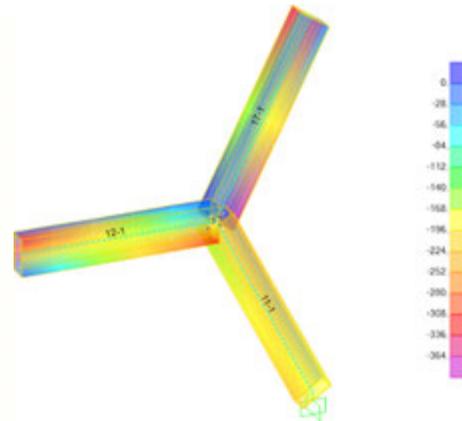


Ilustración 53: Diagrama de tensiones S11 en barras 11, 12 y 17. (N/mm² UDTSL7)

4.3. Método de empaquetado de la malla

Al tener una malla hexagonal regular⁴², se busca un sistema de empaquetado que, aprovechando el vacío que existe entre las barras, disminuya en lo máximo posible el volumen de la malla para poder realizar el transporte de secciones de malla lo más grandes posible y reducir y simplificar así el trabajo de ensamblaje donde deba implantarse el edificio.

El empaquetado ideal, como punto de referencia, sería el propuesto por Chen a partir del uso de enlaces sobre restringidos tipo Bricard en un módulo hexagonal. Aunque, tal y como se explica en el capítulo 2, su aplicación en la Hexagrid es irrealizable.

Se considera que si se renuncia al autobloqueo de la malla y se permite que cada barra se articule independientemente, es posible conseguir un empaquetado que se asemeje al de los propuestos con enlaces sobre restringidos.

4.3.1. El sistema de plegado

La malla se puede definir como un conjunto ordenado de nudos que se unen mediante barras que forman una superficie que se extiende en el plano x e y , con unas medidas X_1 , Y_1 y Z_0 , modulada mediante hexágonos regulares donde cada uno de sus lados tiene la misma dimensión que L .

La intención del sistema de plegado es que a través de la rotación de la articulación que conecta cada uno de los 3 brazos que componen el nudo con sus respectivas barras, la malla se transforme en un volumen con medidas X_2 , Y_2 y Z_1 . De tal forma que las medidas X_2 e Y_2 sean menores a X_1 e Y_1 tendiendo hipotéticamente a cero, mientras que Z_1 debería alcanzar una medida similar a L . Para validar el método de plegado se tiene que poder volver al estado inicial de la malla.

⁴² Para poder describir el método de plegado de la malla es importante definir lo que se considera una malla regular. En este caso se entiende como un conjunto de barras de una longitud igual y determinada que se intersecan entre ellas en sus extremos de tal manera que la apertura de los ángulos es constante, formando módulos reconocibles y que se repiten a través de la superficie en la que la malla se extiende.

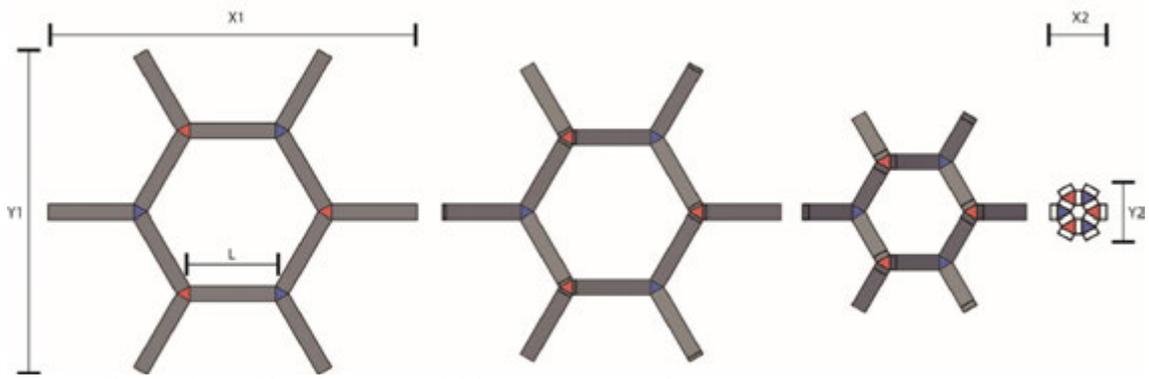


Ilustración 56: Plegado conceptual del sistema, vista en planta

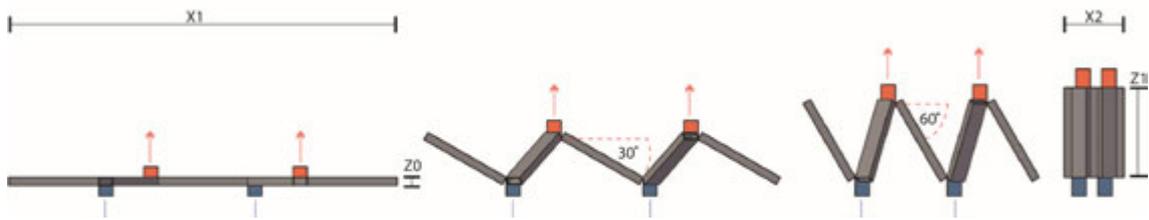


Ilustración 55: Plegado conceptual del sistema, vista en alzado

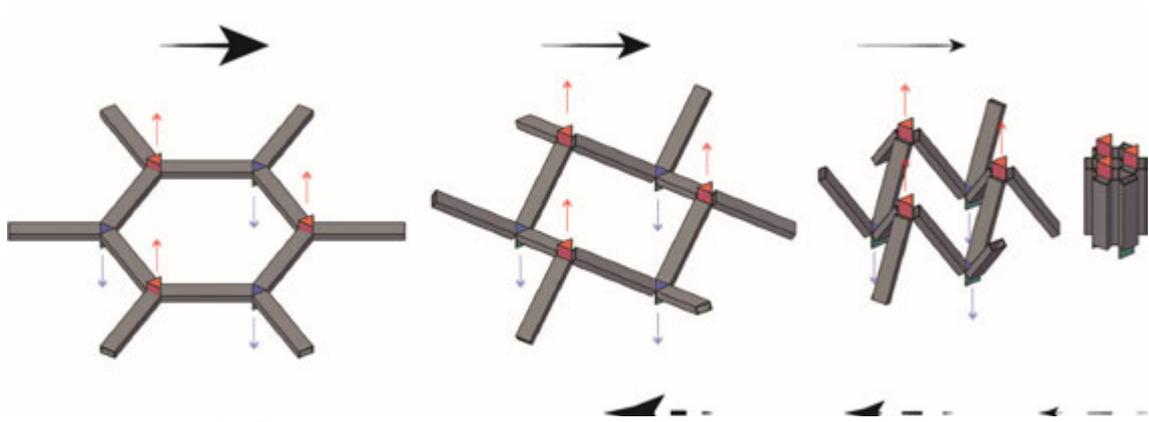


Ilustración 54: Plegado conceptual del sistema, vista en axonometría

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

4.3.2. Condiciones y limitaciones del diseño del nudo

Para cumplir con las expectativas de la dualidad Mecanismo-Estructura se requiere el diseño de un nudo híbrido que cumpla con las siguientes características:

- Mecanismos simples con métodos de fijación simples.
- Número reducido de piezas.
- Estandarizado de piezas.
- Posibilidad de replicar y adaptar el modelo a diferentes requerimientos dentro de la lógica del sistema.
- El menor peso posible.⁴³

El modelo necesariamente tendrá un giro limitado en cada articulación, de tal manera que solo podrá rotar en una dirección y de forma limitada desde la posición inicial hasta la posición final, esto equivale aproximadamente a 90 grados.

En el proceso de diseño se tiene en cuenta que el material que se utilizará será acero unido mediante soldadura y que la conexión con las barras será a través de pernos y pasadores.

4.3.3. Alcance del diseño

Para completar la construcción y ensamblado de la malla se requieren 3 tipos de nudos:

A: Nudo tipo que recibe 3 barras iguales, una por cada brazo, de tal manera que el ángulo que forma cualquiera de las barras con su adyacente es de 120 grados.

B: Nudo que conecta la estructura con la cimentación (recibe solo una barra).

C: Nudo de borde de la malla estructural que recibe 2 barras y conecta la malla con su malla adyacente para desarrollar la forma volumétrica del edificio.

El presente artículo está dedicado al desarrollo del nudo tipo A, ya que los tipos B y C pueden considerarse diseños derivados del modelo original.

⁴³ A diferencia de los sistemas de uniones utilizados en estructuras ligeras, se debe considerar que el aumento de las cargas que debe soportar la estructura va a dar como resultado un diseño con un peso y dimensiones considerables. Pese a esto, se intentará que su peso sea relativamente competitivo frente a lo que otros sistemas estructurales ofrecen para la construcción de edificaciones de características similares a las aquí estudiadas.

4.4. Metodología de diseño

En un proceso ideal y simplificado de diseño, se podría considerar que la metodología aplicada se correspondiera a 2 fases lineales y delimitadas.

Concepción de la forma: en la que se encuentra un conjunto de partes y piezas que conformaría el nudo de tal forma que el diseño permitiría que se cumplieren las condiciones y limitaciones de diseño, tanto a nivel de movimiento como de bloqueo y simpleza en el ensamblado.

Validación estructural: en esta fase se tomaría el modelo geométrico y se le otorgaría el material con sus respectivas propiedades mecánicas, se ajustaría el espesor de las placas que conforman las diferentes piezas y se realizaría el respectivo análisis estructural con el fin de verificar la validez del diseño. Todo esto para que la propuesta sea capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sometida en función de los datos extraídos del cálculo del edificio, que es lo que se tiene como referencia.

En la realidad el proceso se desarrolla de una manera bastante más caótica, con pasos intermedios y de una forma menos lineal, que lleva a que los análisis estructurales desencadenen en cambios geométricos menores que deben ser comprobados funcionalmente antes de volver al paso de validación estructural.

Para poder realizar estos procesos es necesario el uso de un software de diseño 3D y de análisis estructural mediante el método de elementos finitos, cuya interfaz acepte la introducción de elementos tridimensionales.

A continuación se ofrece una descripción más profunda de las fases de diseño.

4.4.1. Concepción de la forma

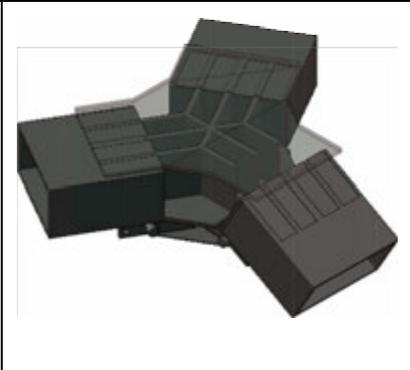
Para encontrar la configuración se utilizó la siguiente metodología:

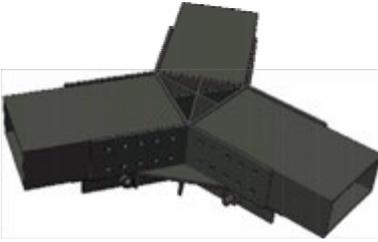
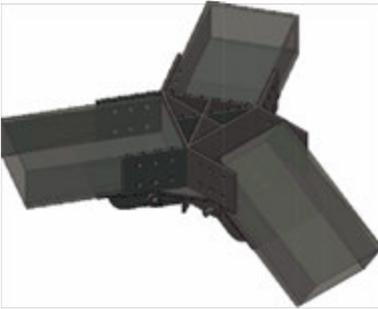
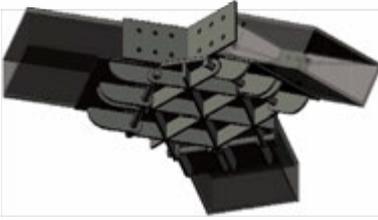
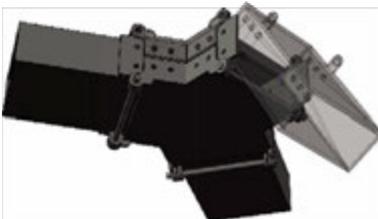
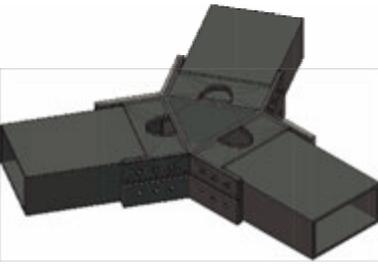
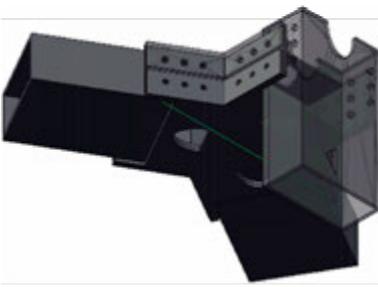
1. **Extracción** de datos geométricos de modelo previo: de la edificación a la que pertenece el nudo en el que se basa el diseño se obtienen las dimensiones y los espesores de las barras que lo conforman, además de la configuración geométrica del encuentro de las barras. Todas las barras responden al mismo perfil rectangular de 170 mm x 340mm x 12.5 mm.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

2. **Diseño** de piezas en 3D: con el uso del programa Autodesk AutoCAD se modelan nudos en diferentes configuraciones geométricas. La intención es llegar a un modelo tipo ajustable a los requerimientos del sistema. Para esto se considera que la dimensión del nudo no debe superar la circunferencia cuyo radio es equivalente a 1/5 de la longitud de las barras que comprenden la edificación.
3. **Dimensionado** de secciones: en esta parte del proceso las piezas adquieren cuerpo una vez definidos los espesores de las distintas pletinas que componen cada uno de los elementos. Este es el punto de partida para el proceso de validación estructural. Para dimensionar las piezas se considera el punto de partida el espesor de las barras que se encuentran en el nudo y se propone que los espesores deben estar en un rango de +/- 20% del espesor del perfil de la barra.
4. **Impresión** de piezas en 3D: se utilizan impresoras por adición de material plástico para desarrollar maquetas físicas que muestren a mayor detalle las características de los modelos impresos. Estas maquetas están enfocadas a mostrar el funcionamiento del conjunto y se realizan a escala 1:5.
5. **Comprobación** funcional del conjunto: con el uso de las maquetas físicas y virtuales se busca certificar el buen comportamiento de las piezas que componen el nudo, sobre todo en el proceso de plegado y desplegado de las barras, y medir el nivel potencial de dificultad que se podría encontrar en el momento de fijar las piezas en su posición final.

Tabla 23: Modelos geométricos, proceso de diseño para modelo nudo tipo A

| Modelo | Vista lateral 1 | Vista lateral 2 |
|--------------|---|--|
| Geométrico 1 |  |  |

| Modelo | Vista lateral 1 | Vista lateral 2 |
|--------------|---|--|
| Geométrico 2 |  |  |
| Geométrico 3 |  |  |
| Geométrico 4 |  |  |
| Geométrico 5 |  |  |

4.4.2. Transformación de modelo basado en sólidos a modelo de elementos finitos

El objetivo es poder transformar los resultados del proceso de búsqueda de forma a un modelo equiparable pero simplificado que pueda realizarse en el software de diseño⁴⁴ introduciéndolo en la interfaz del software de análisis estructural elegido⁴⁵. Para esto se deben tomar decisiones en función del nivel de exactitud que se necesita obtener para la validez del análisis y de la capacidad de procesamiento de información que ofrece la unión de software y hardware a disposición.

Para lograr el objetivo se decide crear un modelo tridimensional compuesto de módulos bidimensionales (superficiales). A dichos módulos se les asignará el material correspondiente con su espesor determinado. Para facilitar la aplicación de las

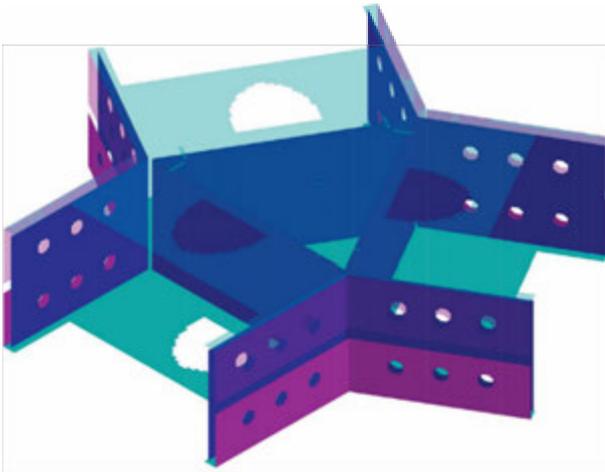


Ilustración 57: Modelo 5 tipo X

propiedades de espesor de la sección se emplean diferentes capas, que corresponde, cada una de ellas, a un espesor determinado.

A partir de estas directrices surgen 2 tipos de modelos:

Modelo tipo X: el modelo se construye siguiendo todas las superficies que corresponden al modelo geométrico. La labor de los pasadores,

que es la transmisión de cargas entre platinas que dan la integridad del comportamiento al modelo, se intenta conseguir mediante barras que unen las superficies alrededor de los orificios igualando los desplazamientos de los módulos.

⁴⁴ Autodesk AutoCAD 2017

⁴⁵ En este caso se ha elegido el software SAP2000 V.19

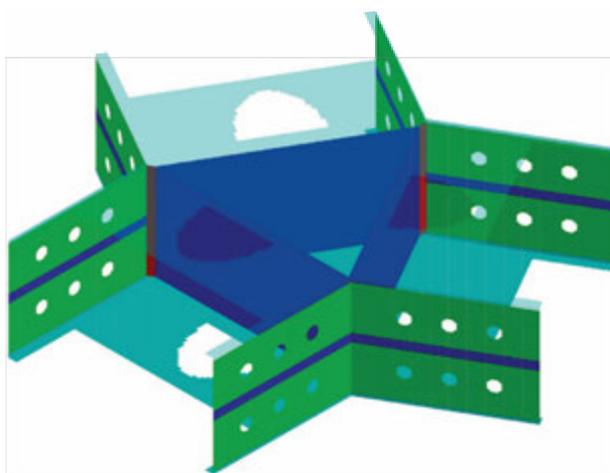


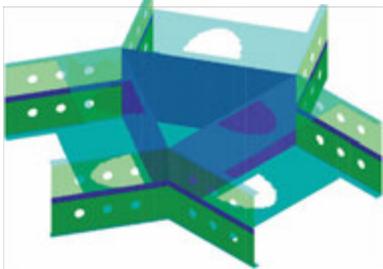
Ilustración 58: Modelo 5 tipo Y

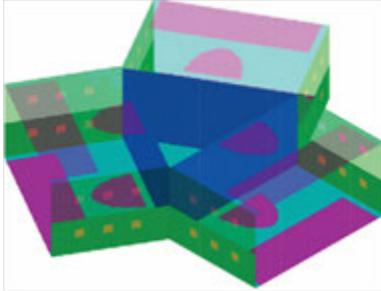
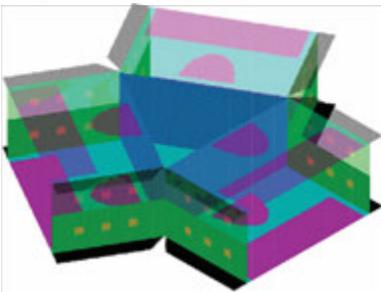
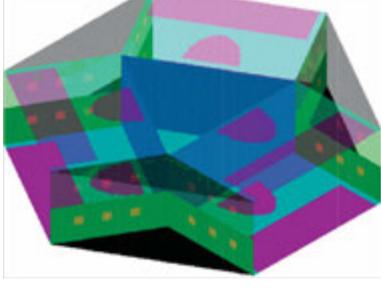
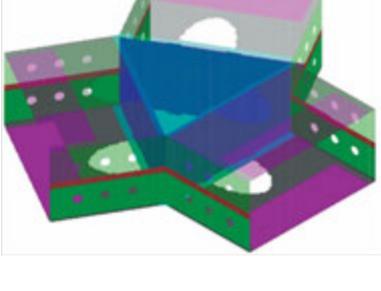
Modelo tipo Y: ante las limitaciones de reproducir la interacción entre las 2 piezas del modelo, y llegando a la conclusión de que dicha interacción puede llegar a ser un estudio para otra tesis doctoral completa, se decide que se puede simplificar el modelo tras considerarlo como un único sólido al que se unen los perfiles.

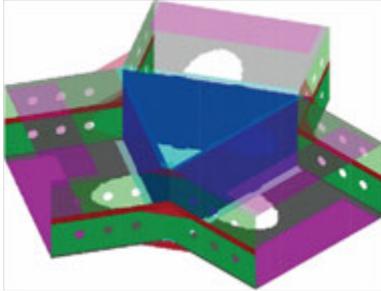
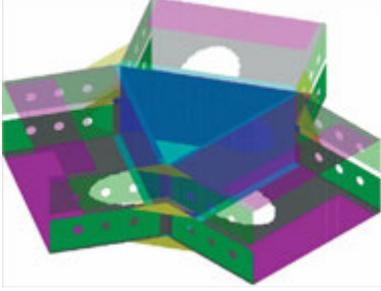
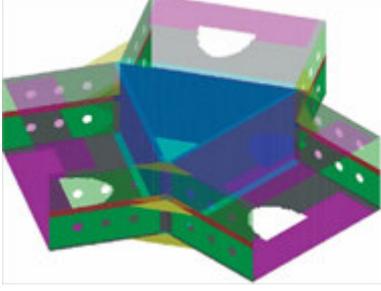
Con esto se simplifican en una sola capa las piezas que conforman el modelo y, al compartir material, el espesor de esa superficie es igual a la suma de los espesores de las 2 secciones que la conforman.

A partir de los ensayos de análisis y error y en base al modelo original tipo Y, se desarrollan un conjunto de modelos modificados hasta llegar al modelo final.

Tabla 24: Modelos de elementos finitos series 6 y 7 para modelo nudo tipo A

| Modelo | Axonometría | Comentarios de la versión |
|----------|---|---|
| Modelo 6 |  | El modelo 5Y se renombra como modelo 6. |

| Modelo | Axonometría | Comentarios de la versión |
|------------|---|---|
| Modelo 6.1 |  | <p>Se agrega al modelo módulos finitos para simular la resistencia de la barra agregada al nudo (ver color violeta). Se propone aplicar los esfuerzos dentro de las secciones amarillas.</p> |
| Modelo 6.2 |  | <p>Se agregan aletas para intentar mejorar el desempeño.</p> |
| Modelo 6.3 |  | <p>Se modifican las aletas para buscar un mejor comportamiento.</p> |
| Modelo 7.1 |  | <p>Cambia la aplicación de los esfuerzos alrededor de los agujeros, se separan los espesores de platinas del triángulo central frente a los brazos. Se vuelve a tener en cuenta la diferencia de perfiles en el punto medio de los brazos (color rojo).</p> |

| Modelo | Axonometría | Comentarios de la versión |
|------------|---|--|
| Modelo 7.2 |  | Se agregan pequeñas aletas centrales |
| Modelo 7.3 |  | Se agrega un mayor número de aletas. |
| Modelo 7.4 |  | Se modifica la dirección del orificio mayor en forma de media luna en los brazos para evitar puntos de concentración de esfuerzos. |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

4.4.3. Áreas de aplicación de las fuerzas

Las fuerzas tienen que estar lo suficientemente repartidas y aplicadas para que el modelo virtual se parezca lo máximo posible en su comportamiento al modelo real, evitando concentraciones de esfuerzos en el material que creen plastificaciones artificiales en las placas. Para conseguir esto se decide repartir los esfuerzos de cada barra entre el cordón superior y el cordón inferior de cada uno de los brazos del modelo, haciendo que las cargas puntuales se ubiquen equitativamente alrededor de las zonas de los agujeros, que es por donde se conectarían a través de pasadores las piezas del nudo con las barras.



Ilustración 60: Ubicación de fuerzas en nudo tipo

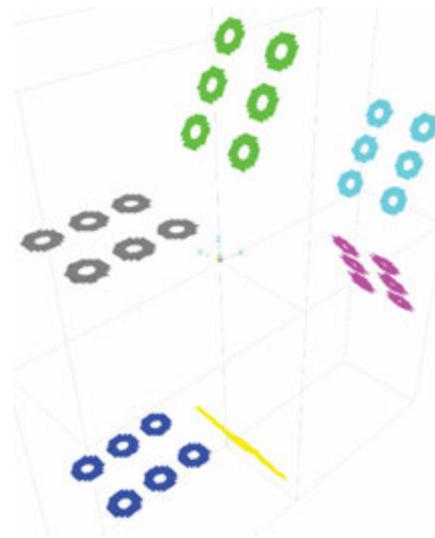


Ilustración 59: Esquema de colores de agrupación de fuerzas

En cada uno de los brazos al cordón superior se le denomina A y al inferior B.

Tabla 25: Esquema de agrupación de fuerzas en barra representados en color

| Barra | Cordón | Color |
|-------|--------|----------|
| 11 | A | Lila |
| | B | Amarillo |
| 12 | A | Gris |
| | B | Azul |
| 17 | A | Verde |
| | B | Celeste |

4.4.4. Obtención de las fuerzas

Para obtener las fuerzas que se van a aplicar al modelo tipo se debe seguir un procedimiento, que es el que se describe a continuación.

4.4.4.1. Obtención de datos de estados de carga

De todos los modelos de carga analizados con la normativa Eurocódigo 3-2005 para el modelo propuesto tipo C de 15 pisos, se seleccionan los siguientes: UDSTL2, UDSTL3, UDSTL4, UDSTL5, UDSTL6, UDSTL7, UDSTL8, UDSTL9, UDSTL10.

Tabla 26: Modelos de carga, combinaciones seleccionadas para modelo nudo tipo A

| TABLE: Combination Definitions | | | |
|---------------------------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Combo Name | Case Type | Case Name | Scale Factor |
| Text | Text | Text | Unitless |
| UDSTL10 | Linear Static | WIND_Y | -1,5 |
| UDSTL10 | Linear Static | LIVE | 1,05 |
| UDSTL10 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL2 | Linear Static | LIVE | 1,5 |
| UDSTL2 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL3 | Linear Static | WIND_X | 0,9 |
| UDSTL3 | Linear Static | LIVE | 1,5 |
| UDSTL3 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL4 | Linear Static | WIND_X | -0,9 |
| UDSTL4 | Linear Static | LIVE | 1,5 |
| UDSTL4 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL5 | Linear Static | WIND_Y | 0,9 |
| UDSTL5 | Linear Static | LIVE | 1,5 |
| UDSTL5 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL6 | Linear Static | WIND_Y | -0,9 |
| UDSTL6 | Linear Static | LIVE | 1,5 |
| UDSTL6 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL7 | Linear Static | LIVE | 1,05 |
| UDSTL7 | Linear Static | WIND_X | 1,5 |
| UDSTL7 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL8 | Linear Static | WIND_X | -1,5 |
| UDSTL8 | Linear Static | LIVE | 1,05 |
| UDSTL8 | Linear Static | DEAD | 1,35 |
| UDSTL9 | Linear Static | LIVE | 1,05 |
| UDSTL9 | Linear Static | WIND_Y | 1,5 |
| UDSTL9 | Linear Static | DEAD | 1,35 |

Una vez seleccionados los estados de carga que se pretenden aplicar al análisis, se extraen los esfuerzos a los que están sometidas las barras 11, 12 y 17 en el nudo 14.

Tabla 27: Esfuerzos resistidos en nudo para modelo nudo tipo A del modelo propuesto tipo C de 15 pisos

| Frame | Joint | OutputCase | F1 | F2 | F3 | M1 | M2 | M3 |
|-------|-------|------------|----------|--------|----------|--------|---------|-------|
| Text | Text | Text | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 1236,89 | -18,04 | -2405,28 | -1,88 | 133,40 | -8,15 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -2510,33 | 0,34 | -13,39 | -0,28 | -16,19 | -0,22 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | 1273,44 | 17,70 | 2418,67 | 2,16 | -117,21 | 8,37 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 955,14 | -10,71 | -1824,85 | -6,90 | 86,43 | -5,03 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -1910,71 | 0,14 | 0,80 | -0,11 | -0,34 | 0,22 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | 955,58 | 10,57 | 1824,05 | 7,01 | -86,09 | 4,81 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 1125,05 | -9,86 | -2062,61 | -6,31 | 66,34 | -4,42 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | -2086,89 | 0,43 | 95,97 | -0,35 | 95,49 | -0,07 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | 961,84 | 9,43 | 1966,65 | 6,67 | -161,83 | 4,49 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 785,23 | -11,56 | -1587,08 | -7,49 | 106,52 | -5,65 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -1734,54 | -0,15 | -94,37 | 0,13 | -96,18 | 0,52 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | 949,31 | 11,71 | 1681,45 | 7,36 | -10,34 | 5,13 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 753,32 | -5,78 | -1414,25 | -9,58 | 55,44 | -2,92 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | -1485,50 | 0,00 | 9,24 | 0,00 | 9,10 | 0,49 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | 732,18 | 5,78 | 1405,01 | 9,58 | -64,54 | 2,43 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 1156,95 | -15,64 | -2235,44 | -4,22 | 117,43 | -7,15 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -2335,93 | 0,27 | -7,64 | -0,22 | -9,79 | -0,04 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | 1178,97 | 15,37 | 2243,08 | 4,45 | -107,64 | 7,19 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 1183,72 | -8,41 | -2117,24 | -5,36 | 48,26 | -3,60 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | -2095,27 | 0,60 | 159,30 | -0,50 | 159,27 | -0,28 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | 911,55 | 7,81 | 1957,94 | 5,85 | -207,53 | 3,88 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 617,36 | -11,25 | -1324,68 | -7,31 | 115,23 | -5,65 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -1508,01 | -0,37 | -157,93 | 0,30 | -160,17 | 0,71 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 890,66 | 11,62 | 1482,61 | 7,01 | 44,95 | 4,94 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 564,18 | -1,62 | -1036,64 | -10,80 | 30,09 | -1,10 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | -1092,95 | -0,11 | 14,75 | 0,09 | 15,28 | 0,65 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | 528,77 | 1,73 | 1021,89 | 10,71 | -45,37 | 0,45 |

4.4.4.2. Transformación de los esfuerzos en cargas puntuales aplicables

Para poder aplicar en el modelo del nudo los esfuerzos que se extraen del modelo de la edificación es necesario transformar los esfuerzos resistidos F1, F2, F3, M1, M2, M3 en fuerzas puntuales aplicables. Para lograr este objetivo se sigue el proceso que se detalla a continuación.

Las fuerzas aplicables puntuales ($F(A)_{Apl,punt}$, $F(B)_{Apl,punt}$) son el resultado de dividir las fuerzas aplicables ($F(A)_{Apl}$, $F(B)_{Apl}$) entre el número de puntos a los que se les va a aplicar la fuerza.

$$F(A)_{Apl,punt} = \frac{F(A)_{Apl}}{n(A)_{puntos}} \quad F(B)_{Apl,punt} = \frac{F(B)_{Apl}}{n(B)_{puntos}}$$

Tabla 28: Fuerzas aplicables puntuales al modelo de nudo tipo A del modelo propuesto tipo C de 15 pisos

| Frame | Joint | OutputCase | F(A)Apl, punt (384 puntos) kN | | | F(B)Apl, punt (384 puntos) kN | | |
|-------|-------|------------|----------------------------------|--------|--------|----------------------------------|--------|--------|
| | | | F1A | F2A | F3A | F1B | F2B | F3B |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 1,978 | -0,055 | -2,495 | 1,978 | -0,082 | -2,495 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -3,269 | 0,001 | 0,072 | -3,269 | -0,003 | 0,072 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | 1,981 | 0,053 | 2,59 | 1,981 | 0,085 | 2,59 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 1,482 | 0,009 | -1,964 | 1,482 | -0,092 | -1,964 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -2,488 | 0,002 | 0,003 | -2,488 | 0,001 | 0,003 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | 1,481 | -0,011 | 1,964 | 1,481 | 0,092 | 1,964 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 1,648 | 0,009 | -2,369 | 1,648 | -0,084 | -2,369 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | -2,717 | 0,003 | -0,401 | -2,717 | -0,002 | -0,401 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | 1,698 | -0,012 | 1,788 | 1,698 | 0,086 | 1,788 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 1,316 | 0,009 | -1,558 | 1,316 | -0,101 | -1,558 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -2,259 | 0,002 | 0,407 | -2,259 | 0,004 | 0,407 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | 1,265 | -0,011 | 2,14 | 1,265 | 0,098 | 2,14 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 1,134 | 0,047 | -1,577 | 1,134 | -0,094 | -1,577 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | -1,934 | 0,003 | -0,038 | -1,934 | 0,003 | -0,038 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | 1,131 | -0,05 | 1,521 | 1,131 | 0,091 | 1,521 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 1,83 | -0,029 | -2,35 | 1,83 | -0,091 | -2,35 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -3,042 | 0,002 | 0,044 | -3,042 | -0,001 | 0,044 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | 1,832 | 0,027 | 2,407 | 1,832 | 0,092 | 2,407 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 1,674 | 0,009 | -2,526 | 1,674 | -0,07 | -2,526 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | -2,728 | 0,003 | -0,67 | -2,728 | -0,004 | -0,67 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | 1,759 | -0,011 | 1,559 | 1,759 | 0,075 | 1,559 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 1,121 | 0,008 | -1,175 | 1,121 | -0,1 | -1,175 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -1,964 | 0,001 | 0,677 | -1,964 | 0,006 | 0,677 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 1,036 | -0,009 | 2,145 | 1,036 | 0,094 | 2,145 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 0,818 | 0,071 | -1,206 | 0,818 | -0,088 | -1,206 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | -1,423 | 0,003 | -0,065 | -1,423 | 0,004 | -0,065 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | 0,814 | -0,074 | 1,114 | 0,814 | 0,084 | 1,114 |

Las fuerzas aplicables ($F(A)_{Apl}$, $F(B)_{Apl}$) son una composición de la semisuma de las fuerzas que se van a aplicar en las 3 direcciones.

$$F(A)_{Apl} = F1_A; F2_A; F3_A$$

$$F(A)_{Apl} = \frac{1}{2}(F1 + FM2_x); \frac{1}{2}(F2 - FM1_y + FM3_y); \frac{1}{2}(F3 + FM2_z)$$

$$F(B)_{Apl} = F1_B; F2_B; F3_B$$

$$F(B)_{Apl} = \frac{1}{2}(F1 + FM2_x); \frac{1}{2}(F2 + FM1_y + FM3_y); \frac{1}{2}(F3 + FM2_z)$$

Tabla 29: Fuerzas aplicadas al modelo de nudo tipo A

| Frame | Joint | OutputCase | F(A)Apl. | | | F(B)Apl. | | |
|-------|-------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|---------|
| Text | Text | Text | F1A | F2A | F3A | F1B | F2B | F3B |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 759,61 | -20,97 | -958,13 | 759,61 | -31,57 | -958,13 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -1255,16 | 0,50 | 27,57 | -1255,16 | -1,10 | 27,57 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | 760,75 | 20,47 | 994,50 | 760,75 | 32,67 | 994,50 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 569,03 | 3,49 | -754,01 | 569,03 | -35,50 | -754,01 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -955,36 | 0,86 | 1,13 | -955,36 | 0,23 | 1,13 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | 568,89 | -4,34 | 754,24 | 568,89 | 35,28 | 754,24 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 632,73 | 3,55 | -909,71 | 632,73 | -32,12 | -909,71 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | -1043,44 | 1,05 | -154,11 | -1043,44 | -0,94 | -154,11 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | 652,17 | -4,61 | 686,71 | 652,17 | 33,05 | 686,71 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 505,33 | 3,42 | -598,30 | 505,33 | -38,89 | -598,30 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -867,27 | 0,67 | 156,36 | -867,27 | 1,39 | 156,36 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | 485,60 | -4,08 | 821,76 | 485,60 | 37,50 | 821,76 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 435,32 | 17,99 | -605,52 | 435,32 | -36,12 | -605,52 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | -742,75 | 1,03 | -14,64 | -742,75 | 1,03 | -14,64 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | 434,38 | -19,01 | 584,22 | 434,38 | 35,10 | 584,22 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 702,74 | -11,01 | -902,49 | 702,74 | -34,88 | -902,49 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -1167,96 | 0,69 | 16,89 | -1167,96 | -0,58 | 16,89 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | 703,39 | 10,32 | 924,25 | 703,39 | 35,46 | 924,25 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 642,93 | 3,31 | -970,16 | 642,93 | -26,96 | -970,16 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | -1047,63 | 1,10 | -257,43 | -1047,63 | -1,70 | -257,43 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | 675,38 | -4,41 | 598,60 | 675,38 | 28,66 | 598,60 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 430,61 | 3,08 | -451,14 | 430,61 | -38,25 | -451,14 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -754,01 | 0,46 | 260,03 | -754,01 | 2,17 | 260,03 |

| Frame | Joint | OutputCase | F(A)Apl. | | | F(B)Apl. | | |
|-------|-------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|---------|
| Text | Text | Text | F1A | F2A | F3A | F1B | F2B | F3B |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 397,77 | -3,54 | 823,69 | 397,77 | 36,08 | 823,69 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 313,93 | 27,36 | -463,17 | 313,93 | -33,64 | -463,17 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | -546,48 | 1,06 | -24,97 | -546,48 | 1,57 | -24,97 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | 312,40 | -28,42 | 427,78 | 312,40 | 32,07 | 427,78 |

Las fuerzas $FM1_y$, $FM2_x$, $FM2_z$ y $FM3$ son las fuerzas equivalentes aplicadas al nudo para reproducir los esfuerzos ejercidos por los momentos $M1$, $M2$ y $M3$, donde el subíndice muestra la dirección en la que se aplican las fuerzas. Se obtienen de la siguiente manera:

$$FM1_y = \frac{M1}{dist_{p_{ext.}}}; FM2 = \frac{M2}{dist_{p_{med.}}}; FM3_y = \frac{M3}{dist_{p_{med.}}}$$

Dist_{Pext.} corresponde a la distancia en el eje global z entre la fibra neutra de los brazos del nudo y el punto medio de la sección que comprende las piezas del nudo con la barra. Mientras que **dist_{Pmed.}** corresponde a la distancia en el eje local x de cada barra desde el centro de gravedad de la pieza hasta el punto medio de la zona de aplicación de las fuerzas, que en estos casos coincide con la columna de agujeros medios.

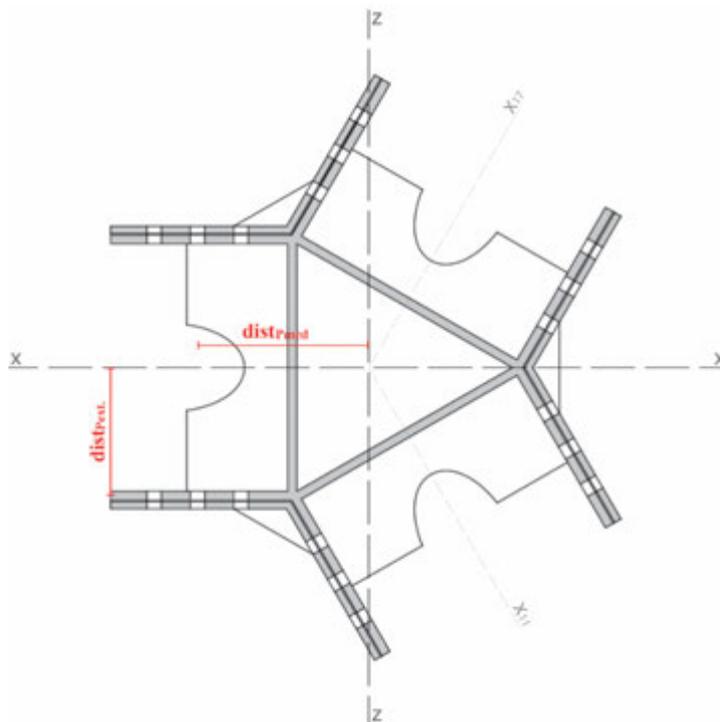


Ilustración 61: Sección ilustrativa del nudo tipo A

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Tabla 30: $dist_{P_{ext}}$ y $dist_{P_{med}}$.

| Distancias para FM1, FM2, FM3 | |
|-------------------------------|--------|
| $dist_{P_{ext}}$ (mm) | 177 |
| $dist_{P_{med}}$ (mm) | 236,25 |

Tabla 31: Fuerzas equivalentes a Momentos $M1$, $M2$ y $M3$ en el nudo tipo

| Frame | Joint | OutputCase | FM1y | FM2 | FM3y |
|-------|-------|------------|--------|---------|--------|
| Text | Text | Text | KN | KN | KN |
| 11 | 14 | UDSTL10 | -10,60 | 564,67 | -34,50 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -1,60 | -68,53 | -0,94 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | 12,20 | -496,14 | 35,44 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | -38,99 | 365,85 | -21,31 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -0,63 | -1,45 | 0,95 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | 39,62 | -364,39 | 20,36 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | -35,67 | 280,81 | -18,70 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | -1,99 | 404,19 | -0,31 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | 37,66 | -685,00 | 19,01 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | -42,31 | 450,88 | -23,91 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | 0,72 | -407,09 | 2,21 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | 41,58 | -43,79 | 21,70 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | -54,11 | 234,65 | -12,35 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | 0,00 | 38,51 | 2,05 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | 54,11 | -273,16 | 10,30 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | -23,87 | 497,04 | -30,26 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -1,27 | -41,42 | -0,15 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | 25,14 | -455,62 | 30,42 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | -30,27 | 204,29 | -15,24 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | -2,80 | 674,15 | -1,20 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | 33,07 | -878,44 | 16,44 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | -41,32 | 487,73 | -23,92 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | 1,71 | -677,98 | 3,00 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 39,62 | 190,25 | 20,92 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | -61,00 | 127,35 | -4,66 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | 0,51 | 64,69 | 2,74 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | 60,49 | -192,05 | 1,92 |

Las fuerzas FM2 no se encuentran alineadas con ninguno de los 3 ejes principales. Aunque se encuentran dentro del cuadrante comprendido por los ejes x y z, es necesario

descomponer la fuerza en sus componentes teniendo en cuenta no solo la dirección de las fuerzas, sino también su signo.

$$FM2_x = FM2(a_{n.barra})$$

$$FM2_z = FM2(b_{n.barra})$$

Tabla 32: Descomposición de FM2 en sus vectores x y z

| Frame | Joint | OutputCase | | | |
|-------|-------|------------|---------|--------|---------|
| Text | Text | Text | FM2 | FM2x | FM2z |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 564,67 | 282,34 | 489,02 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -68,53 | 0,00 | 68,53 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | -496,14 | 248,07 | -429,67 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 365,85 | 182,92 | 316,83 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -1,45 | 0,00 | 1,45 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | -364,39 | 182,20 | -315,57 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 280,81 | 140,41 | 243,19 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | 404,19 | 0,00 | -404,19 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | -685,00 | 342,50 | -593,23 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 450,88 | 225,44 | 390,47 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -407,09 | 0,00 | 407,09 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | -43,79 | 21,89 | -37,92 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 234,65 | 117,33 | 203,21 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | 38,51 | 0,00 | -38,51 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | -273,16 | 136,58 | -236,57 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 497,04 | 248,52 | 430,45 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -41,42 | 0,00 | 41,42 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | -455,62 | 227,81 | -394,58 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 204,29 | 102,14 | 176,92 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | 674,15 | 0,00 | -674,15 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | -878,44 | 439,22 | -760,75 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 487,73 | 243,87 | 422,39 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -677,98 | 0,00 | 677,98 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 190,25 | -95,13 | 164,76 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 127,35 | 63,68 | 110,29 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | 64,69 | 0,00 | -64,69 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | -192,05 | 96,02 | -166,32 |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Los coeficientes $a_{n.barra}$ y $b_{n.barra}$ se obtienen mediante operaciones trigonométricas cuando se conoce que la dirección de la fuerza es perpendicular a la inclinación de la barra y que el sentido será aquel que permita que el giro del momento sea positivo.

Tabla 33: Coeficientes $a_{n.barra}$ y $b_{n.barra}$

| Coeficientes de cálculo para $FM2_x$ y $FM2_y$ | | | |
|--|------|------------|--|
| Barra número | a | b | |
| 11 | 0,5 | $\sqrt{3}$ | |
| 12 | 0 | -1 | |
| 17 | -0,5 | $\sqrt{3}$ | |

4.4.5. Propiedades mecánicas del modelo tipo A

Al modelo se le aplica el mismo material, acero S355, que se aplicó a las barras del modelo virtual del edificio. Debido a que el espesor de las platinas varía en las diferentes partes del modelo, y agregando que hay que tener en cuenta la simplificación que se hizo en el modelo virtual cogiendo la pieza como un solo sólido, se desarrolló un sistema de agrupación de elementos finitos que comparten la sección de material.

Tabla 34: Grupos distribución de espesor en secciones de elementos finitos

| Aplicaciones de espesor en elementos finitos | | | | | |
|--|----------|--------------|---------|---------|-------|
| Grupo | Color | Espesor (mm) | | | |
| | | Barra | Pieza A | Pieza B | Total |
| 1 | Rojo | 12,5 | 12,5 | | 25,0 |
| 2 | Amarillo | | | 8,0 | 8,0 |
| 3 | Verde | 12,5 | 12,5 | 10,0 | 35,0 |
| 4 | Celeste | | | 10,0 | 10,0 |
| 5 | Azul | | | | 0,0 |
| 6 | Lila | 12,5 | | | 12,5 |
| 7 | Gris | 12,5 | | 10,0 | 22,5 |

4.4.6. Análisis de resultados del modelo tipo A

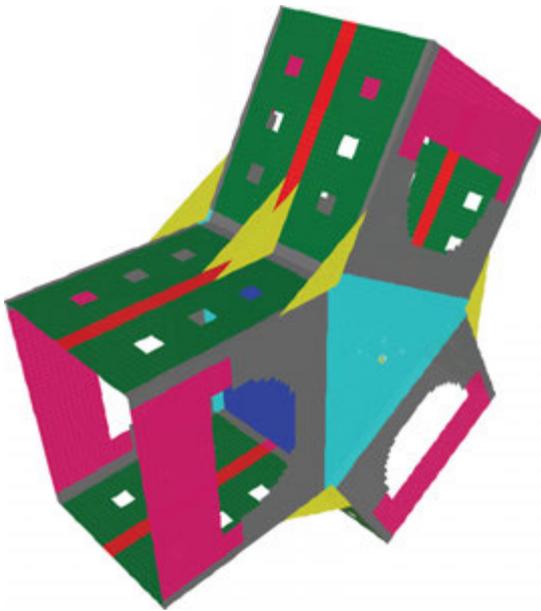


Ilustración 63: Agrupación de módulos finitos por colores para aplicación de espesores de sección



Ilustración 62: Espesores de sección aplicados

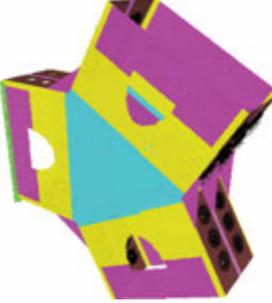
El modelo se analiza con el software Sap2000 V. 20. Se realiza un cálculo lineal estático para cada uno de los casos de cargas previamente aplicados. Los parámetros analizados son: tensiones máximas absolutas de Von Mises y deformaciones.

4.4.6.1. Tensiones de Von Mises

Analizando las tensiones máximas absolutas de Von Mises se quieren encontrar zonas donde potencialmente se concentren esfuerzos que pongan en riesgo la estabilidad de las piezas, y hacer las respectivas modificaciones geométricas para remediarlo. Para poder analizar las tensiones de Von Mises se utilizan 3 modelos en los que las fuerzas están aplicadas a 2 brazos y los apoyos empotrados en el extremo del brazo restante. Con esto lo que se busca es enfocar el análisis en la intersección de las barras que están sometidas a carga.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Tabla 35: Modelos de nudo tipo A utilizados en el análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises

| | | |
|------------------------|---|--|
| Modelo 7.4 / 11 |  | Fuerzas aplicadas en 17A y 17B 12A y 12B |
| Modelo 7.4 / 12 |  | Fuerzas aplicadas en 11A y 11B 17A y 17B |
| Modelo 7.4 / 17 |  | Fuerzas aplicadas en 11A y 11B 12A y 12B |

Conociendo que el límite de elasticidad nominal (f_y) del acero S355 es igual a 355 n/mm^2 , se considera que el análisis de las tensiones máximas absolutas de Von Mises se puede hacer gráficamente con un rango entre 100 n/mm^2 y 355 n/mm^2 .

Tabla 36: Análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises en nudo tipo A modelo 7,4 / 11

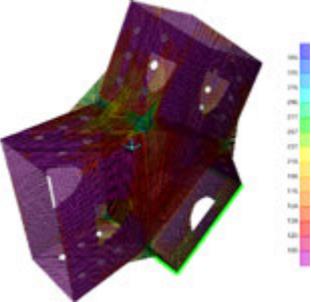
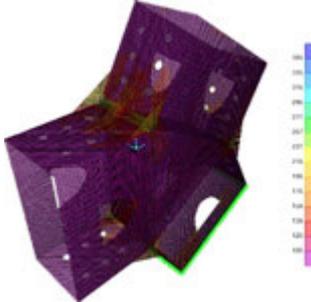
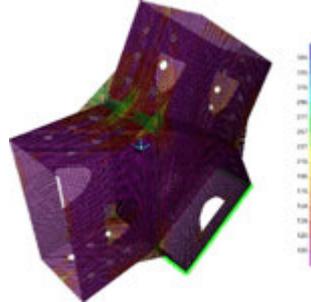
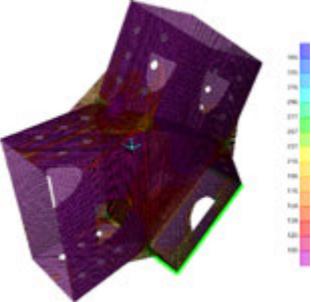
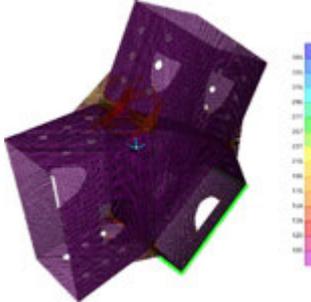
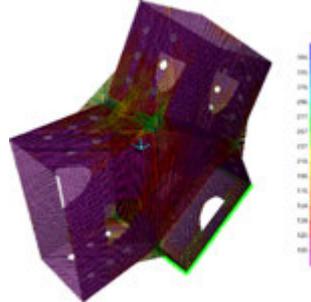
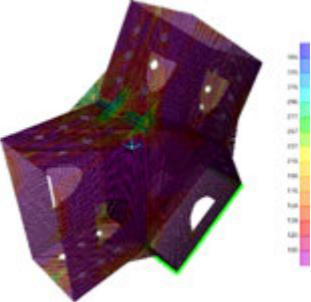
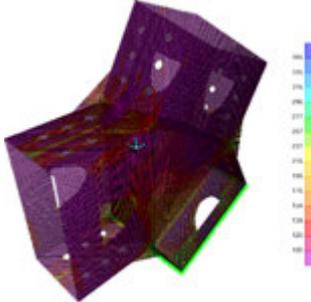
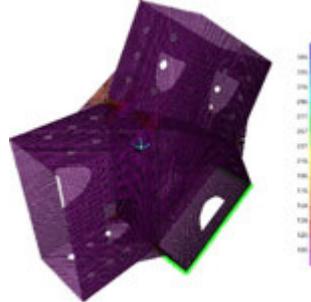
| Modelo 11 | | |
|---|---|---|
| UDSTL10 | UDSTL2 | UDSTL3 |
|  |  |  |
| UDSTL4 | UDSTL5 | UDSTL6 |
|  |  |  |
| UDSTL7 | UDSTL8 | UDSTL9 |
|  |  |  |

Tabla 37: Análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises en nudo tipo A modelo 4.7 / 12

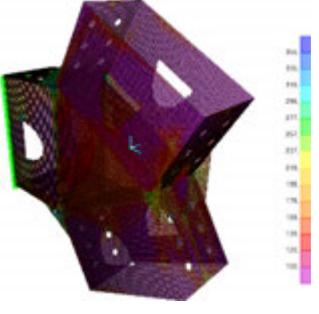
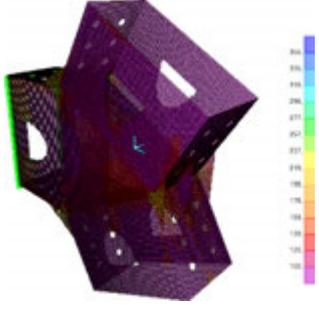
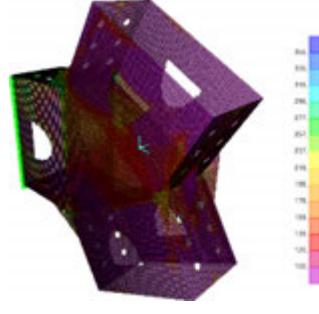
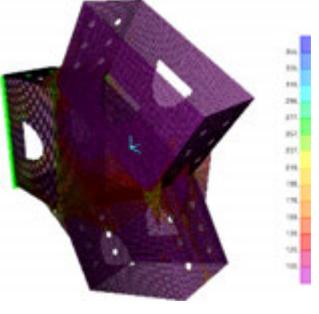
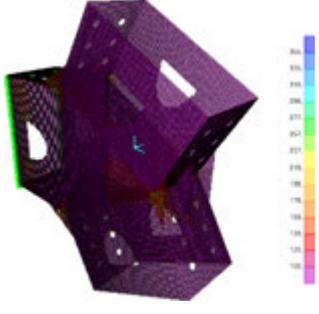
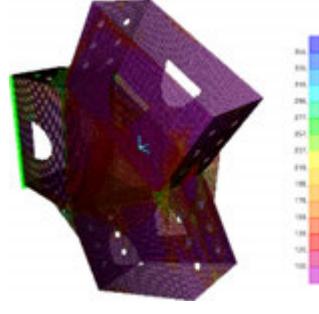
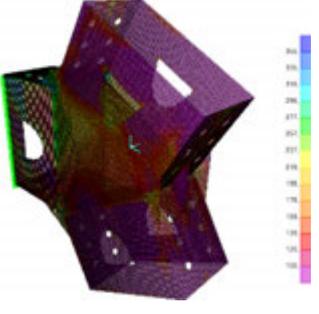
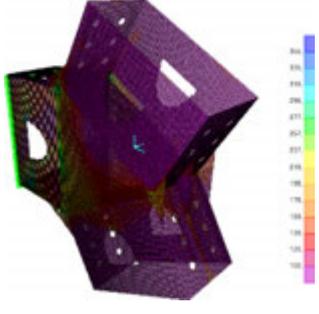
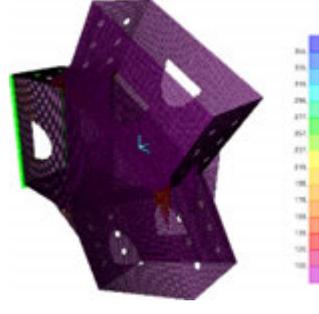
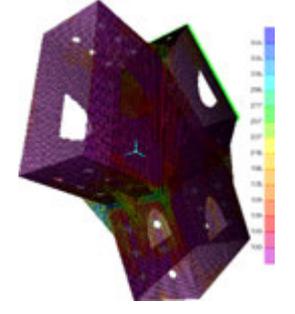
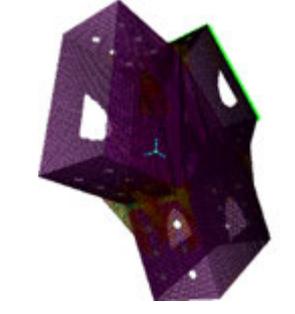
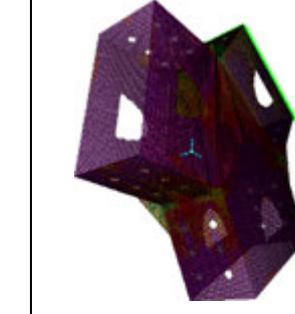
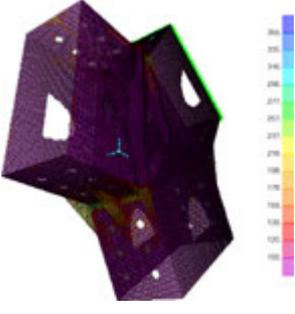
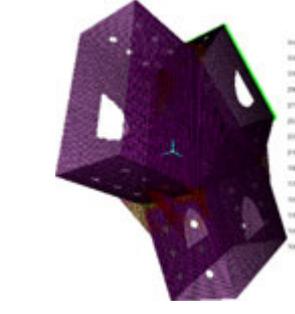
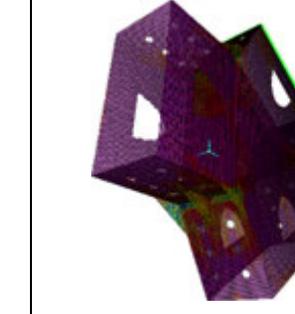
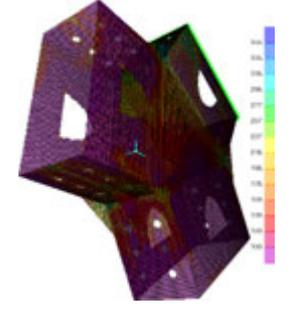
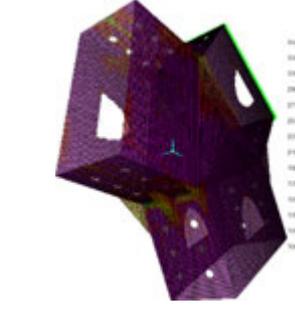
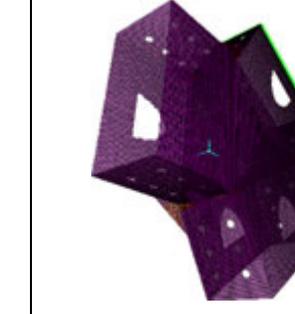
| Modelo 12 | | |
|---|---|---|
| UDSTL10 | UDSTL2 | UDSTL3 |
|  |  |  |
| UDSTL4 | UDSTL5 | UDSTL6 |
|  |  |  |
| UDSTL7 | UDSTL8 | UDSTL9 |
|  |  |  |

Tabla 38: Análisis de tensiones máximas absolutas de Von Mises en nudo tipo A modelo 7.4 / 17

| Modelo 17 | | |
|---|---|--|
| UDSTL10 | UDSTL2 | UDSTL3 |
|  |  |  |
| UDSTL4 | UDSTL5 | UDSTL6 |
|  |  |  |
| UDSTL7 | UDSTL8 | UDSTL9 |
|  |  |  |

4.4.6.2. Deformaciones

El análisis de deformaciones busca verificar que el desplazamiento de los brazos del nudo no condicione el buen funcionamiento de la estructura general a la que pertenecen.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Para poder analizar la deformación se utilizan 3 modelos con fuerzas aplicadas a un solo brazo y con apoyos empotrados en los extremos de los brazos restantes.

Tabla 39: Modelos de nudo tipo A utilizados en el análisis de deformaciones

| | | |
|---------------------------|---|-----------------------------------|
| Modelo 7.4 / 11-12 |  | Fuerzas aplicadas en 17A y 17B |
| Modelo 7.4 / 11-17 |  | Fuerzas aplicadas en 12A y 12B |
| Modelo 7.4 / 12-17 |  | Fuerzas aplicadas en 11A y 11B |

Tabla 40: Deformación máxima nudo tipo A modelo 7.4 / 11-12

| Deformación máxima en mm | | | | |
|--------------------------|------------------------|------------|------------|---------------------|
| Modelo: | 11 12 (Barra libre 17) | | | |
| Caso | Def. máx X | Def. máx Y | Def. máx Z | Def. máx resultante |
| UDSTL10 | 0,436 | 0,174 | 0,347 | 0,584 |
| UDSTL2 | 0,322 | 0,141 | 0,257 | 0,436 |
| UDSTL3 | 0,441 | 0,174 | 0,249 | 0,535 |
| UDSTL4 | 0,209 | 0,115 | 0,292 | 0,377 |

| Deformación máxima en mm | | | | |
|--------------------------|------------------------|-------|-------|-------|
| Modelo: | 11 12 (Barra libre 17) | | | |
| UDSTL5 | 0,244 | 0,119 | 0,197 | 0,366 |
| UDSTL6 | 0,401 | 0,164 | 0,32 | 0,539 |
| UDSTL7 | 0,502 | 0,186 | 0,234 | 0,584 |
| UDSTL8 | 0,174 | 0,119 | 0,329 | 0,391 |
| UDSTL9 | 0,175 | 0,097 | 0,149 | 0,249 |

Tabla 41: Deformación máxima nudo tipo A modelo 7.4 / 11-17

| Deformación máxima en mm | | | | |
|--------------------------|------------------------|------------|------------|---------------------|
| Modelo: | 11 17 (Barra libre 12) | | | |
| Caso | Def. máx X | Def. máx Y | Def. máx Z | Def. máx resultante |
| UDSTL10 | -0,416 | 0,103 | 0,108 | 0,442 |
| UDSTL2 | -0,315 | 0,079 | 0,075 | 0,333 |
| UDSTL3 | -0,359 | -0,094 | -0,241 | 0,443 |
| UDSTL4 | -0,302 | 0,087 | 0,236 | 0,393 |
| UDSTL5 | -0,246 | 0,062 | -0,064 | 0,262 |
| UDSTL6 | -0,386 | 0,096 | 0,097 | 0,410 |
| UDSTL7 | -0,372 | -0,120 | -0,373 | 0,540 |
| UDSTL8 | -0,276 | 0,107 | 0,363 | 0,468 |
| UDSTL9 | -0,183 | 0,046 | -0,056 | 0,196 |

Tabla 42: Deformación máxima nudo tipo A modelo 7.4 / 12-17

| Deformación máxima en mm | | | | |
|--------------------------|------------------------|------------|------------|---------------------|
| Modelo: | 12 17 (Barra libre 11) | | | |
| Caso | Def. máx X | Def. máx Y | Def. máx Z | Def. máx resultante |
| UDSTL10 | 0,449 | -0,165 | -0,341 | 0,588 |
| UDSTL2 | 0,323 | -0,132 | -0,267 | 0,439 |
| UDSTL3 | 0,331 | -0,117 | -0,315 | 0,471 |
| UDSTL4 | 0,316 | -0,148 | -0,220 | 0,412 |
| UDSTL5 | 0,238 | -0,117 | -0,214 | 0,341 |
| UDSTL6 | 0,410 | -0,149 | -0,321 | 0,541 |
| UDSTL7 | 0,318 | -0,111 | -0,331 | 0,472 |
| UDSTL8 | 0,292 | -0,151 | -0,174 | 0,372 |
| UDSTL9 | 0,166 | -0,098 | -0,164 | 0,253 |

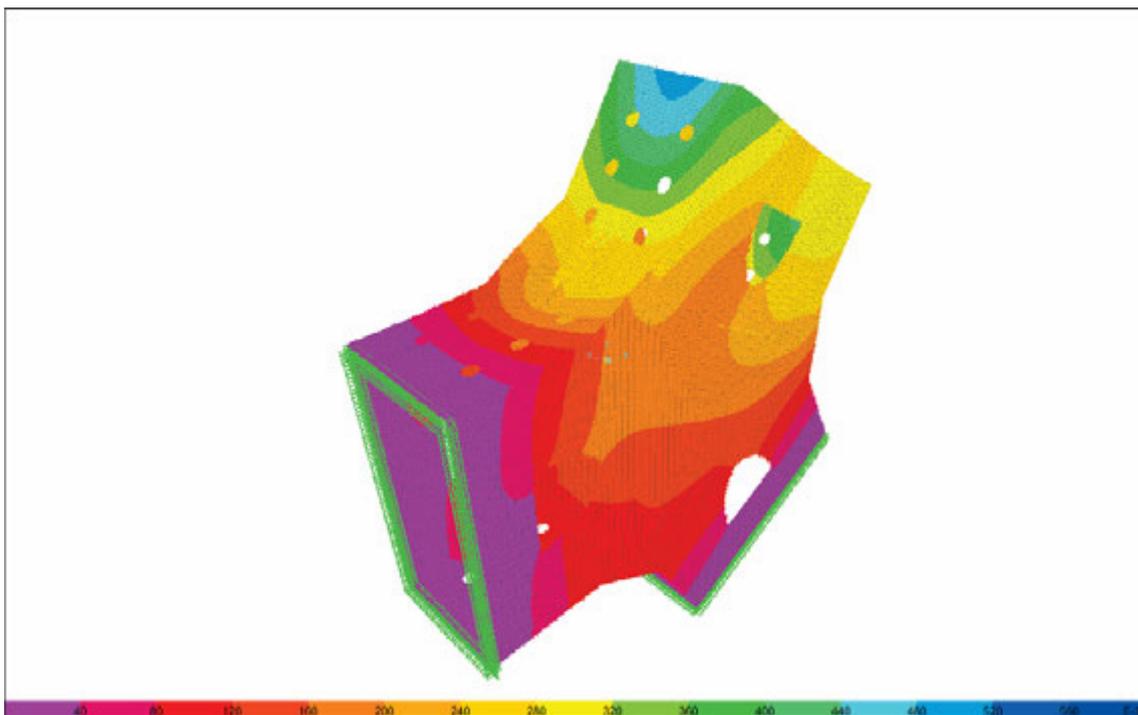


Ilustración 64: Deformación máxima resultante UDSTL7 modelo 7.4 / 11-12

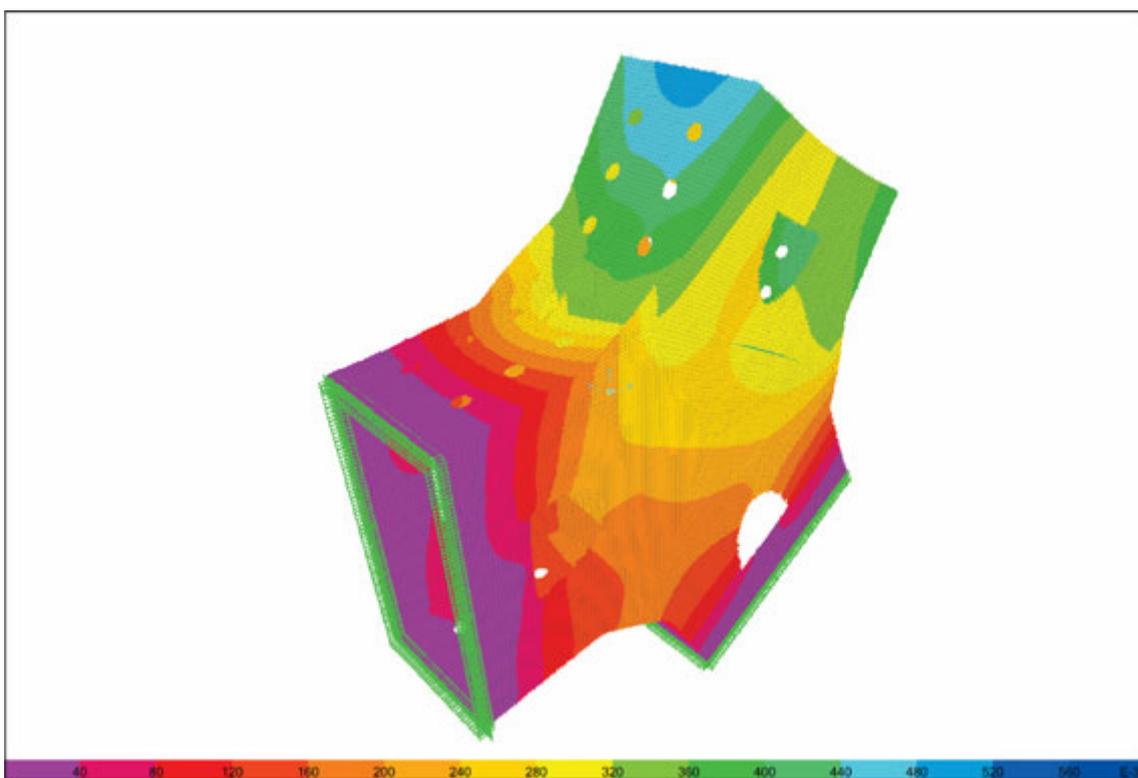


Ilustración 65: Deformación máxima resultante UDSTL10 modelo 7.4 / 11-12

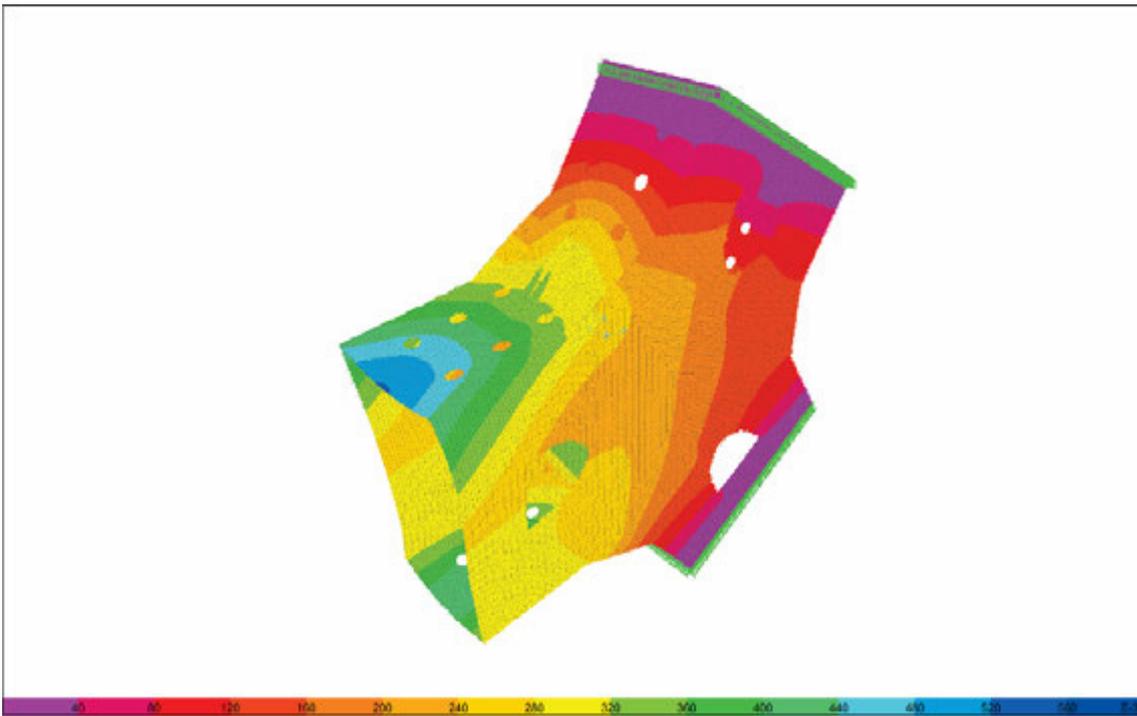


Ilustración 66: Deformación máxima resultante UDSTL7 modelo 7.4 / 11-17

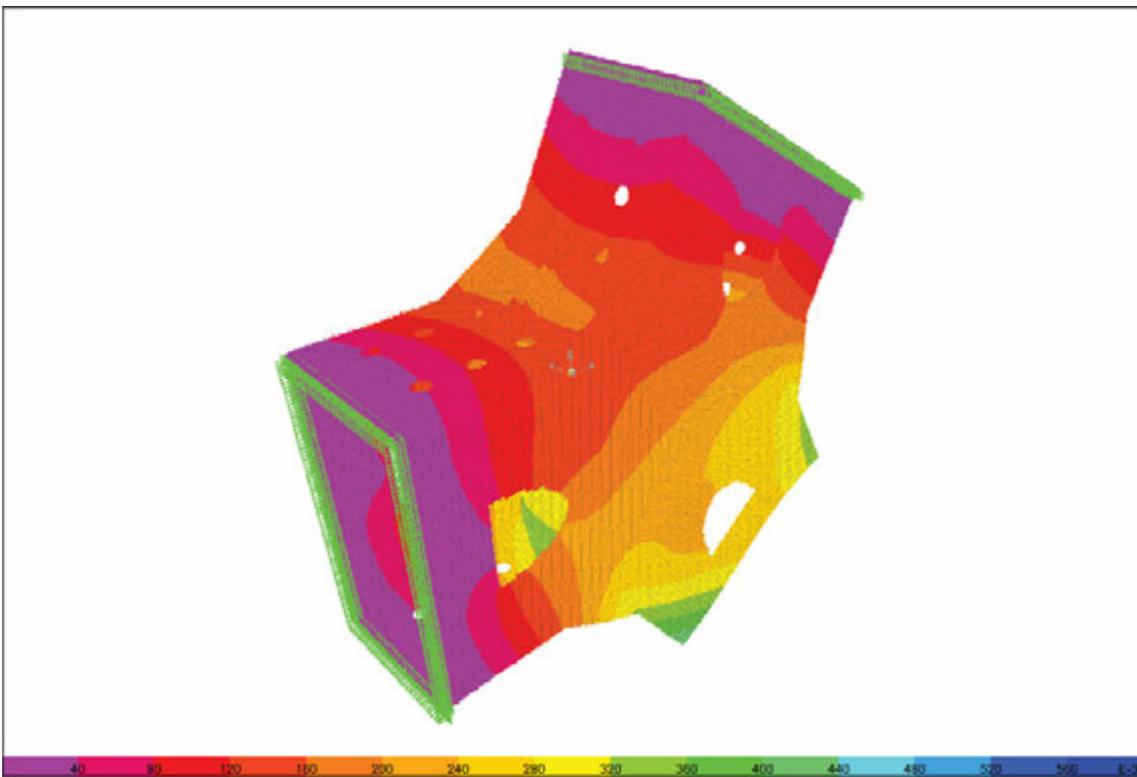


Ilustración 67: Deformación máxima resultante UDSTL10 modelo 7.4 / 12-17

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

4.5. Descripción del modelo tipo A

El resultado del proceso de diseño resuelve las articulaciones de las barras que conforman el nudo mediante un diseño simétrico, de tal forma que el nudo tiene simetría radial visto en el plano xy alrededor del eje z y simetría bilateral en los planos xz e yz alrededor de los ejes x e y.

El modelo se compone de 3 piezas construidas en acero S355, una pieza central (Tipo A) que hace de esqueleto y 2 piezas gemelas (Tipo B) que cubren a la primera por cada lado.

4.5.1. Pieza Tipo A

La pieza tiene como núcleo 3 pletinas soldadas entre sí formando un triángulo equilátero. Este triángulo tiene 3 brazos simétricos, cada uno de ellos compuesto por 2 pletinas con 3 pares de agujeros que ayudan, a través de pernos y pasadores, a conectar las barras con las piezas del nudo.

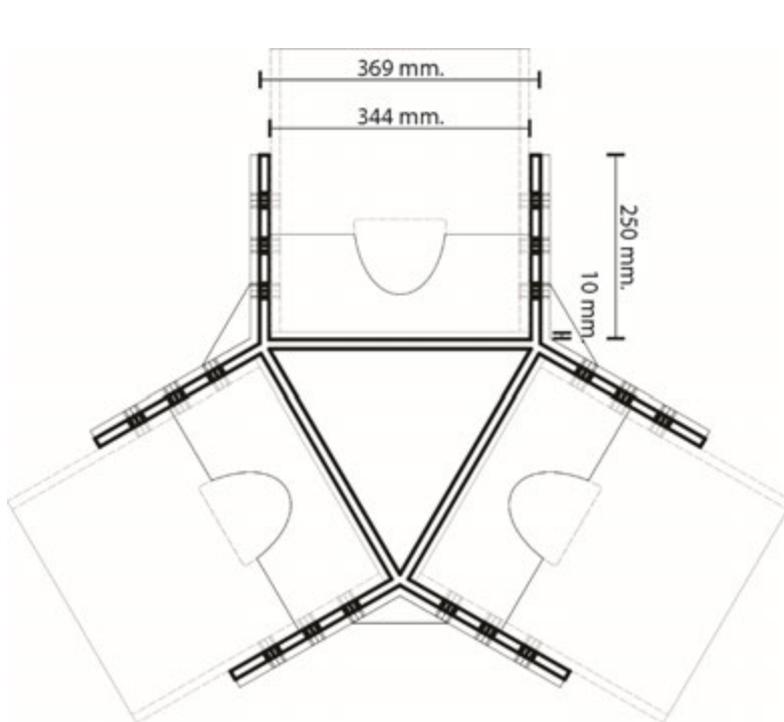


Ilustración 68: Pieza tipo A, vista en planta

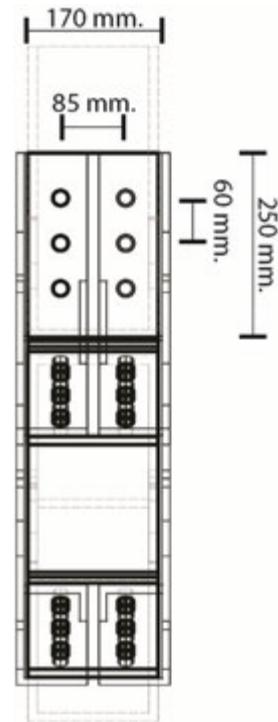


Ilustración 69: Pieza tipo A, vista en alzado

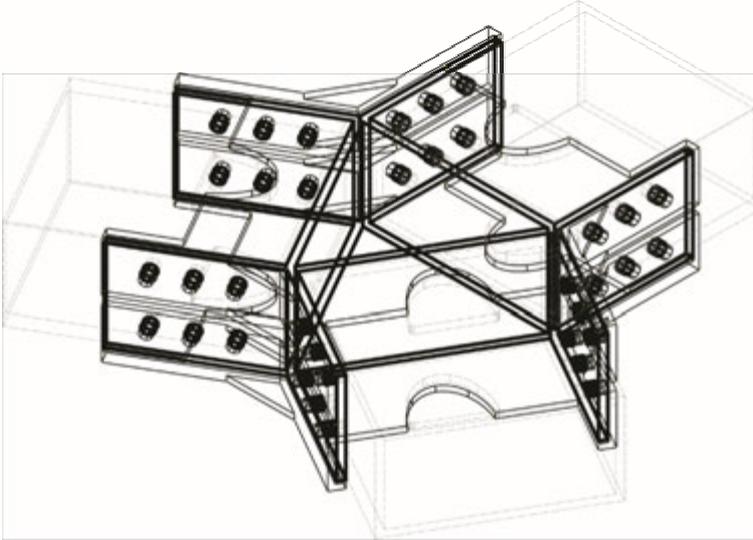


Ilustración 70: Pieza tipo A, axonometría

4.5.2. Pieza Tipo B

La pieza está compuesta por una gran pletina cuya forma se asemeja a la de un triángulo que cubre y sobrepasa la superficie de la pieza Tipo A y unos apéndices, del mismo material y espesor, ubicados simétricamente en cada uno de los brazos del nudo.

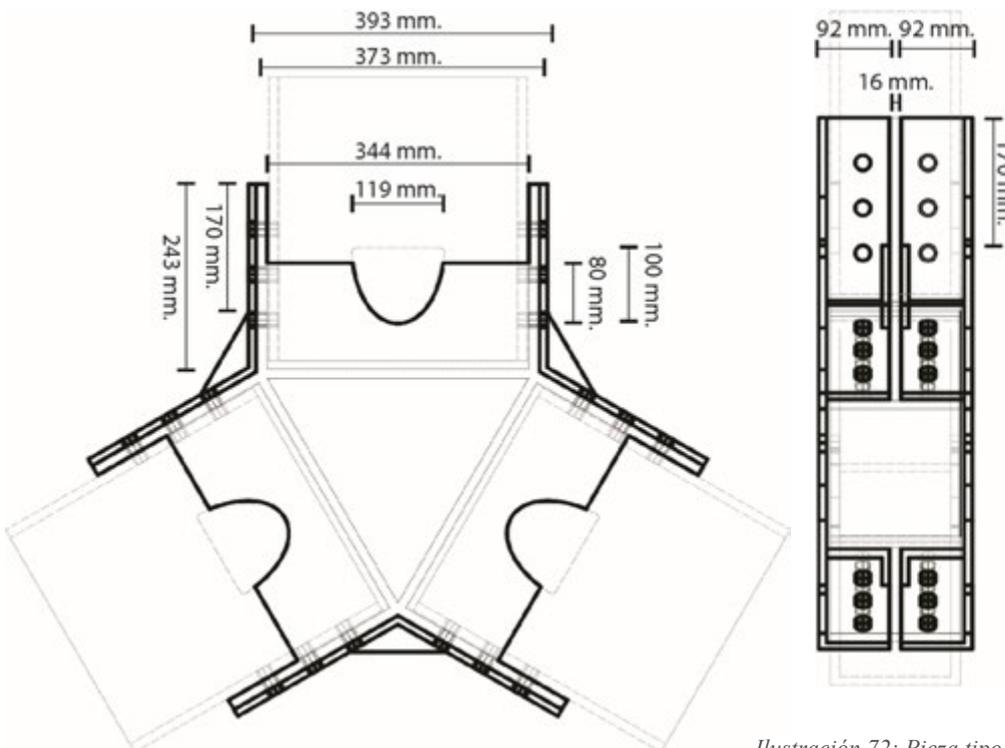


Ilustración 71: Pieza tipo B, vista en planta

Ilustración 72: Pieza tipo B, vista en alzado

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

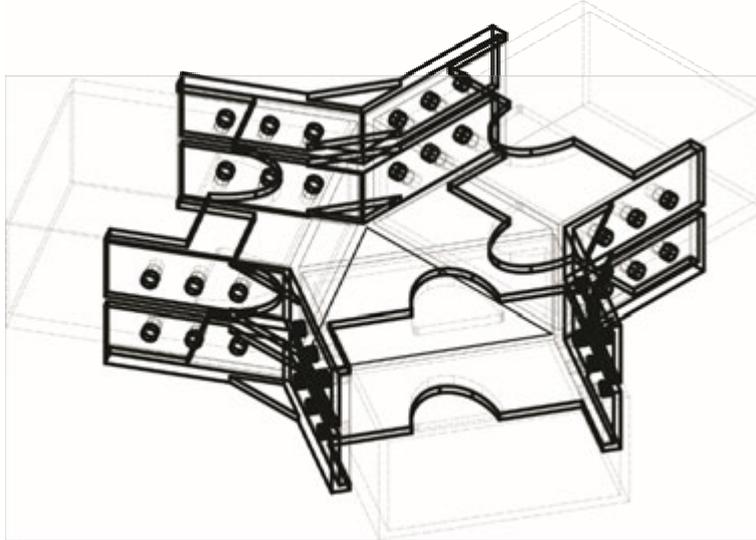


Ilustración 73: Pieza tipo B, axonometría

Estos apéndices o pestañas están perforadas de tal manera que sus orificios coinciden en número, posición y longitud con los orificios de la pieza Tipo A, de tal manera que se extienden longitudinalmente más allá de los límites de la pletina superficial.

La unión de 1 pieza Tipo A y 2 piezas Tipo B con las barras que recoge el nudo se podría realizar mediante tornillos a presión. Además, en cada brazo del nudo se coloca en el par de agujeros más alejado del centro un pasador que hace de pivote de la articulación para permitir el giro necesario de las barras.

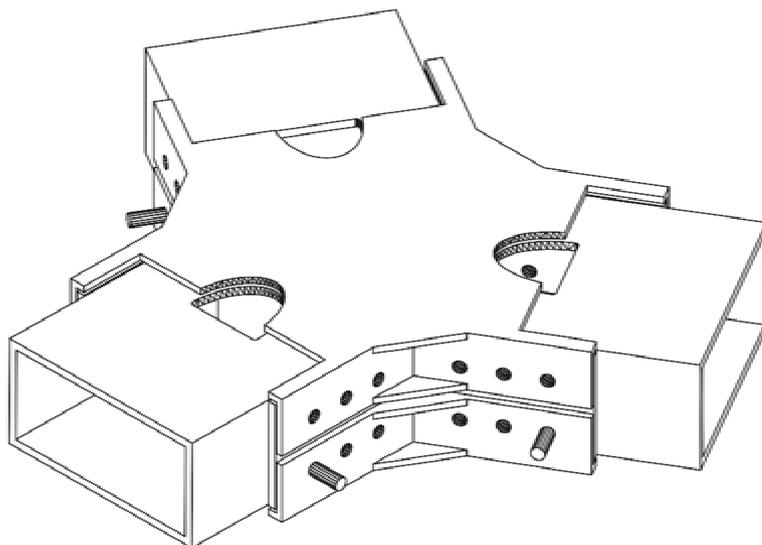


Ilustración 74: Nudo con barras desplegadas, axonometría

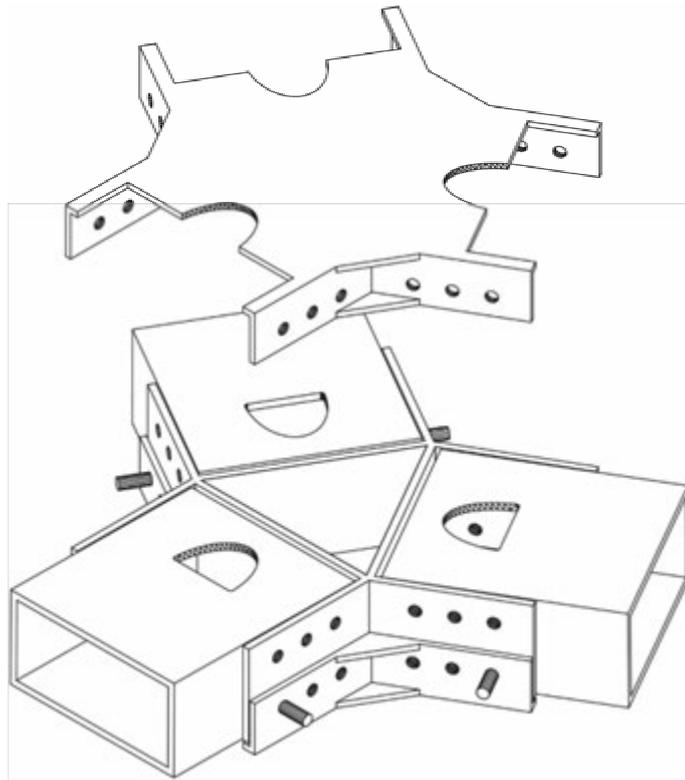


Ilustración 75: Proceso de plegado 1, axonometría

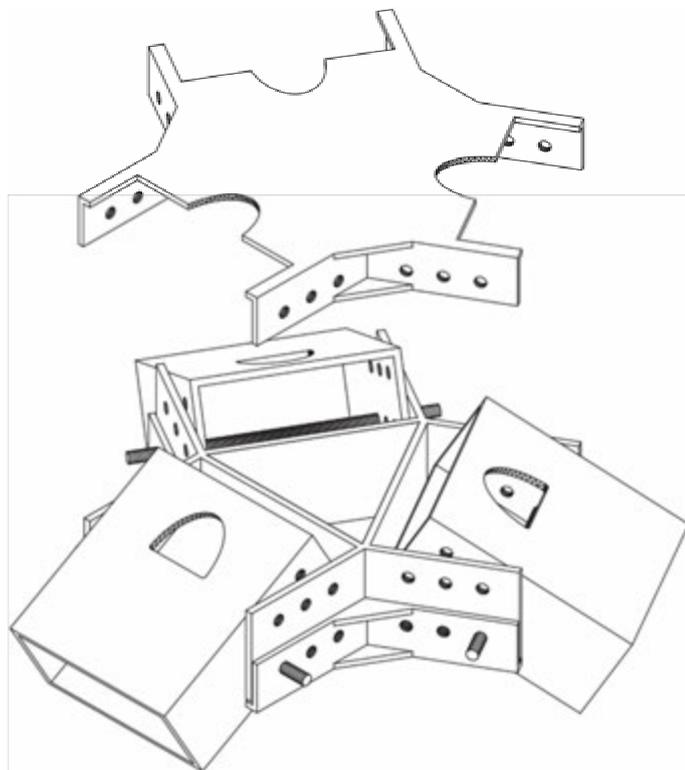


Ilustración 76: Proceso de plegado 2, axonometría

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

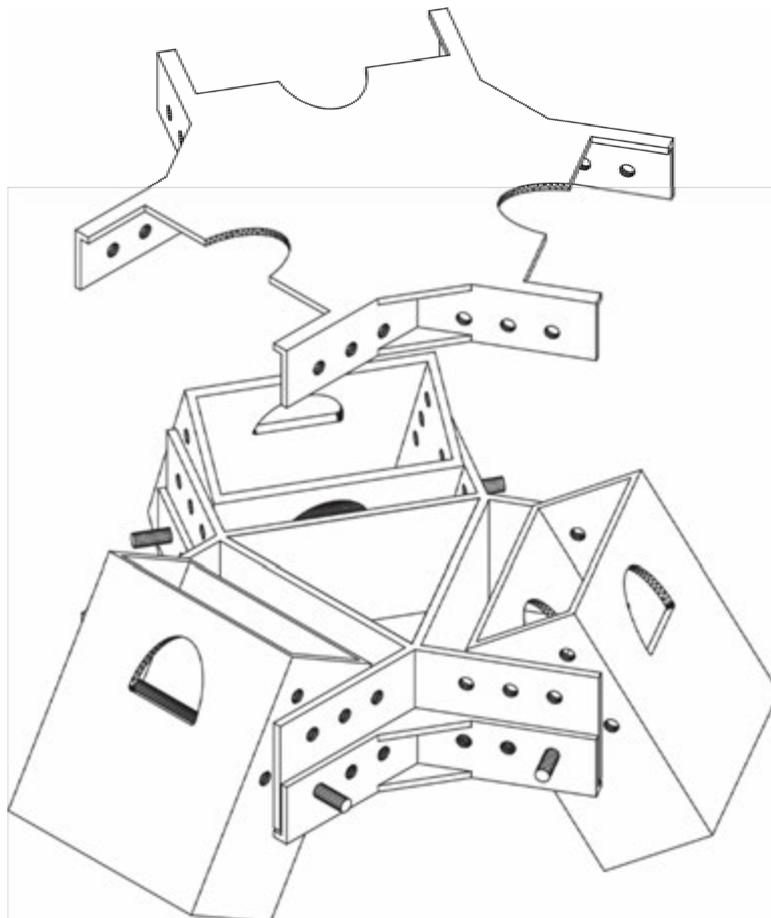


Ilustración 77: Proceso de plegado 3, axonometría

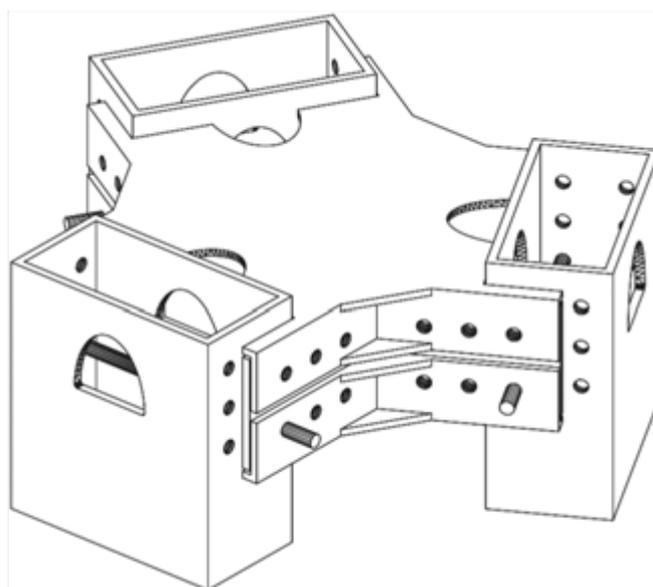


Ilustración 78: Nudo con barras plegadas, axonometría

4.6. Funcionamiento de las articulaciones en el nudo: aplicación del sistema de plegado

La plegabilidad del sistema se logra construyendo una articulación independiente en cada uno de los 3 brazos, que se crea con pasador que permite el giro de cada una de las barras. Liberando la pieza Tipo B que no tiene un pasador se logra que las barras puedan girar 90° y pasen de una posición vertical (plegado) a una posición horizontal (desplegado), donde se recoloca la pieza Tipo B y se asegura con pernos a presión.

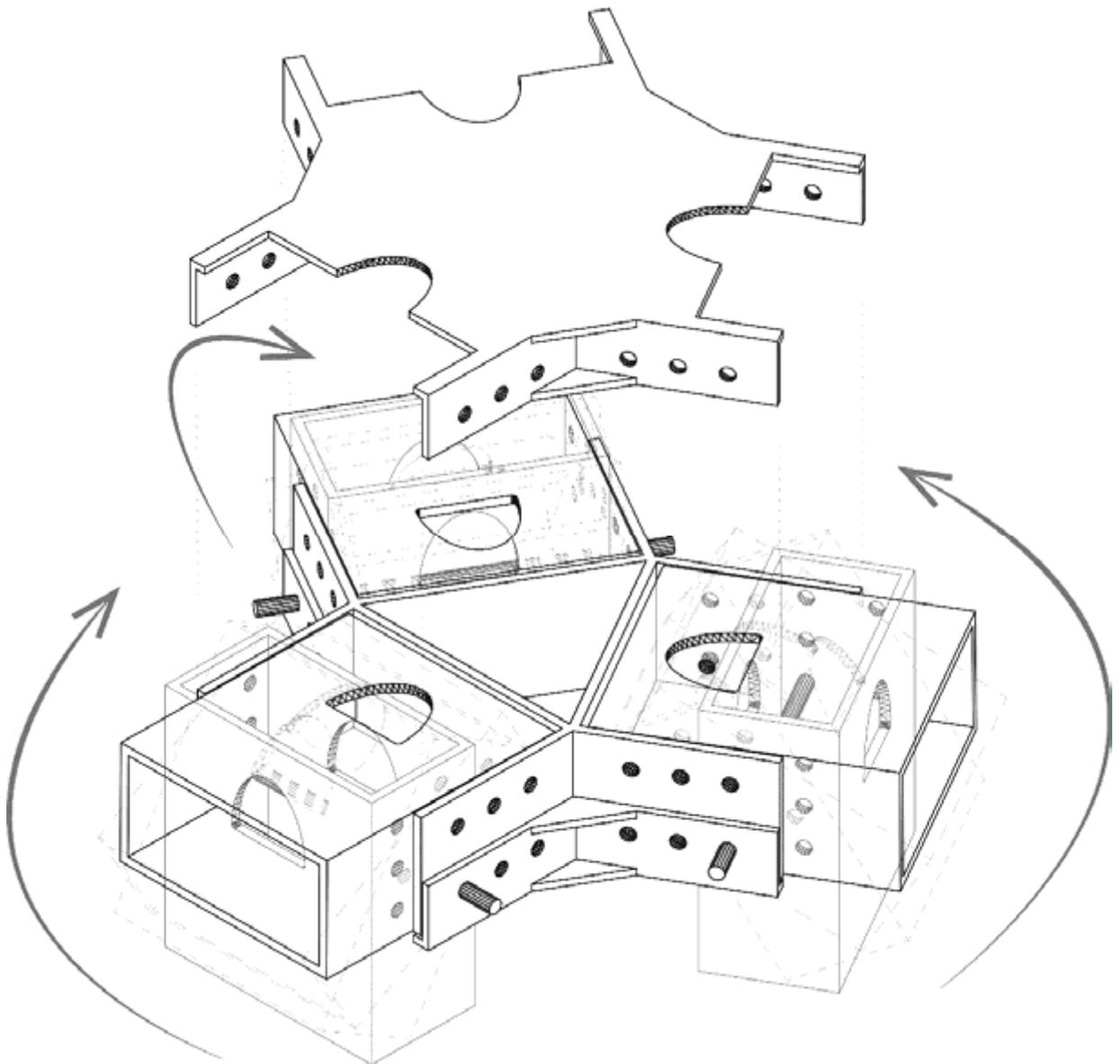


Ilustración 79. Proceso de desplegado de barras, axonometría

4.7. Conclusiones y discusión del capítulo

Para ver el potencial del nudo que aquí se propone y diseña, se ha tomado como referencia de modelo de edificación una estructura que se encuentra en el límite de altura que permiten las condiciones de entorno y configuración planteados en las edificaciones Hexagrid previamente analizadas. Es probable que el sistema propuesto funcione mejor en edificaciones de menor altura.

La elección del nudo sin conexión con los forjados se justifica cuando se intenta utilizar una intersección de barras que sea representativa por la concentración de esfuerzos que existen en ese punto. Pero, al mismo tiempo, se evita aumentar la complejidad del modelo con la introducción de esfuerzos transversales al nudo.

El sistema de plegado propuesto tiene como fin reducir el volumen de transporte de la estructura. Se cree que logrando este objetivo las potenciales posibilidades de uso de las mallas Hexagrid pueden elevarse considerablemente, sobre todo en zonas de Latinoamérica, donde el acceso es limitado y es complicado disponer de la maquinaria necesaria para realizar una construcción convencional.

Como consecuencia del entorno de uso del sistema, se ha buscado que las piezas del nudo sean pocas y que puedan tener cierto nivel de dualidad en el uso. De ahí la elección de la posición de los pasadores para lograr que la articulación permita el movimiento, o de la forma de la pieza Tipo B, que sirve para bloquear el movimiento de las articulaciones del nudo en la fase de transporte. El correcto equilibrio entre resistencia de las piezas y la simpleza del mecanismo lleva a buscar un diseño que evite el uso superfluo de material.

Hay que tener en cuenta la subjetividad en el momento de decidir las áreas de aplicación de fuerzas, la ubicación de las mismas y cómo aplicarlas, tener una sensibilidad que permita una correcta interpretación del posible comportamiento del sistema de fuerzas en la realidad, porque esto es lo que hará que los resultados obtenidos del análisis sean válidos.

El proceso de extracción y transformación de los esfuerzos obtenidos en cargas puntuales aplicables es sencillo una vez formulados todos sus pasos y utilizando un programa específico que, de ser necesario, permite la reproducción de datos de otros

nudos que respondan a los mismos parámetros geométricos y de alineación con los ejes principales.

Las deformaciones obtenidas como resultado de los análisis son coherentes con las deformaciones del nudo en el modelo de edificación propuesto, lo que implica que hay una correcta correlación entre los modelos.

En el análisis de las tensiones de Von Mises se observa que, para casi todos los estados de carga, la tensión del material está por debajo del 30% de la tensión admisible, y que la concentración de esfuerzos se concentra en el ángulo que forman los brazos del nudo.

Con las condiciones de apoyo aplicadas, las deformaciones máximas cuando se encuentran en los extremos de los brazos deben tomarse como una tendencia y no como un valor absoluto.

Las deformaciones siguen un patrón similar al que muestra el modelo de barras de la edificación a la que pertenece este nudo.

Es necesario crear modelos de elementos finitos más complejos y aplicar cálculos no lineales para entender más profundamente el comportamiento plástico de las piezas.

La eficiencia del diseño radica en lo compacto que pueda llegar a ser el nudo, y esto es más fácil de lograr si los esfuerzos provenientes de las barras tienen magnitudes que permiten distribuirlos entre el menor número de pernos posibles, por lo que el sistema funcionará mejor en edificaciones de baja altura con menores esfuerzos.

Capítulo 5. **Ensamblado,
empaquetado y transporte** de un
edificio tipo C de 8 pisos con sistema
Hexagrid

5.1 Introducción

Para desarrollar a mayor profundidad el proceso de ensamblado de la estructura se toma como referencia, dentro de los modelos propuestos en el capítulo 3, el edificio tipo C de 8 pisos.

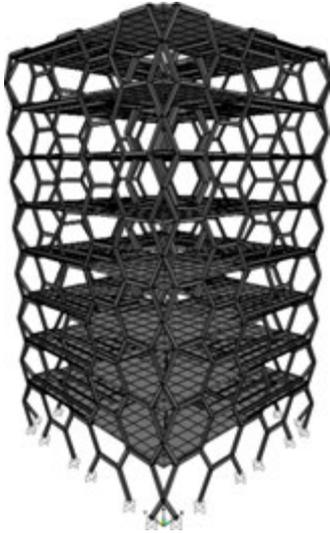


Ilustración 80: Modelo propuesto de 8 pisos tipo C

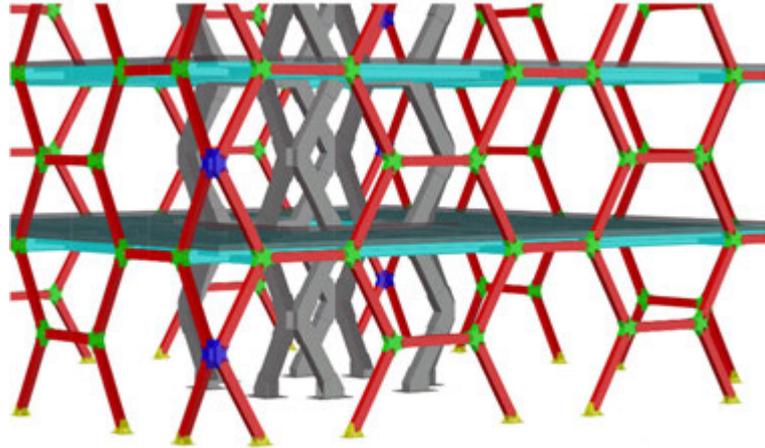


Ilustración 81: Vista de Hexagrid perimetral (rojo) con sus respectivos nudos

Aunque en este capítulo se mostrará un proceso de construcción que involucrará a toda la estructura, el estudio y el desarrollo se enfocarán en la Hexagrid perimetral, dejando de lado el empaquetado y transporte del núcleo y los forjados.

La Hexagrid perimetral está compuesta por 4 caras y cada una de estas por 136 barras cuya sección es un tubo rectangular de 200 mm por 140 mm por 8 mm de espesor y una longitud de 1873,7 mm.

De la Hexagrid perimetral se toma el nudo sometido a los mayores esfuerzos y se realiza un proceso de diseño, cálculo y dimensionado del nudo siguiendo el proceso y los parámetros propuestos en el capítulo 4.

A partir del nudo obtenido se proponen, manteniendo los espesores de sección de las placas de acero e intentando ser fiel al diseño original, los modelos de nudos⁴⁶ que conectan la Hexagrid con la cimentación y que conectan las superficies de malla en las esquinas. Cabe anotar que estos diseños no han sido calculados ni validados

⁴⁶ En el capítulo 4 se explica que la Hexagrid tiene 3 tipos de nudos pero que se desarrolla solo el nudo A, que es el nudo tipo.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

estructuralmente y su concepción responde a la necesidad de plantear el ensamblado global de la estructura.



Ilustración 82: Nudo tipo A (izq.), nudo tipo B (centro), nudo tipo C (der.), para edificio de 8 pisos tipo C

5.2. Proceso de ensamblado

En una situación ideal, el ensamblado de la estructura sería únicamente desplegar, con ayuda de grúas de gran capacidad, las 4 Hexagrids perimetrales y unir las para que puedan mantener su posición estable.

Teniendo en cuenta que las condiciones del contorno son desconocidas, se propone una secuencia de ensamblado a través de la colocación de módulos estandarizados que, unidos entre sí, conforman la edificación, considerando la construcción de los forjados y la colocación del núcleo de la estructura.

5.2.1. Fase 0

En la fase 0 se prepara el terreno, se construye la cimentación y se colocan los nudos de apoyo que sostendrán la estructura.

En esta investigación no se tratan todos los tipos de cimentación posibles, ya que estos dependen de las condiciones del terreno donde se va a implantar la edificación. En todo caso, se considera que la cimentación puede ser más efectiva⁴⁷ si sigue la lógica de módulos hexagonales de la estructura de tal forma que, en caso de utilizar cimentación

⁴⁷ Las cimentaciones convencionales suelen estar compuestas por hormigón en masa con refuerzos de varillas de acero, por lo que una cimentación trabaja mejor cuando está sometida a esfuerzos de compresión y se evita la producción de flexiones.

aislada, cada una de las zapatas recoja los apoyos de 2 pilares contiguos, cerrando así el respectivo módulo hexagonal.

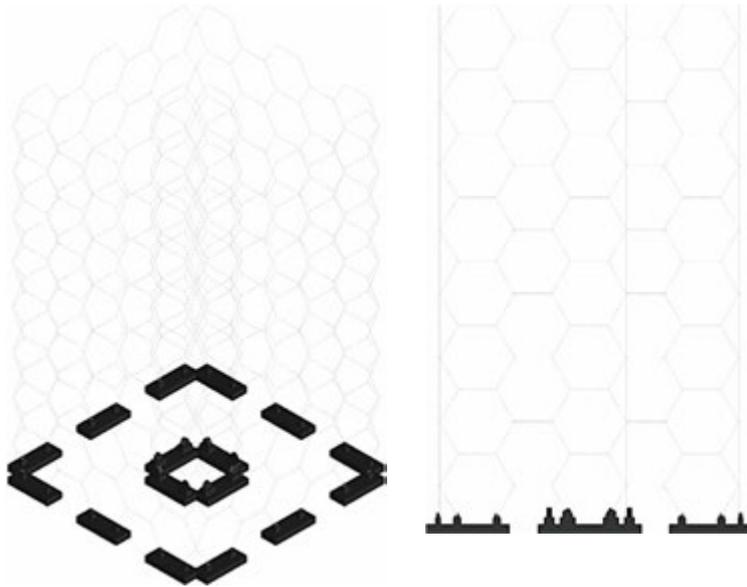
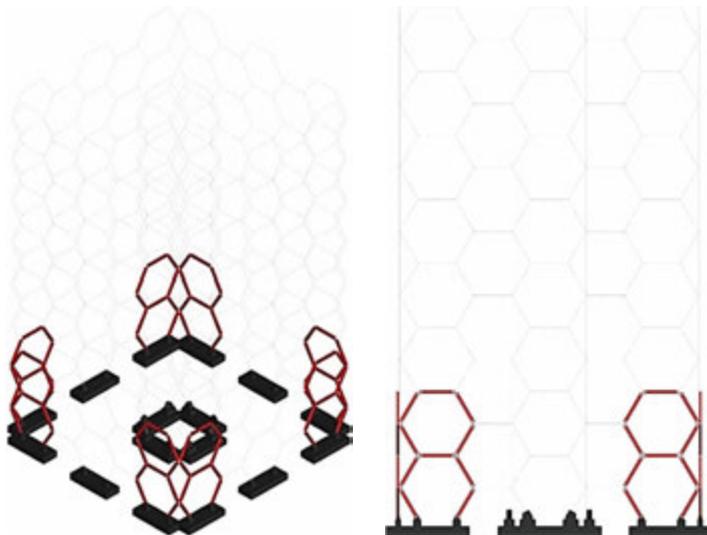


Ilustración 83: Fase 0 (Axonometría y alzado)

5.2.2. Fase 1

La construcción de la Hexagrid perimetral se inicia con la colocación de los módulos de las 4 esquinas. Estas piezas, compuestas por un módulo de ancho por 2 módulos de altura por cara, tienen la capacidad de mantener su estabilidad sin necesidad de elementos adicionales que los apuntalen y, al mismo tiempo, ofrecen puntos de sujeción para colocar los módulos del centro de cada una de las caras de la envolvente.



Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Ilustración 84: Fase 1 (Axonometría y alzado)

5.2.3. Fase 2

En la fase 2 se completa la primera hilera de módulos hexagonales colocando en la parte central de cada una de las caras los módulos y barras faltantes, además de construir el primer piso del núcleo. Completada esta etapa se construye el primer forjado.

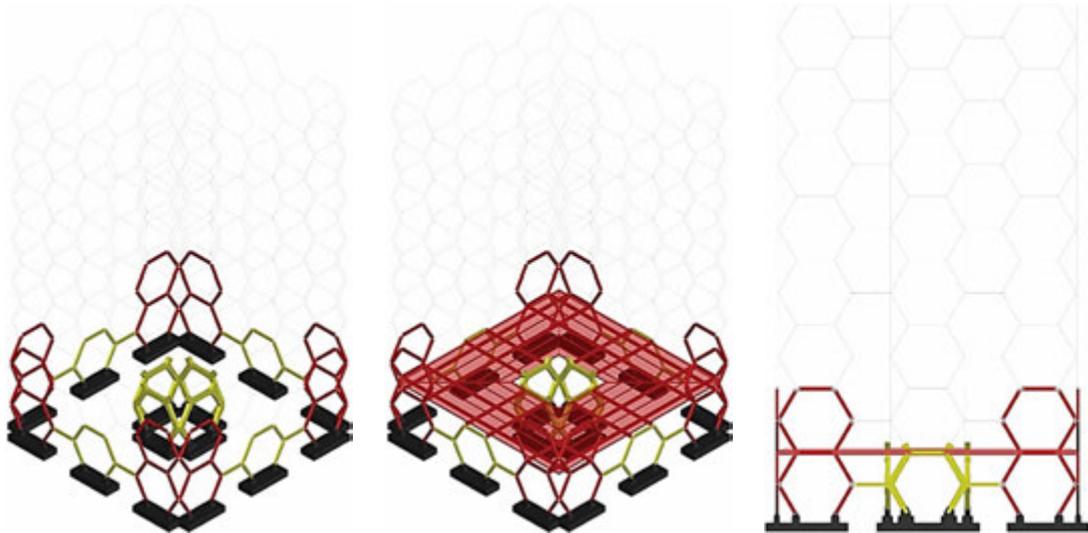


Ilustración 85: Fase 2, forjado 1. (Axonometría y alzado)

5.2.4. Fases 3, 4, 5, 6, 7, 8

A partir de la fase 3 se propone colocar alternadamente módulos centrales y módulos esquineros, cada uno de ellos con 2 pisos de altura. Con esto se busca aprovechar los apoyos preexistentes para mantener estable la estructura.

En cada fase se aumentan en una altura los componentes del núcleo para así también poder construir un piso más de forjado al finalizar cada una de las etapas.

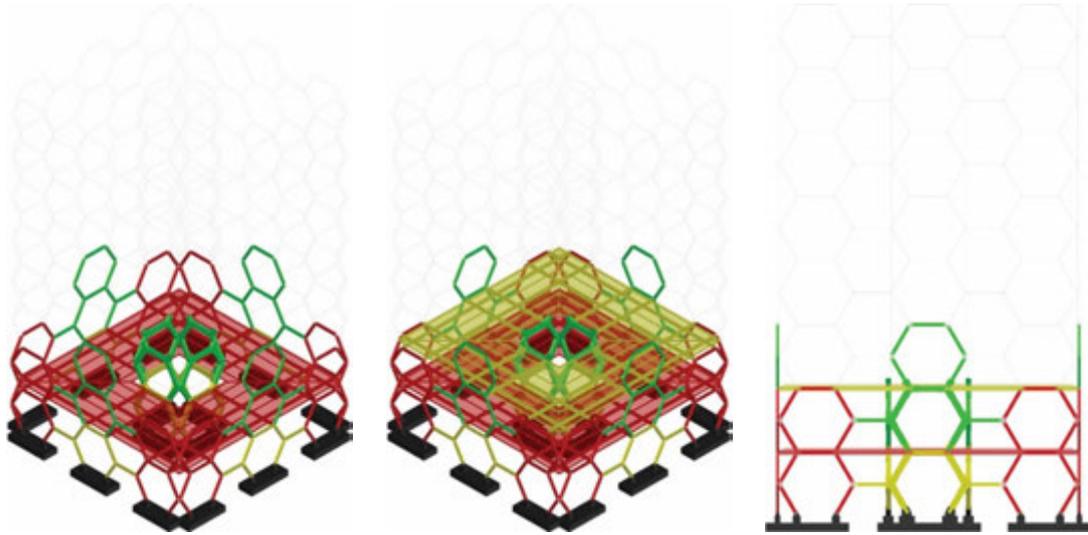


Ilustración 86: Fase 3, forjado 2. (Axonometría y alzado)

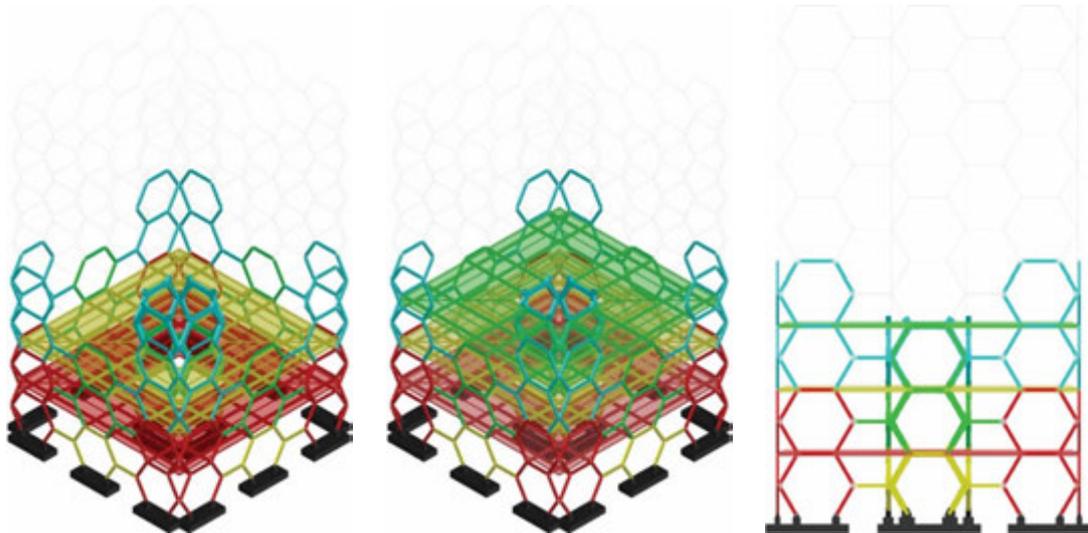


Ilustración 87: Fase 4, forjado 3. (Axonometría y alzado)

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

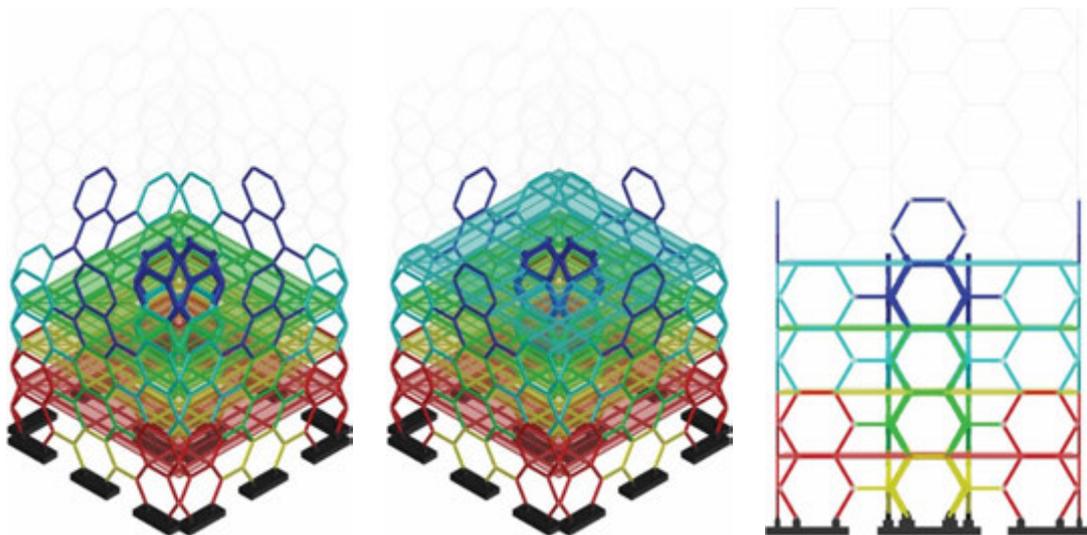


Ilustración 88: Fase 5, forjado 4. (Axonometría y alzado)

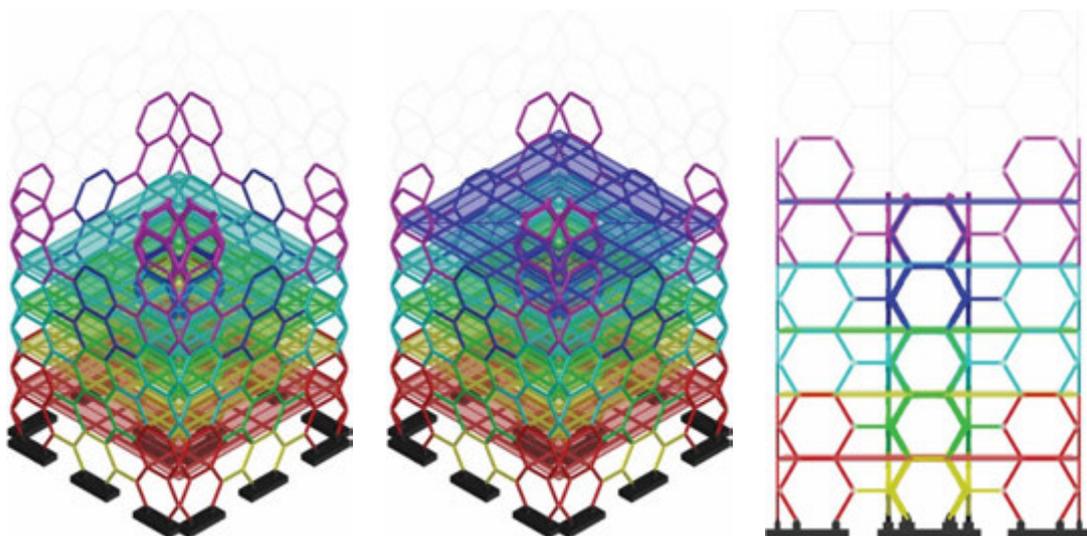


Ilustración 89: Fase 6, forjado 5. (Axonometría y alzado)

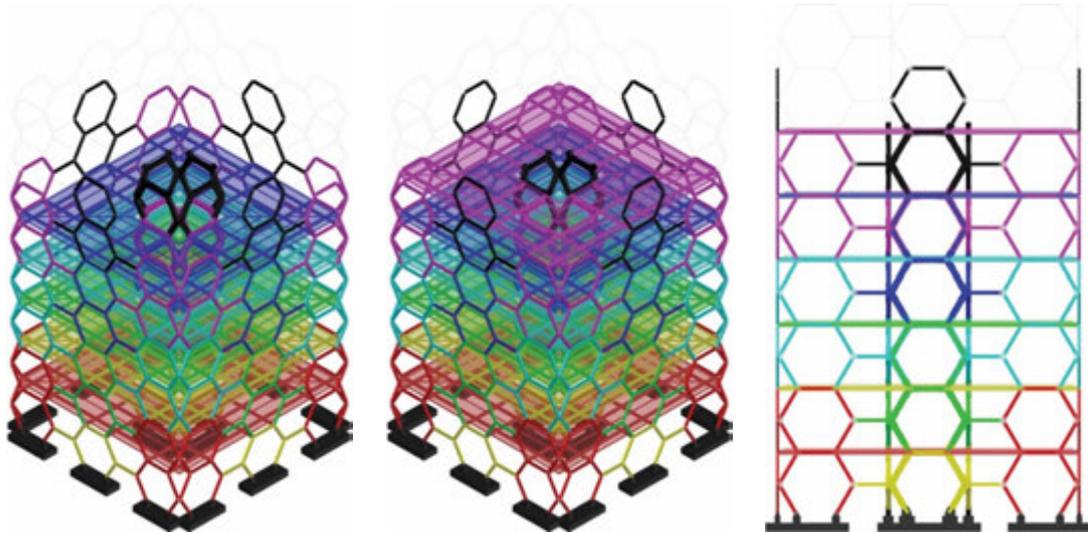


Ilustración 90: Fase 7, forjado 6. (Axonometría y alzado)

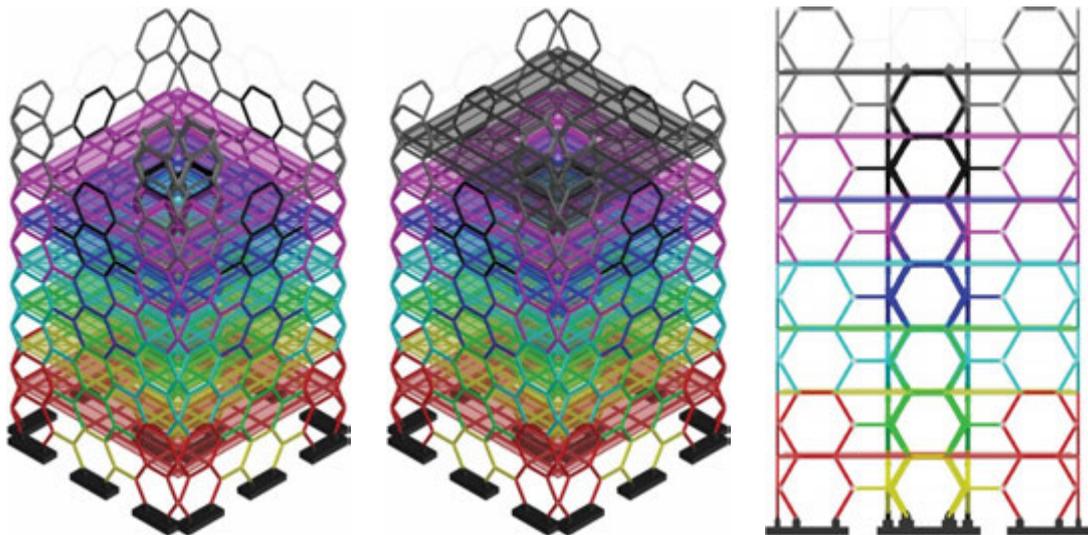


Ilustración 91: Fase 8, forjado 7. (Axonometría y alzado)

5.2.5. Fase 9

Es la última etapa de construcción del edificio de 8 pisos. En esta fase se completan los módulos centrales restantes (correspondientes al último piso) y se colocan los últimos módulos del núcleo. Después de este paso ya se puede construir el forjado de cubierta.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

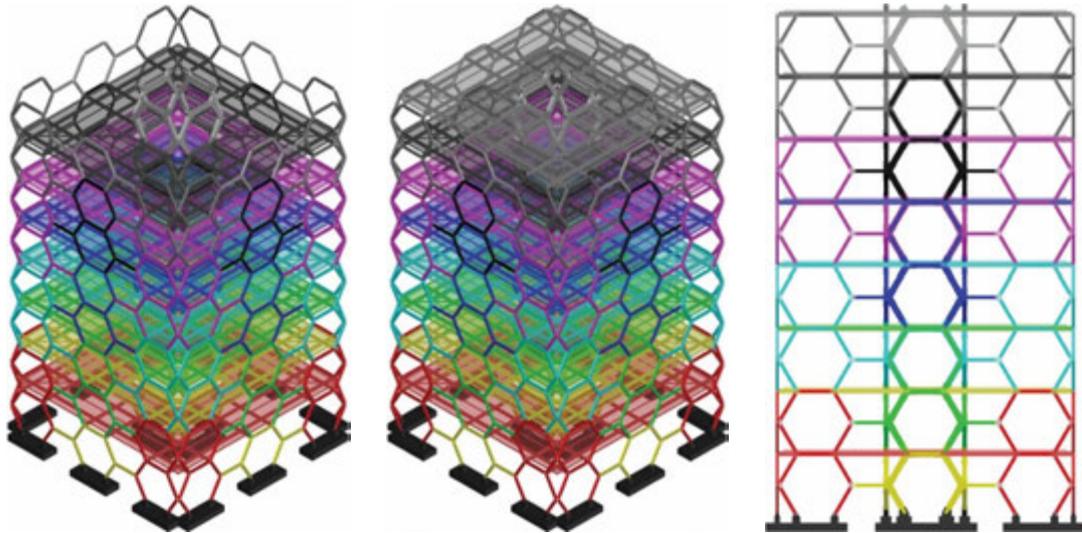
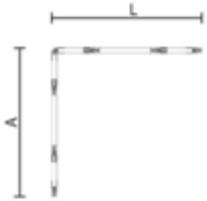
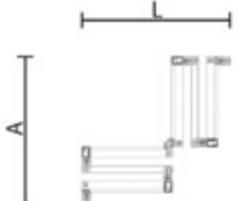
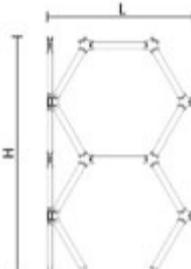
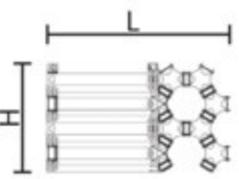


Ilustración 92: Fase 9, forjado 8 de cubierta. (Axonometría y alzado)

5.3. Empaquetado de la estructura

A partir de las fases de construcción propuestas se puede subdividir la estructura en distintos conjuntos de barras que, unidos entre sí, conforman la edificación. En el caso de la Hexagrid perimetral, estos conjuntos se pueden agrupar en 4 tipos, 2 grupos pertenecientes a los módulos de esquina (M1, M2) y 2 grupos pertenecientes a los módulos centrales (N1, N2). Cada uno tiene unas dimensiones de largo (L), ancho (A) y altura (H) cuando sus barras están totalmente desplegadas en la posición de uso. Estas dimensiones se ven modificadas una vez se sigue el proceso de empaquetado de la malla de acuerdo al método explicado en el capítulo 4, dejando los componentes de la estructura en su posición de máximo plegado para el transporte.

Tabla 43: Grupo de barras M1

| Grupo: | M1 (fase 1) | |
|---------------|---|---|
| 20 barras | Desplegado | Plegado |
| Planta |  |  |
| Alzado |  |  |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

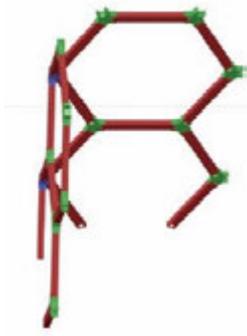
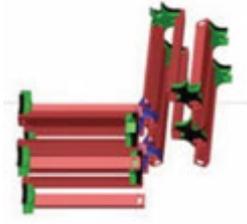
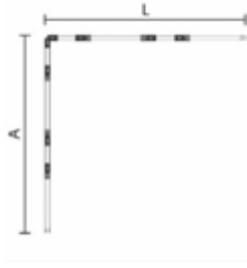
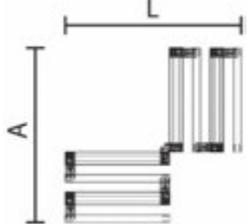
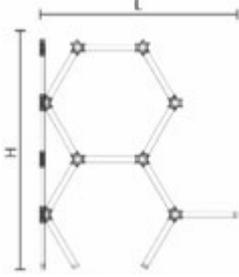
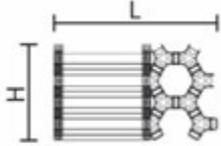
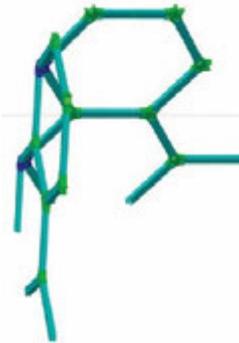
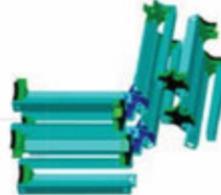
| Grupo: | | M1 (fase 1) | |
|--------------------|----------|---|---|
| 20 barras | | Desplegado | Plegado |
| Perspectiva | |  |  |
| Dimensiones | L | 4,45 m | 3,08 m |
| | A | 4,45 m | 3,08 m |
| | H | 7,26 m | 1,86 m |

Tabla 44: Grupo de barras M2

| Grupo: | | M2 (fase 4, fase 6, fase 8) | |
|---------------|--|---|---|
| 22 barras | | Desplegado | Plegado |
| Planta | |  |  |

| Grupo: | | M2 (fase 4, fase 6, fase 8) | |
|--------------------|----------|--|--|
| 22 barras | | Desplegado | Plegado |
| Alzado | |  |  |
| Perspectiva | |  |  |
| Dimensiones | L | 6,15 m | 3,15 m |
| | A | 6,15 m | 3,15 m |
| | H | 7,26 m | 1,86 m |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Tabla 45: Grupo de barras N1

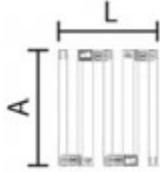
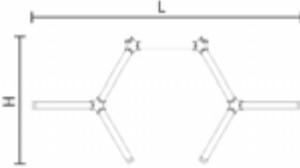
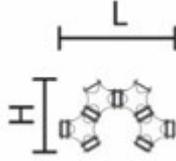
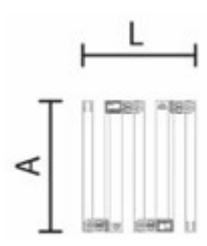
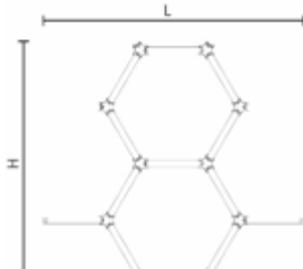
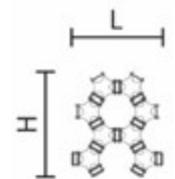
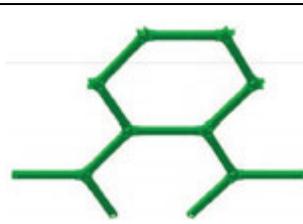
| Grupo: | | N1 (fase 2, fase 9) | |
|--------------------|----------|---|---|
| 7 barras | | Desplegado | Plegado |
| Planta | |  |  |
| Alzado | |  |  |
| Perspectiva | |  |  |
| Dimensiones | L | 7,94 m | 1,60 m |
| | A | 0,16 m | 1,86 m |
| | H | 3,76 m | 1,01 m |

Tabla 46: Grupo de barras N2

| Grupo: | | N2 (fase 3, fase 5, fase 7) | |
|--------------------|----------|---|---|
| 12 barras | | Desplegado | Plegado |
| Planta | |  |  |
| Alzado | |  |  |
| Perspectiva | |  |  |
| Dimensiones | L | 7,94 m | 1,60 m |
| | A | 0,16 m | 1,87 m |
| | H | 7,26 m | 1,86 m |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

5.3.1. Proceso de plegado / desplegado de los grupos de barras

Todos los grupos de barras se pliegan siguiendo el sistema propuesto en el capítulo 4. Este sistema se basa en que las 3 barras que se encuentran en cada nudo pueden girar independientemente en la misma dirección y mismo sentido, siendo este último el opuesto entre sí para 2 nudos que compartan la misma barra en sus extremos.



Ilustración 93: Esquema de plegado del sistema propuesto en el cap. 4

A partir de este esquema de plegado se presenta, a continuación, el proceso de plegado / desplegado de cada uno de los grupos de barras que componen la Hexagrid perimetral. Los gráficos se presentan de tal forma que la versión de máximo plegado está a la izquierda y la de máximo desplegado a la derecha, con puntos intermedios en los que las barras tienen un ángulo de giro de 30 y 60 grados respecto a la vertical del nudo.

Para una mayor comprensión se describe el proceso en vista de planta, de alzado y con perspectiva lateral.

Grupo de barras M1, compuesto por 20 barras unidas por 12 nudos tipo A y 2 tipo C.

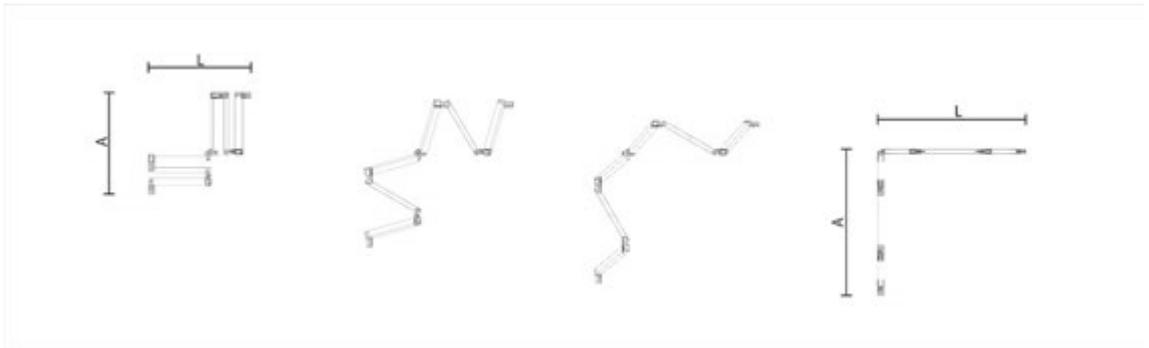


Ilustración 94: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M1, vista en planta

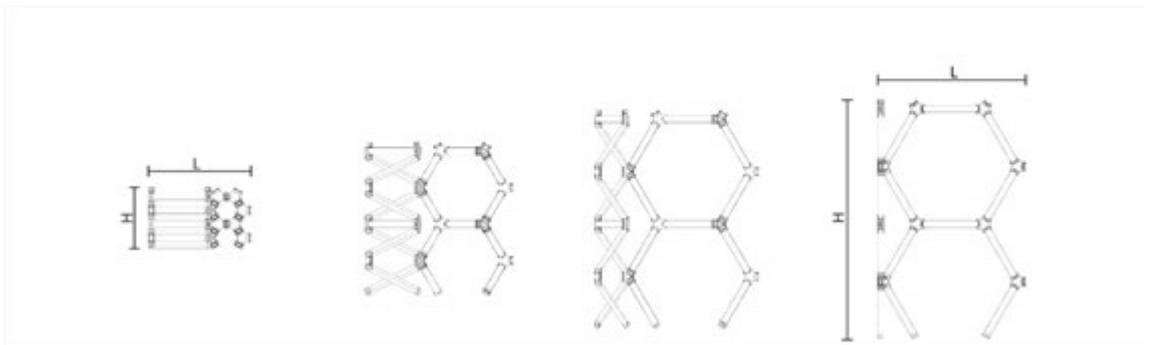


Ilustración 95: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M1, vista en alzado

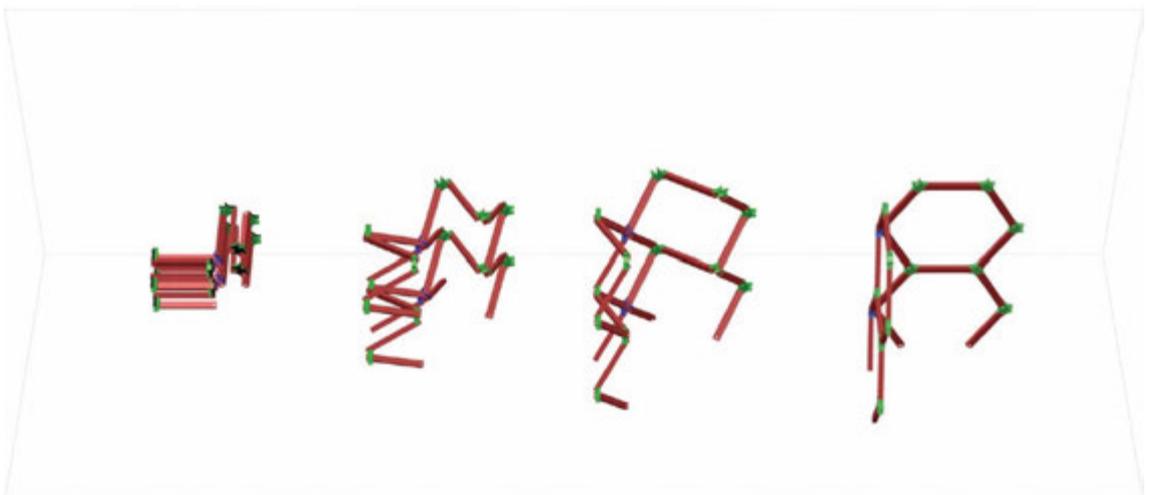


Ilustración 96: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M1, perspectiva lateral

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Grupo de barras M2, compuesto por 22 barras unidas por 12 nudos tipo A y 2 tipo C.

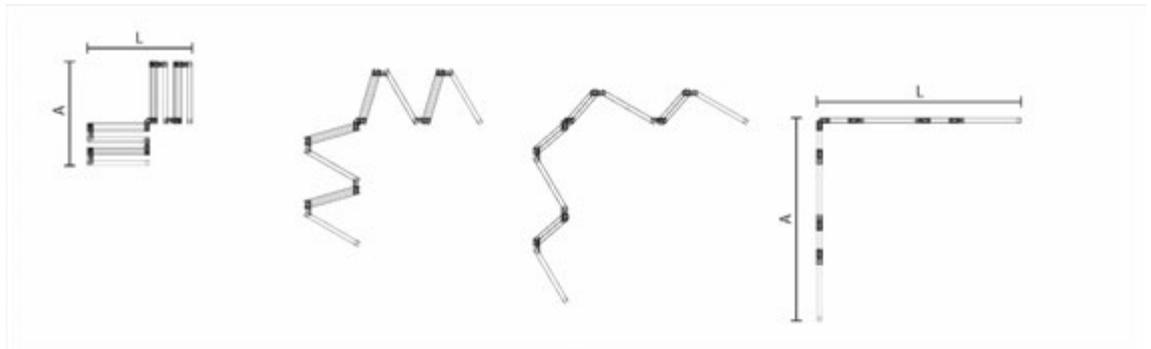


Ilustración 97: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M2, vista en planta



Ilustración 98: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M2, vista en alzado

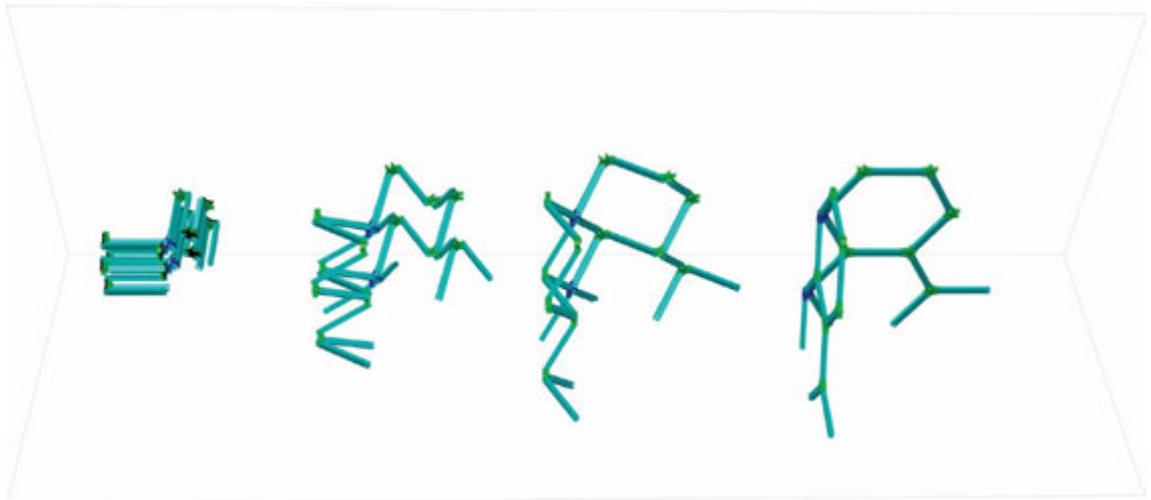


Ilustración 99: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras M2, perspectiva lateral

Grupo de barras N1, compuesto por 7 barras unidas por 4 nudos tipo A.



Ilustración 100: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N1, vista en planta

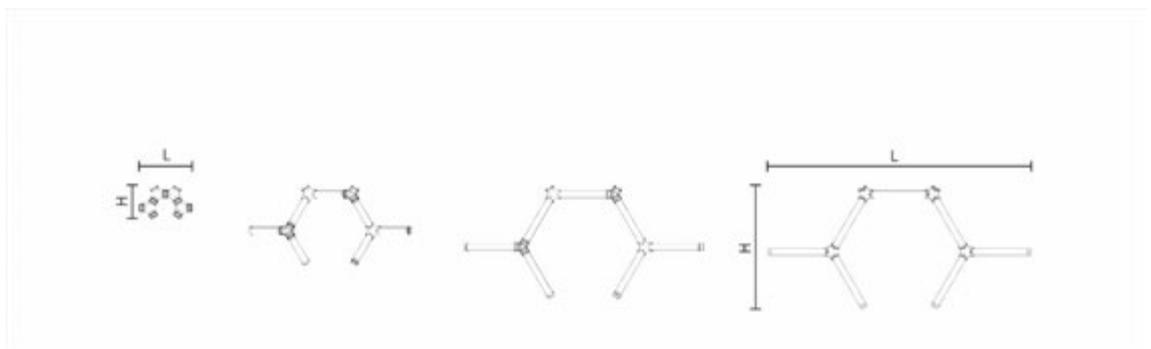


Ilustración 101: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N1, vista en alzado



Ilustración 102: Proceso de plegado / desplegado del grupo de barras N1, perspectiva lateral

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Grupo de barras N2, compuesto por 12 barras unidas por 8 nudos tipo A



Ilustración 103: Proceso de plegado / desplegamiento del grupo de barras N2, vista en planta

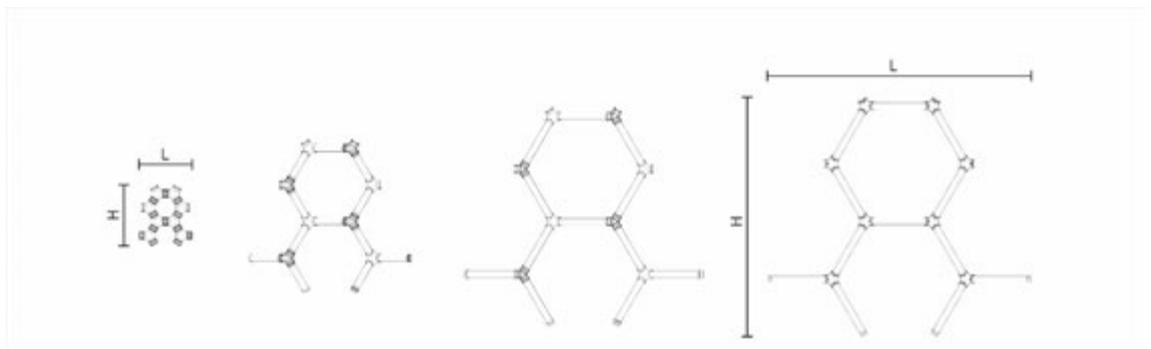


Ilustración 104: Proceso de plegado / desplegamiento del grupo de barras N2, vista en alzado

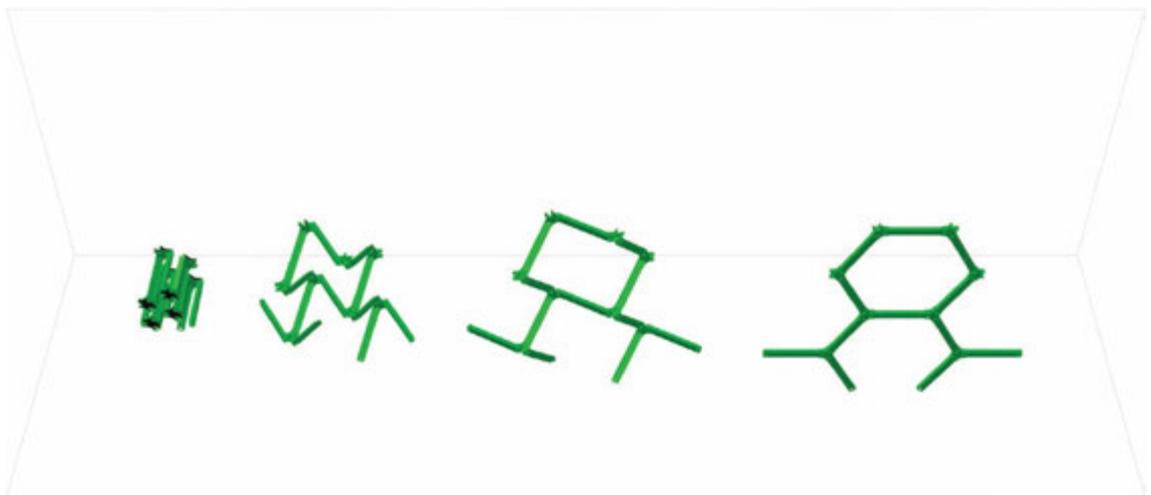
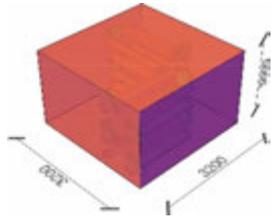
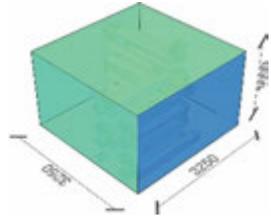
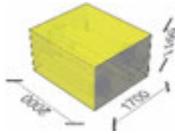
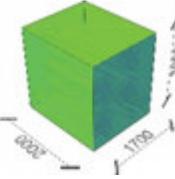


Ilustración 105: Proceso de plegado / desplegamiento del grupo de barras N2, perspectiva lateral

5.4. Transporte de los grupos de barras

La posibilidad de transportar los grupos que conforman la estructura dependerá del volumen y del peso de cada uno de los paquetes.

Tabla 47: Dimensiones y volumen de transporte de cada grupo de barras

| Grupo | | | | |
|------------------------|--------------------|----------------|-------------------|---|
| Vol. Transporte | Dimensiones | Plegado | Transporte | Gráfico (medidas en mm) |
| Peso | | | | |
| M1 | L | 3,08 m | 3.20 m |  |
| 20.48 m ³ | A | 3,08 m | 3.20 m | |
| 1920.8 kg | H | 1,86 m | 2,00 m | |
| M2 | L | 3,15 m | 3,25 m |  |
| 21.13 m ³ | A | 3,15 m | 3,25 m | |
| 2068,18 kg | H | 1,86 m | 2,00 m | |
| N1 | L | 1,60 m | 1,70 m |  |
| 3.74 m ³ | A | 1,86 m | 2,00 m | |
| 636.35 kg | H | 1,01 m | 1,10 m | |
| N2 | L | 1,60 m | 1,70 m |  |
| 6.80 m ³ | A | 1,87 m | 2,00 m | |
| 1125.32 kg | H | 1,86 m | 2,00 m | |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Las dimensiones de cada paquete se obtienen creando una caja virtual cuyas dimensiones se obtienen una vez se ha plegado cada grupo de barras, adicionando alrededor de 0,1 m por lado para asegurar el embalaje durante el transporte. Esta información se puede relacionar con las dimensiones y la capacidad de los medios de transporte potenciales.

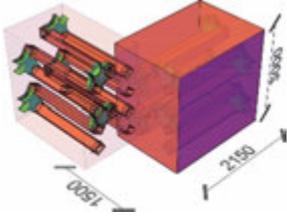
Lo más probable es que se utilicen contenedores para enviar los componentes de la estructura propuesta. De los 3 tipos de contenedor estandarizado disponibles, se plantea el transporte de los grupos de barras en los contenedores 20' DV y 40' DV.

Tabla 48: Dimensiones interiores de contenedores. (Franco, 2011)

| | Interior dimensions | | | Door dimensions | | Cubic capacity average |
|------------------------|---------------------|---------|---------|-----------------|---------|------------------------|
| | L1 | B1 | H1 | B2 | H2 | |
| 20'DV (8'6" height) | 5895 mm | 2350 mm | 2390 mm | 2340 mm | 2290 mm | 33 m ³ |
| 40'DV (8'6" height) | 12000 mm | 2350 mm | 2390 mm | 2340 mm | 2290 mm | 67 m ³ |
| 40'HC (9'6" height) | 12000 mm | 2350 mm | 2690 mm | 2340 mm | 2590 mm | 76 m ³ |

Al comparar las dimensiones de los contenedores con las dimensiones de carga de los grupos de barras está claro que los grupos M1 y M2, en su configuración actual, no pueden cargarse dentro.

Tabla 49: Dimensiones y volumen de transporte de subgrupos de barras M1a, M1e, M2a, M2e

| Grupo | Dimensiones | Plegado | Transporte | Gráfico (medidas en mm) |
|---------------------|-------------|---------|------------|---|
| M1a | L | 1,38 m | 1,50 m |  |
| 6.45 m ³ | A | 2,08 m | 2,15 m | |
| 1003.12 kg | H | 1,86 m | 2,00 m | |

| Grupo | Dimensiones | Plegado | Transporte | Gráfico (medidas en mm) |
|---------------------|-------------|---------|------------|-------------------------|
| M1e | L | 1,22 m | 1,30 m | |
| 5.20 m ³ | A | 1,87 m | 2,00 m | |
| 917.68 kg | H | 1,86 m | 2,00 m | |
| M2a | L | 1,45 m | 1,55 m | |
| 6.67m ³ | A | 2,08 m | 2,15 m | |
| 1076.81 kg | H | 1,86 m | 2,00 m | |
| M2e | L | 1,29 m | 1,40 m | |
| 6.80 m ³ | A | 1,87 m | 2,00 m | |
| 991.37 kg | H | 1,86 m | 2,00 m | |

Como solución se plantea dividir los grupos de barras en 2 subgrupos denominados M1a, M1e y M2a, M2e para que tengan unas dimensiones más contenidas y puedan transportarse en los contenedores.

5.4.1. Organización del almacenaje de los grupos de barras en los contenedores y flujo del envío de elementos en función del orden del proceso de construcción

Para que la construcción de la estructura se pueda llevar a cabo, el flujo de los suministros debe hacerse en el orden del proceso de construcción. En el caso que se propone en este capítulo, el almacenaje y transporte de los componentes está condicionado a las diferentes etapas de construcción.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

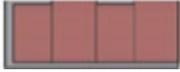
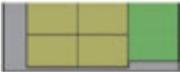
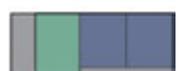
Tabla 50: número de paquetes de grupos de barras por cada etapa de construcción de Hexagrid perimetral.

| Etapa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Grupo | M1 | N1 | N2 | M2 | N2 | M2 | N2 | M2 | N1 |
| Número | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

A partir de las piezas utilizadas en el proceso de construcción y el orden de uso, se puede ordenar el cargamento de los contenedores de tal manera que garantice un flujo coherente de paquetes de barras.

Utilizando los contenedores tipo 20' DV se requieren 15 para transportar la Hexagrid perimetral.

Tabla 51: Contenedores tipo 20' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral

| Núm. contenedor | Grupos de barras | Peso | Imagen |
|-----------------|------------------|------------|---|
| 1 | 2 M1a + 2 M1e | 3841,6 kg |  |
| 2 | 2 M1a + 2 M1e | 3841,6 kg |  |
| 3 | 4 N1 + 1 N2 | 3670,72 kg |  |
| 4 | 3 N2 | 3375,96 kg |  |
| 5 | 4 M2e | 3965,48 kg |  |
| 6 | 3 M2a | 3230,43 kg |  |
| 7 | 1 M2a + 2 N2 | 3327,45 kg |  |
| 8 | 2 N2 + 1 M2a | 3327,45 kg |  |
| 9 | 4 M2e | 3965,48 kg |  |
| 10 | 3 M2a | 3230,43 kg |  |
| 11 | 3 N2 | 3375,96 kg |  |

| Núm. contenedor | Grupos de barras | Peso | Imagen |
|-----------------|----------------------|------------|---|
| 12 | 1 N2 + 2 M2a | 3278,94 kg |  |
| 13 | 2 M2a + 1 M2e + 1 N1 | 3781,34 kg |  |
| 14 | 3 M2e + 1 N1 | 3610,46 kg |  |
| 15 | 2 N1 | 1272,70 kg |  |

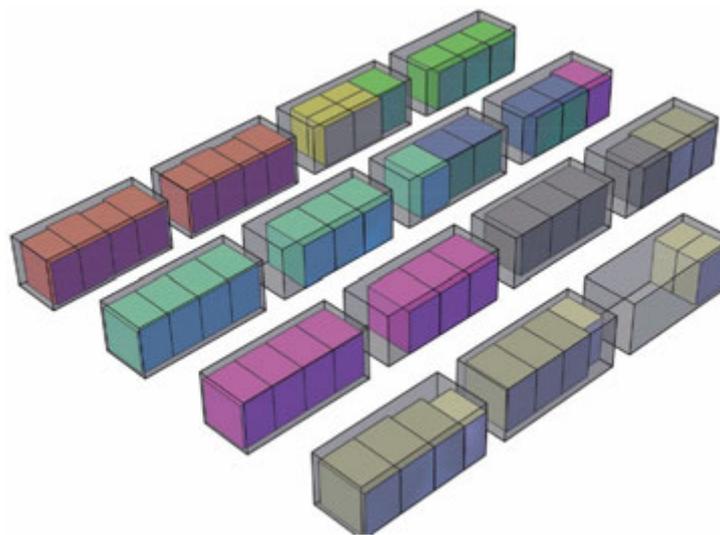
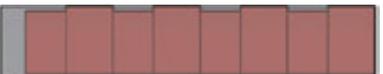
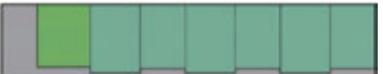
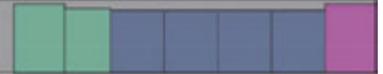


Ilustración 106: Perspectiva de contenedores tipo 20' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral

Mientras tanto, si se plantea el uso de contenedores tipo 40' DV, toda la Hexagrid perimetral cabe en 7 contenedores.

Tabla 52: Contenedores tipo 40' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral

| Núm. contenedor | Grupos de barras | Peso | Imagen |
|-----------------|----------------------|------------|--|
| 1 | 4 M1a + 4 M1e | 7683,20 kg |  |
| 2 | 8 N1 + 3 N2 | 8466,76 kg |  |
| 3 | 1 N2 + 3 M2a + 3 M2e | 7329,86 kg |  |
| 4 | 2 M2a + 1 M2e + 4 N2 | 7646,27 kg |  |

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

| | | | |
|---|----------------------|------------|--|
| 5 | 3 M2a + 4 M2e | 7195,91 kg |  |
| 6 | 4 N2 + 2 M2a + 1 M2e | 7646,27 kg |  |
| 7 | 2 M2a + 3 M2e + 4 N1 | 7673,13 kg |  |

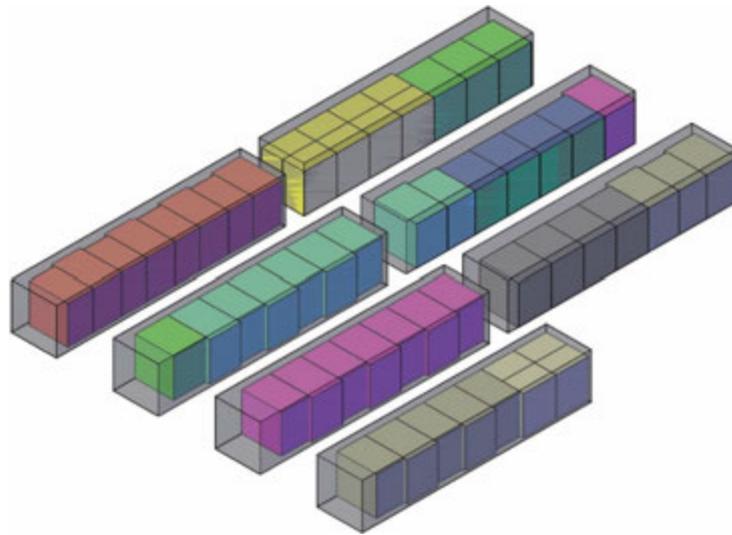


Ilustración 107: Perspectiva de contenedores tipo 40' DV utilizados en transporte de Hexagrid perimetral

5.5. Conclusiones y discusión del capítulo

Se puede observar que las dimensiones del nudo tipo A, correspondiente a la Hexagrid perimetral del modelo que se está analizando, mantienen la densidad visual de la malla respecto a la longitud y espesor de las barras que la componen.

Los nudos tipo B y tipo C son resultado de un ajuste de la geometría y las dinámicas de diseño utilizadas en el modelo tipo A. Estos diseños se pueden tomar como una referencia formal, pero se deben someter a análisis funcionales y validaciones estructurales para obtener los modelos definitivos. En todo caso, los nudos presentados cumplen la función de completar el sistema de la Hexagrid perimetral y así poder explicar su funcionamiento.

La cimentación que se plantea en la etapa 0 del ensamblado de la estructura no es más que una guía que marca unas directrices de diseño con el fin de que la zapata trabaje con esfuerzos predominantes de compresión y que se eviten complicaciones causadas por los esfuerzos laterales de las barras. En todo caso, desarrollar el cálculo y diseño de una cimentación solo será posible cuando se conozcan las particularidades del terreno en el que se va a implantar la estructura.

La distribución de barras y nudos en las fases de plegado planteadas quiere responder al compromiso entre la longitud de las barras, la manejabilidad de los grupos de barras, tanto plegadas como desplegadas, y la facilidad de empaque y transporte en los contenedores.

Se podrían empaquetar las barras en grupos mayores pero, teniendo en cuenta que el peso de los grupos actuales ya ronda la tonelada, elementos de mayor envergadura podrían ser complicados de manejar tanto en el plegado como en el desplegado. También requerirían el uso de grúas más grandes que necesitan, a su vez, una mayor superficie de terreno en obra.

Es posible reducir el número de componentes de los grupos de barras utilizando grupos similares en tamaño a los N1, o incluso menores. La pregunta es dónde se encuentra el límite de componentes que justifique plantear la viabilidad de un sistema de nudos articulados que se puedan fijar en una posición, o simplemente llevar las barras y los nudos por separado para ensamblar toda la estructura en obra.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

En los grupos M2 y N2 es visible el hecho de que hay 2 barras, una por lado, que quedan sueltas, pero son las que conectan lateralmente con los nudos de los módulos contiguos pertenecientes a otros grupos de barras. La ubicación de estas barras no es arbitraria, tiene como fin que en el proceso de ensamblado nunca quede una barra suelta en la estructura porque el nudo de conexión se habrá colocado previamente.

La eficacia del sistema propuesto se puede ver en los grupos M1, M2, N1 y N2 en el momento de total desplegado y plegado con una reducción considerable en el largo y en la altura de las secciones de malla a cambio de un aumento del ancho similar al de la longitud de la barra. En el caso de los grupos de barra M1 y M2 se podría optimizar más el plegado si se encuentra otra solución del nudo tipo C del borde de esquina.

En el momento de crear los paquetes se puede ver que la diferencia entre el grupo M1 y el grupo M2 está dado por la existencia de las barras en sus extremos. En este ejercicio académico se ha querido ser completamente fiel a la propuesta de plegado de cada uno de los grupos pero, al ver el espacio que ocupan las barras dentro de los contenedores, nos preguntamos si lo más óptimo sería reemplazar los grupos M2 por M1 y transportar las barras sueltas independientemente al resto de grupos de barras.

La diferencia en las medidas de cada uno de los grupos de barras en estado de máximo plegado y transporte se debe a la suposición de que cada uno de los paquetes se embalará con un sistema de protección para el proceso de transporte.

La necesidad de subdividir los grupos M1 y M2 hace patente la necesidad de llevar un estudio más profundo del nudo tipo C, probablemente en 2 nudos independientes que se conecten entre sí.

La organización del material dentro de los contenedores responde a la suposición de que es muy difícil el transporte y almacenamiento de toda la estructura al mismo tiempo, por lo que se ha primado un flujo coherente de paquetes que permitan seguir las fases del proceso de construcción de la estructura.

En caso de que exista la posibilidad de elegir el tamaño de los contenedores para el transporte de la estructura, se elegirían los contenedores de mayor capacidad (40' DV) porque se puede optimizar el espacio en cada transporte y además disminuyen considerablemente el número de viajes necesarios para completar la Hexagrid perimetral.

En este capítulo se ha tratado principalmente el empaquetado y transporte de la Hexagrid perimetral, pero no hay que olvidar que para completar la estructura también hay que tener en cuenta el transporte de la Hexagrid que conforma el núcleo del edificio y de los forjados.

En el caso del núcleo habría que evaluar la viabilidad de utilizar un porcentaje de barras empaquetadas en módulos plegados además de barras sueltas para ensamblar la estructura. En el caso del forjado lo más probable es que se transporten las barras sueltas para ensamblarlas en obra con tornillos o soldadura.

Conclusiones, vías de estudio y
discusión sobre el tema

6.1 Conclusiones y discusión por capítulo

Con el fin de facilitar la lectura de este documento, se recopilan las conclusiones de cada capítulo como paso previo a las conclusiones generales de la investigación.

6.1.1. Conclusiones y discusión del capítulo 1

Todo desarrollo formal en la arquitectura va ligado a un desarrollo tecnológico que lo sustenta. Sin los avances hechos en la industria metalúrgica acompañados del desarrollo de los métodos de cálculo gráficos y, luego, analíticos, hubiera sido imposible conquistar las alturas por parte de los diseñadores. Esta relación se hace visible la estética de los grandes rascacielos de la segunda mitad del siglo XX, donde es más que notable el aporte realizado al plano formal por el desarrollo de estructuras tubulares con diagonales y su evolución hacia el uso de la Diagrid.

El enfoque que se les da a los nuevos estudios relacionados con Diagrid, tomando líneas más orgánicas y curvas con una modulación cada vez más irregular, ha logrado desarrollar un lenguaje mucho más plástico para la concepción de edificaciones. Sin embargo, este enfoque, que por un lado permite optimizar la estructura para edificaciones singulares, se aleja completamente de sistemas estandarizados que puedan ser producidos y reproducidos en masa.

La concepción de la malla Hexagrid puede ser interpretada como una deformación organizada de la Diagrid, tal y como lo plantea de Meijer, o como un entramado modular con sus propias leyes y propiedades que toma como referencia la organización de los átomos de carbono, tal y como lo plantea la HTA Association.

Para los intereses de este trabajo, lo que llama la atención es la capacidad de crear con la Hexagrid una trama regular y modulable, que desde el punto de vista constructivo permitiría crear un conjunto de piezas estandarizadas que podrían adaptarse a situaciones variables.

También es importante resaltar las propiedades que tiene la malla hexagonal de módulo regular, expresadas a través de la conjetura del panel de abeja, que en una superficie estructural implica ahorro de barras y uniones.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

El enfoque que la HTA Association utiliza para el análisis de la malla Hexagrid, con modelos virtuales y maquetas reales a escala, y sus respectivos resultados garantizan que pueden darse pasos en firme y seguros dentro de este sistema.

En los ensayos hechos tanto por de Meijer como por Montuori se constata que la malla Hexagrid muestra un comportamiento estructural competitivo frente a la malla Diagrid, siempre y cuando se tenga en cuenta la rigidez que le pueden otorgar los forjados a la malla.

En cuanto al sismo, se ha comprobado la capacidad resistente del sistema Hexagrid, siendo su ductilidad y la facilidad para modular su rigidez sus 2 puntos fuertes.

Es una lástima que los proyectos basados en Hexagrid, tanto por la HTA Association y MAD Architects, no se hayan llevado a cabo. En todo caso, se considera que este sistema tiene posibilidades de ser viable en un futuro cercano.

6.1.2. Conclusiones y discusión del capítulo 2

La mayoría de soluciones que aquí se presentan pertenecen al entorno de las estructuras ligeras colapsables que, aunque tienen una historia corta porque nacieron en el siglo XX, desde sus inicios se han presentado como fácilmente transportables y de fácil montaje por su plegabilidad.

El correcto equilibrio entre la resistencia de las piezas y la simpleza del mecanismo lleva a buscar un diseño que evite el uso superfluo de material.

De todos los tipos de nudos articulados posibles, se considera que el que tiene más probabilidades de ser utilizado en un posible diseño es el nudo de rotación con un grado de libertad. Por este motivo todos los ejemplos presentados están basados en este tipo de nudo.

Durante la investigación se detectó que la búsqueda de diseños de nudos en registros de patentes era de gran utilidad ya que, independientemente del objeto al que estén destinados, las soluciones se muestran de una forma clara y concisa que resulta fácil de analizar y tomar como referencia para futuros diseños propuestos por el autor de esta investigación.

En general, los ejemplos presentados (patentes de I a VII) intentan encontrar una respuesta al problema de resolver un nudo al que llegan 3 o más barras que tienen la capacidad de rotar independientemente entre sí (patentes II a VII). Esto muestra cómo se pueden crear múltiples soluciones para el mismo problema principal, pero cada solución se ajusta y optimiza para el conjunto de condicionantes propios del sistema al que pertenece el nudo.

En la patente VII se agrega un sistema que funciona mediante un mecanismo sencillo de muelle que permite que cada barra gire independientemente, pero, al mismo tiempo, se autobloquean en su punto de mayor extensión. Para que este sistema sea posible se mueve el punto de pivote al extremo inferior o superior, ya que el nudo es simétrico, para hacerle espacio en el extremo opuesto a otro pivote, lugar en el que se inserta el sistema de autobloqueo.

Los enlaces sobre restringidos tipo Bricard se presentan *a priori* como un concepto que tiene mucho potencial para desarrollarse, pero lamentablemente, tras un estudio más profundo, se hace notorio que el sistema solo funciona en unas condiciones muy específicas de forma del perfil y que las articulaciones se intercalan en el interior y exterior del módulo hexagonal. Así que se ve inviable, al menos de momento, su uso en el plegado de mallas estructurales.

En el momento de proponer un diseño propio se debe tener en cuenta la diferencia de escala, tanto de dimensiones físicas como de esfuerzos que debe soportar la estructura, para crear un modelo que se ajuste a las condiciones de uso. Los ejemplos que se han tocado en este capítulo se han utilizado como referentes para explicar la posible mecánica de la rotación de la articulación, pero nunca podrán utilizarse o imitarse modificando solo el tamaño de sus componentes.

6.1.3. Conclusiones y discusión del capítulo 3

La resolución de los bordes de las superficies, que se forman al cambiar de dirección la malla, afecta al comportamiento global de la estructura.

El sistema de superficies cerradas que forma en las esquinas nuevos módulos geométricos con forma de diamante, ofrece un aumento de la rigidez de la malla disminuyendo las deformaciones y los desplazamientos.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

A nivel global, a medida que aumenta la densidad de la Hexagrid (por ejemplo, de 1 a 2 módulos por piso) o que aumenta el número de módulos a lo ancho de cada una de las superficies que forman la malla (aumenta el ancho de la base del edificio), el efecto de la rigidez causado por el módulo de diamante que se forma en los cambios de dirección se diluye. A nivel local, en cambio, el efecto se diluye solo al aumentar la densidad de la malla.

La modulación de la Hexagrid condiciona la configuración del forjado a través de la disposición de las vigas principales que recogen las cargas. En todo caso es mucho más eficiente diseñar el forjado del entramado siguiendo la semirregularidad de la Hexagrid que buscando una regularidad independiente de la misma.

Encontrar las dimensiones adecuadas para el módulo que va a conformar la Hexagrid es un punto crítico donde hay que mantener un compromiso entre eficiencia estructural (prima la mayor densidad de módulos posible) y eficiencia constructiva (prima el menor número de nudos posible).

Debido a que se trabaja solo con módulos regulares sin capacidad de transformación, las dimensiones que puede tener el edificio tanto en planta como en altura son limitadas y siempre dentro de las posibilidades del entramado hexagonal.

La condicionante del módulo regular indeformable es uno de los mayores puntos débiles del sistema propuesto. Aunque las posibles ventajas que se encuentran en el momento del proceso de estandarizado, construcción y ensamblado de los componentes de la estructura son mayores que las desventajas del dimensionado de la estructura.

El proponer el mismo modelo y modelarlo y calcularlo en diferentes alturas tiene como fin entender el comportamiento de la estructura, tal y como está propuesta, además de encontrar los límites de uso de la configuración planteada. El diseño y cálculo de edificios que llegan a los 15 y 16 pisos, con cerca de 60 m de altura, se hace con interés estrictamente académico, ya que se mantiene que el sistema que se propone debe ser factible y útil en el rango de los 8 pisos de altura.

El crear diseños alternativos englobados dentro de la misma propuesta, con cambios que no afectan al concepto del modelo planteado, sino que buscan en este caso un mejor aprovechamiento del material, sirve para explorar caminos que nos pueden

llevar o no a nuevas soluciones útiles al sistema. En este caso las propuestas englobadas dentro de los modelos tipo A y tipo B se descartaron, ya que los resultados finales o bien eran los mismos que con la metodología de los modelos tipo C o variaban tan poco que esa diferencia no representaba una ventaja a tener en cuenta.

La metodología utilizada es bastante convencional y se ha hecho de tal manera que las propiedades aplicadas a los modelos, el cálculo y el dimensionado de la estructura se realizan dentro del entorno que se encuentra en los códigos estructurales europeos. La elección del Eurocódigo 1⁴⁸ y Eurocódigo 3⁴⁹ para el tratamiento de los modelos es hecha en base a la experiencia previa del autor de esta investigación, que se encuentra familiarizado con esta normativa, y a la aceptación mundial de la misma.

El cálculo y el análisis de los modelos propuestos en este capítulo muestran que es posible utilizar la Hexagrid como un sistema estructural para edificaciones, coincidiendo con los estudios descritos en el capítulo 2 de esta investigación.

También se ha encontrado un conjunto de estructuras que tienen unas dimensiones de perfil que se puede decir que son potencialmente construibles, lo que permite continuar con la investigación tomando como referentes los modelos con resultados obtenidos en este capítulo.

A diferencia de una edificación convencional de pórticos, en el modelo de Hexagrid los forjados colaboran activamente en la rigidez de la malla Hexagrid, por lo que se ve un aumento en el canto de las secciones de las vigas IPE de los forjados a medida que aumentan los modelos en altura.

Dentro del modelo propuesto, el peso de la capa de hormigón de los forjados ha condicionado los resultados y el dimensionado de los perfiles de las mallas. Se cree que encontrando la manera de disminuir la cantidad de hormigón utilizado en los forjados se aligeraría la estructura reflejándose directamente en el tamaño, que disminuiría, y en el espesor de los perfiles utilizados en la Hexagrid.

⁴⁸ EN 1991-1-4:2005.

⁴⁹EN 1993-1-4:2006.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

La viabilidad de la Hexagrid como un sistema estructural que pueda ser prefabricado, transportado y ensamblado dependerá del diseño de la unión que permita construir la malla con las condicionantes propuestas. Ese es el siguiente punto en el que se enfocará esta investigación.

6.1.4. Conclusiones y discusión del capítulo 4

Para ver el potencial del nudo que aquí se propone y diseña, se ha tomado como referencia de modelo de edificación una estructura que se encuentra en el límite de altura que permiten las condiciones de entorno y configuración planteados en las edificaciones Hexagrid previamente analizadas. Es probable que el sistema propuesto funcione mejor en edificaciones de menor altura.

La elección del nudo sin conexión con los forjados se justifica cuando se intenta utilizar una intersección de barras que sea representativa por la concentración de esfuerzos que existen en ese punto. Pero, al mismo tiempo, se evita aumentar la complejidad del modelo con la introducción de esfuerzos transversales al nudo.

El sistema de plegado propuesto tiene como fin reducir el volumen de transporte de la estructura. Se cree que logrando este objetivo las potenciales posibilidades de uso de las mallas Hexagrid pueden elevarse considerablemente, sobre todo en zonas de Latinoamérica, donde el acceso es limitado y es complicado disponer de la maquinaria necesaria para realizar una construcción convencional.

Como consecuencia del entorno de uso del sistema, se ha buscado que las piezas del nudo sean pocas y que puedan tener cierto nivel de dualidad en el uso. De ahí la elección de la posición de los pasadores para lograr que la articulación permita el movimiento, o de la forma de la pieza Tipo B, que sirve para bloquear el movimiento de las articulaciones del nudo en la fase de transporte. El correcto equilibrio entre resistencia de las piezas y la simpleza del mecanismo lleva a buscar un diseño que evite el uso superfluo de material.

Hay que tener en cuenta la subjetividad en el momento de decidir las áreas de aplicación de fuerzas, la ubicación de las mismas y cómo aplicarlas, tener una sensibilidad que permita una correcta interpretación del posible comportamiento del sistema de

fuerzas en la realidad, porque esto es lo que hará que los resultados obtenidos del análisis sean válidos.

El proceso de extracción y transformación de los esfuerzos obtenidos en cargas puntuales aplicables es sencillo una vez formulados todos sus pasos y utilizando un programa específico que, de ser necesario, permite la reproducción de datos de otros nudos que respondan a los mismos parámetros geométricos y de alineación con los ejes principales.

Las deformaciones obtenidas como resultado de los análisis son coherentes con las deformaciones del nudo en el modelo de edificación propuesto, lo que implica que hay una correcta correlación entre los modelos.

En el análisis de las tensiones de Von Mises se observa que, para casi todos los estados de carga, la tensión del material está por debajo del 30% de la tensión admisible, y que la concentración de esfuerzos se concentra en el ángulo que forman los brazos del nudo.

Con las condiciones de apoyo aplicadas, las deformaciones máximas cuando se encuentran en los extremos de los brazos deben tomarse como una tendencia y no como un valor absoluto.

Las deformaciones siguen un patrón similar al que muestra el modelo de barras de la edificación a la que pertenece este nudo.

Es necesario crear modelos de elementos finitos más complejos y aplicar cálculos no lineales para entender más profundamente el comportamiento plástico de las piezas.

La eficiencia del diseño radica en lo compacto que pueda llegar a ser el nudo, y esto es más fácil de lograr si los esfuerzos provenientes de las barras tienen magnitudes que permiten distribuir las entre el menor número de pernos posibles, por lo que el sistema funcionará mejor en edificaciones de baja altura con menores esfuerzos.

6.1.5. Conclusiones y discusión del capítulo 5

Se puede observar que las dimensiones del nudo tipo A, correspondiente a la Hexagrid perimetral del modelo que se está analizando, mantienen la densidad visual de la malla respecto a la longitud y espesor de las barras que la componen.

Los nudos tipo B y tipo C son resultado de un ajuste de la geometría y las dinámicas de diseño utilizadas en el modelo tipo A. Estos diseños se pueden tomar como una referencia formal, pero se deben someter a análisis funcionales y validaciones estructurales para obtener los modelos definitivos. En todo caso, los nudos presentados cumplen la función de completar el sistema de la Hexagrid perimetral y así poder explicar su funcionamiento.

La cimentación que se plantea en la etapa 0 del ensamblado de la estructura no es más que una guía que marca unas directrices de diseño con el fin de que la zapata trabaje con esfuerzos predominantes de compresión y que se eviten complicaciones causadas por los esfuerzos laterales de las barras. En todo caso, desarrollar el cálculo y diseño de una cimentación solo será posible cuando se conozcan las particularidades del terreno en el que se va a implantar la estructura.

La distribución de barras y nudos en las fases de plegado planteadas quiere responder al compromiso entre la longitud de las barras, la manejabilidad de los grupos de barras, tanto plegadas como desplegadas, y la facilidad de empaque y transporte en los contenedores.

Se podrían empaquetar las barras en grupos mayores pero, teniendo en cuenta que el peso de los grupos actuales ya ronda la tonelada, elementos de mayor envergadura podrían ser complicados de manejar tanto en el plegado como en el desplegado. También requerirían el uso de grúas más grandes que necesitan, a su vez, una mayor superficie de terreno en obra.

Es posible reducir el número de componentes de los grupos de barras utilizando grupos similares en tamaño a los N1, o incluso menores. La pregunta es dónde se encuentra el límite de componentes que justifique plantear la viabilidad de un sistema de nudos articulados que se puedan fijar en una posición, o simplemente llevar las barras y los nudos por separado para ensamblar toda la estructura en obra.

En los grupos M2 y N2 es visible el hecho de que hay 2 barras, una por lado, que quedan sueltas, pero son las que conectan lateralmente con los nudos de los módulos contiguos pertenecientes a otros grupos de barras. La ubicación de estas barras no es arbitraria, tiene como fin que en el proceso de ensamblado nunca quede una barra suelta en la estructura porque el nudo de conexión se habrá colocado previamente.

La eficacia del sistema propuesto se puede ver en los grupos M1, M2, N1 y N2 en el momento de total desplegado y plegado con una reducción considerable en el largo y en la altura de las secciones de malla a cambio de un aumento del ancho similar al de la longitud de la barra. En el caso de los grupos de barra M1 y M2 se podría optimizar más el plegado si se encuentra otra solución del nudo tipo C del borde de esquina.

En el momento de crear los paquetes se puede ver que la diferencia entre el grupo M1 y el grupo M2 está dado por la existencia de las barras en sus extremos. En este ejercicio académico se ha querido ser completamente fiel a la propuesta de plegado de cada uno de los grupos pero, al ver el espacio que ocupan las barras dentro de los contenedores, nos preguntamos si lo más óptimo sería reemplazar los grupos M2 por M1 y transportar las barras sueltas independientemente al resto de grupos de barras.

La diferencia en las medidas de cada uno de los grupos de barras en estado de máximo plegado y transporte se debe a la suposición de que cada uno de los paquetes se embalará con un sistema de protección para el proceso de transporte.

La necesidad de subdividir los grupos M1 y M2 hace patente la necesidad de llevar un estudio más profundo del nudo tipo C, probablemente en 2 nudos independientes que se conecten entre sí.

La organización del material dentro de los contenedores responde a la suposición de que es muy difícil el transporte y almacenamiento de toda la estructura al mismo tiempo, por lo que se ha primado un flujo coherente de paquetes que permitan seguir las fases del proceso de construcción de la estructura.

En caso de que exista la posibilidad de elegir el tamaño de los contenedores para el transporte de la estructura, se elegirían los contenedores de mayor capacidad (40' DV) porque se puede optimizar el espacio en cada transporte y además disminuyen considerablemente el número de viajes necesarios para completar la Hexagrid perimetral.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

En este capítulo se ha tratado principalmente el empaquetado y transporte de la Hexagrid perimetral, pero no hay que olvidar que para completar la estructura también hay que tener en cuenta el transporte de la Hexagrid que conforma el núcleo del edificio y de los forjados.

En el caso del núcleo habría que evaluar la viabilidad de utilizar un porcentaje de barras empaquetadas en módulos plegados además de barras sueltas para ensamblar la estructura. En el caso del forjado lo más probable es que se transporten las barras sueltas para ensamblarlas en obra con tornillos o soldadura.

6.2. Conclusiones generales

Esta tesis nace de la necesidad de prefabricar y transportar una estructura en entornos pertenecientes a Latinoamérica donde el desarrollo tecnológico se concentra en las grandes capitales políticas y económicas. Se ha planteado resolver el problema mediante la traslación de 2 sistemas constructivos a escalas diferentes a las de su uso convencional para elaborar una nueva propuesta.

En este documento queda claro que el uso de la Hexagrid horizontal, como parte de un sistema tubular, es potencialmente viable para ser construida dentro del rango de escala que se propone en el capítulo 3, algo que concuerda con los estudios previamente realizados sobre el tema por varios autores.

La decisión de no utilizar pilares limita el área de forjado de los posibles edificios. Como solución, si se plantea a la Hexagrid como un sistema de muros huecos, es posible crear nuevos diseños en el que todas sus partes puedan ser plegables.

Otra solución extrema pasaría por renunciar a la plegabilidad de cierta parte de la estructura, como se hizo con los forjados en los modelos planteados, y utilizar pilares que preferentemente solo soportarían cargas verticales, ya que las cargas horizontales serían responsabilidad de las mallas estructurales.

Hay que tener en cuenta que la inclusión de elementos estructurales dentro del volumen del edificio resta cierta versatilidad en los posibles cambios de uso en el tiempo de vida de la edificación.

Durante el desarrollo del sistema de plegado en el capítulo 4 (a nivel de nudo) y en el capítulo 5 (a nivel de malla) el transporte de grandes secciones de malla plegadas es una meta potencialmente viable, limitada por el peso máximo manejable de las piezas, siendo necesario el uso de grúas para la edificación estudiada de 8 pisos. De hecho, se llega a la conclusión de que el sistema tiene más posibilidades de ser utilizado en edificaciones con una altura menor a 8 pisos.

El diseño del nudo, y en general de la estructura, ha tenido presente que en algún momento será desarmada y reparada. De ahí que se prefiera el uso de uniones con pasadores que permitan un desmontado total o puntual de la estructura. Es importante que

durante el diseño del resto de los componentes de la edificación se tenga este punto en cuenta.

El sistema, tal y como está propuesto ahora, presenta ciertos puntos que requieren un mayor estudio para poder pasar a una etapa de diseño industrial.

La posibilidad de aligerar el peso de la estructura. Por un lado, en este estudio se limitó el espesor de las secciones de las barras dentro de la clase 1 y clase 2, por lo que un análisis más profundo y detallado podría permitir el uso de perfiles de clase 3 o 4. Por otro lado, aunque se confía que el diseño geométrico del nudo tipo A es una solución muy adecuada, hay todavía bastante trabajo en relación al análisis de modelos finitos más complejos que permitan ver la interacción entre las diferentes piezas que componen el nudo. Esto, unido al análisis en laboratorio de elementos reales, puede llevar a un dimensionado más afinado de las platinas de acero.

La relación entre mallas y forjados. Desde el punto de vista de la rigidez del forjado que colabora en el funcionamiento estructural de la malla para proponer elementos constructivos más ligeros que cumplan con las necesidades de la estructura.

Verificar la viabilidad económica y la sustentabilidad de la estructura. Utilizando diferentes casos de estudio se puede comparar la Hexagrid con otras tipologías estructurales convencionales dentro de un territorio específico, con el fin de analizar su competitividad y pertinencia en el entorno en el que se quiere implantar el sistema.

El diseño del pasador en el que se articula la barra debe ser capaz de permitir el giro de su respectiva barra para después transmitir los esfuerzos entre las barras y los nudos sin permitir desplazamiento alguno.

El despliegue y estabilización de las secciones de Hexagrid durante el proceso de ensamblado. Teniendo en cuenta que la malla, debido al diseño de los nudos, tiene más de un grado de libertad, las barras no se despliegan de una forma uniforme y cada una necesita ser ajustada y asegurada en su posición independientemente. Cuando se está trabajando con grupos de barras que en su conjunto pesan alrededor de una tonelada y cuyas dimensiones alcanzan los 7 metros de altura, es recomendable profundizar en el protocolo que se puede utilizar.

En todo caso, la propuesta aquí presentada se encuentra en un estado embrionario, marcando una línea a seguir para profundizar en el entendimiento y funcionamiento de la Hexagrid plegable y poder implementar su uso a medio plazo de acuerdo a las normativas y exigencias propias del sitio donde se plantee construir.

6.3. Futuras vías de estudio

Durante la realización de esta investigación se han encontrado diferentes posibles enfoques de trabajo que, partiendo de un conocimiento común, pueden convertirse en soluciones a problemas tanto del ámbito del diseño y cálculo estructural como del ámbito de la construcción. A continuación se detallan aquellas que el autor de este trabajo considera con mayor potencial de exploración.

El comportamiento de la Hexagrid en el núcleo de una estructura tubular. Este documento se ha enfocado en el estudio del comportamiento de la Hexagrid como malla perimetral en un sistema tubular, aunque también es posible estudiar la malla que compone el núcleo, con la configuración descrita en el capítulo 4, y compararla con otras de diferentes densidades para desarrollar una estructura más eficiente.

La Hexagrid más allá del sistema tubular entendiendo a la Hexagrid como una superficie laminar independiente que puede llegar a funcionar como un muro que permite el tránsito a través suyo, teniendo suficiente rigidez estructural para portar cargas verticales al mismo tiempo que ofrece resistencia lateral en un solo sentido. La porosidad y ligereza de esta superficie rígida puede tener un potencial uso en la rehabilitación de estructuras basadas en muros portantes de ladrillo.

Estructuras Hexagrid plegables para estructuras no ortogonales. Sería interesante adaptar el sistema y el nudo a los diferentes grados de inclinación de una serie de modelos cuya planta tenga ángulos diferentes a 90 grados, o incluso una planta circular. A propósito del análisis del cambio de dirección en la Hexagrid, encontrar los rangos de inclinación en los que vale la pena continuar la modulación de la malla o generar superficies independientes que se unan entre sí.

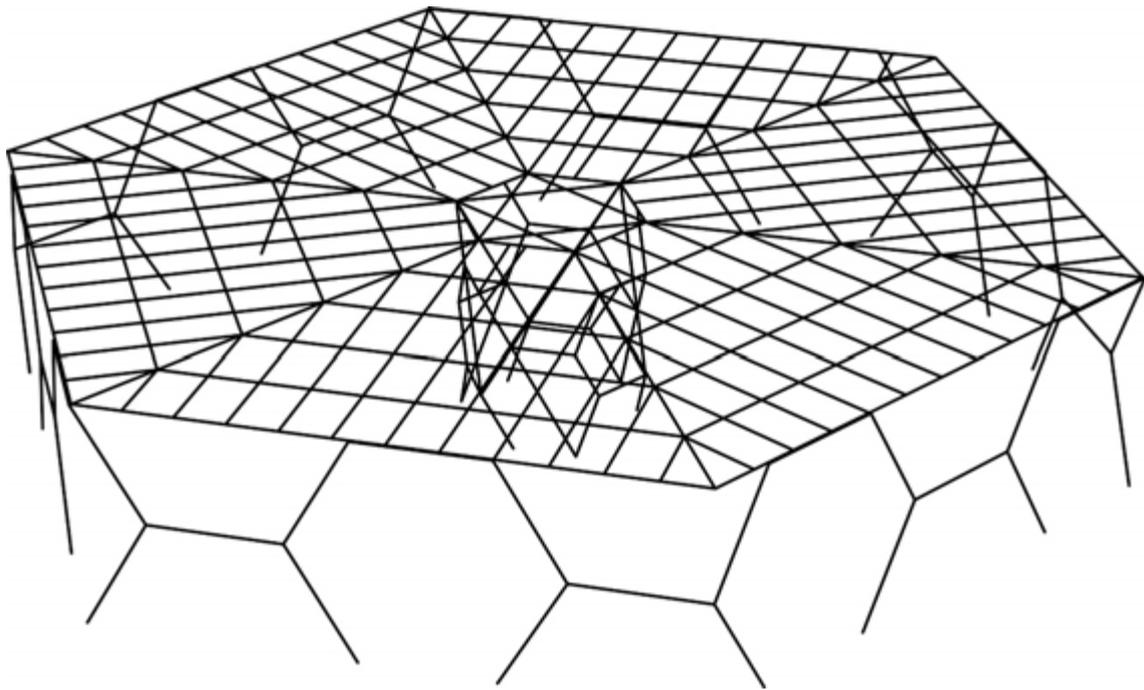


Ilustración 108: Base edificación con Hexagrid con planta hexagonal

Refuerzos dentro del sistema de las Hexagrid plegables utilizando el trabajo sobre fractales desarrollado por la HTA Association, buscando la forma de aplicar a una malla principal subdimensionada otras, de mayor densidad, que aporten rigidez a aquellas zonas de la estructura sometidas a esfuerzos críticos. Esta superposición de Hexagrids, cada una siguiendo su propia lógica de plegabilidad, puede ser una herramienta para aligerar el peso de los componentes de la estructura facilitando su transporte y ensamblado.

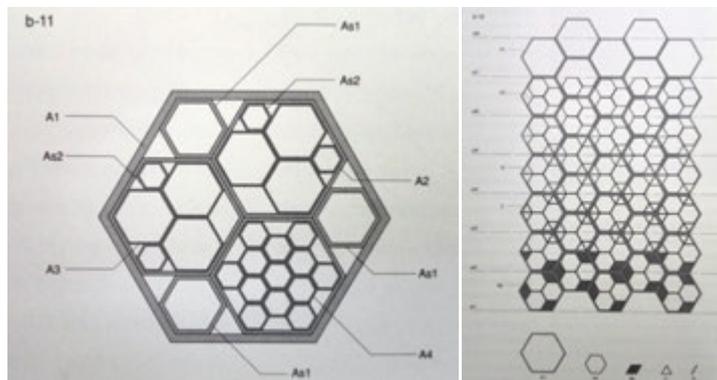


Ilustración 109: Posibilidades del módulo hexagonal y su uso dentro de una malla o entramado. (HTA Association, 2008)

La Hexagrid como base geométrica para una estructura de madera, que es el futuro en la industria de la construcción gracias a la sustentabilidad del proceso para obtener madera certificada. Aunque conceptualmente el funcionamiento de una estructura de barras de acero y de madera es similar, los detalles constructivos son completamente diferentes, por lo que se podría desarrollar un sistema paralelo ajustado al nuevo material.

Estudio del comportamiento estructural del nudo previamente diseñado mediante elementos finitos tridimensionales frente a los elementos finitos bidimensionales utilizados en este estudio con el uso de un software más potente que permita modelar independientemente cada una de las piezas del diseño para determinar cómo interactúan entre sí y con su respectiva barra. A partir de este estudio más profundo se pueden afinar los espesores de sección del material utilizado ahorrando peso.

Análisis de todos los tipos de nudos, más allá del nudo tipo A. Esto incluye los nudos tipo B, los nudos tipo C y, especialmente, los nudos tipo A que se conectan a los forjados. Este análisis y proceso de validación puede llevar a soluciones diferentes a las presentadas en esta investigación.



Ilustración 110: Nudo tipo A (izq.), nudo tipo B (centro) y nudo tipo C (der.) para edificio de 8 pisos tipo C

La Hexagrid, su cimentación y comportamiento frente a cambios de temperatura aplicando unas condiciones de entorno conocidas y definiendo el tipo de fachada que va a tener el edificio se deben llevar a cabo los estudios antes mencionados. Probablemente este tema pasa a ser importante cuando el sistema estructural propuesto sale del entorno académico y pasa a ser analizado para su construcción inminente.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Forjados plegables que se adapten al sistema Hexagrid plegable y que permitan reemplazar el sistema de forjado convencional propuesto en esta investigación. Se considera que se puede encontrar una solución partiendo de la modulación hexagonal, que ofrece una distribución de cargas en 3 direcciones en contraposición a las 2 direcciones posibles de los sistemas actuales.

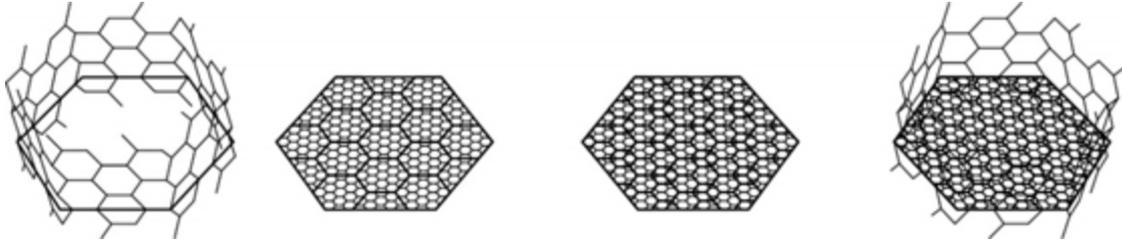


Ilustración 111: Posible forjado basado en Hexagrid

6.4. Discusión sobre el tema

El sistema Hexagrid fue probado, diseñado y discutido por la HTA Association en la primera década del siglo XXI, y hasta el momento su implementación en proyectos reales es testimonial. Se cree que las razones más potentes para que suceda esto está en el diseño de las uniones, pero es necesaria una investigación más profunda para entender si la implementación de la Hexagrid será puesta en marcha en el futuro y qué hace falta para que esto sea posible.

En todo momento, durante el proceso de esta investigación, se ha supuesto el uso del sistema en entornos urbanos en proceso de consolidación que requieren de la construcción de nuevas infraestructuras en lotes vacíos. Es probable que esta perspectiva pueda llegar a chocar con la tendencia a reutilizar el territorio previamente consolidado, densificándolo si es necesario. Lo que lleva a preguntarse si es posible ajustar el sistema Hexagrid al reforzamiento de estructuras de edificaciones que puedan ser rehabilitadas.

Transportar estructuras no ligeras plegadas para su despliegue en obra es una idea que puede ser explorada más allá de la Hexagrid, aunque se llega a la conclusión que con el módulo hexagonal se alcanza el compromiso óptimo entre la densidad de la malla y la longitud de las barras. Aunque puede ser que otro tipo de geometrías pueda sacar provecho de esta iniciativa.

Al encontrar que el peso es el mayor condicionante para la factibilidad del plegado de la estructura, surge la pregunta de cuál es el rango en el que vale la pena plegar la malla y no llevar las barras y los nudos sueltos para ensamblarlos en el sitio.

Incluso se puede ir más allá y cuestionarse si realmente vale la pena utilizar recursos para desarrollar un sistema articulado para una estructura que, probablemente, se plegará una sola vez durante toda su vida útil. En todo caso, se considera que el ámbito académico es el adecuado para realizar este tipo de exploraciones. Porque el conocimiento nace de hacerse nuevas preguntas que lleven a nuevas respuestas, lo que algunas veces permite dar pasos (pequeños pasos) hacia el avance de la humanidad.

Bibliografía

- Anon., 2014. [En línea]
Available at: (<https://www.grupotecmared.com/images/paper//20140506-128-herramienta-enerbuilca-figura1.jpg>)
- Banco Mundial, 2017. *datos.bancomundial.org*. [En línea]
Available at: `<iframe src="https://datos.bancomundial.org/share/widget?indicators=SP.URB.TOTL.IN.ZS&locations=EC-1W-ZJ&name_desc=true" width='450' height='300' frameborder='0' scrolling="no" ></iframe>`
[Último acceso: 8 Noviembre 2018].
- Beaulieu, B. J., 1986. Estados Unidos, Patente nº US4627210.
- Billington, D. P., 1985. *The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering*. Princeton: Princeton University Press.
- Boake, T., 2013. *Diagrid Structures: Innovation and Detailing*. Portugal, s.n.
- Bouten, S., 2015. *Transformable Structures and their Architectural Application*. Gent: s.n.
- Calatrava, S., 1993. Sobre la plegabilidad de entramados.. En: *Arquitectura Transformable*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Sevilla., p. 33.
- Cantos Coronel, H. A., 2015. *Mallas desplegadas sometidas a compresión: Diagrids y Hexagrids prefabricadas como estructuras resistentes a carga para edificaciones de mediana altura*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña..
- Cantos, H., 2015. *Mallas Desplegadas Sometidas a Compresión*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña..
- Chen, Y., 2003. *Design of Structural Mechanisms*. Oxford: University of Oxford.
- Computers and Structures, Inc., 2017. *SAP2000 - 31 Automated Wind Loads: Watch & Learn*. [En línea]
Available at: https://youtu.be/Sn_VokPsKw4
- Darbansari, S. K. & NezamAbadi, M. F., 2017. A Comparative Study on Seismic Performance of Hexagrid, Diagrid and Tubular Structural Systems. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics* 7, pp. 55-65.

de Meijer, J., 2012. *Lateral Stiffness of Hexagrid Structures*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.

EFE, 2018. *Agencia EFE*. [En línea]
Available at: <https://www.efe.com/efe/espana/sociedad/la-humanidad-habra-agotado-manana-los-recursos-naturales-anuales-de-tierra/10004-3341589>
[Último acceso: 27 11 2018].

Engel, H., 2001, 2015. Sistemas de estructuras de vector activo.. En: *Sistemas de estructuras / Sistemas estruturais*. 1ra. Edición, 10a, tirada. ed. Barcelona: Editorial GUSTAVO GILI, S.L., p. 133.

Engel, H., 2015. *Sistemas de estructuras / Sistemas estruturais*. primera. ed. Barcelona: Gustavo Gili, S.L..

English, E., 2005. Vladimir Shukhov and the Invention of Hyperboloid Structures.. pp. 1-9.

Escrig, F., 1993. Las estructuras de Emilio Pérez Piñero.. En: *Arquitectura Transformable*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, pp. 9-32.

Escrig, F., Pérez Valcarcel, J. & Sanchez Sanchez, J., 1996. Las cubiertas desplegadas de malla cuadrangular. *Boletín Académico No. 20*, pp. 37-46.

Franco, J. T., 2011. *plataformaarquitectura.cl*. [En línea]
Available at: https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-85315/en-detalle-containers/dry_container
[Último acceso: 19 julio 2019].

Franco, R., 2010. *Hacia una Arquitectura móvil*.. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Fuller, R., 1965. Estados Unidos, Patente nº US3197927A.

Gil Llorca, J., 2019. http://www-pagines.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/rob_ia2/index.html. [En línea]
Available at: http://www-pagines.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/rob_ia2/elem1.htm

Goldsmith, M., 1953. *The Tall Building: The Effects of Scale*. Chicago: Illinois Institute of Technology.

Hales, T. C., 1999. *The Honeycomb Conjecture*. [En línea]
Available at: <https://arxiv.org/abs/math/9906042>

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Hero, L., 2009. *Wikimedia.org*. [En línea]
Available at: https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Sears_Tower_looking_up.jpg

Hoberman, C., 1993. *Iris Dome working scale model*. [Arte] (Chuck Hoberman fonds Collection Centre Canadien d'Architecture).

HTA Association, 2007. *Honeycomb Tube Architecture*. En: Tokio: s.n., p. 32.

HTA Association, 2008. *Honeycomb Dynamics Architecture*. Tokio: The HTA Association & Shinkenchiu - Sha.

HTA Association, 2009. *Honeycomb Tube Architecture Technology*. Tokio: The HTA Association, SHIKENCHIKU-SHA.

Iyengar, H., 2000. Reflections on the Hancock Concept. *CTBUH Review*, pp. 44 - 51.

Korsavi, S. & Maqhareh, M. R., 2014. The Evolucionary Process of Diagrid Structure Towards Architectural, Structural an Sustainability Concepts: Reviewing Case Studies.. *Architectural Engineering Technology*, Volumen 3.

Kubica, R. L. & Crandell, B. E., 2015. Estados Unidos, Patente n° US9163425 B1.

Lee, H.-U. & Kim, Y.-C., 2017. Simple Model for Preliminary Design of Hexagrid Tall Building Structure. *Journal of the Korea Academia-Industrial*, pp. 13-20.

MAD Architects, 2018. *ARCH2O*. [En línea]
Available at: <https://www.arch2o.com/sinosteel-international-plaza-mad-architects/>

MAD Arquitects, 2018. *i-mad.com*. [En línea]
Available at: <http://www.i-mad.com/work/sinosteel-international-plaza/?cid=4>

Mashhadiali, N. & Kheyroddin, A., 2013. Proposing the hexagrid system as a new structural system for tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, pp. 1310-1329.

Mashhadiali, N. & Kheyroddin, A., 2014. Progressive collapse assesment of new hexagrid structural system for tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, pp. 947-961.

Montuori, G. M., 2015. *Innovative Structural Solutions for Tall Buildings*. Naples: University of Naples Federico II.

Montuori, G. M., Fadda, M., Perrella, G. & Mele, E., 2015. Hexagrid - Hexagonal tube structures for tall buildings: patterns, modeling and design.. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*.

Montuori, G. M., Mele, E., Brandonisio, G. & De Luca, A., 2014. Geometrical patterns for diagrid buildings: Exploring alternative design strategies from the structural point of view. *Engineering Structures*, pp. 112-127.

Moon, K., 2009. Design and Construction of Steel Diagrid Structures. *NSCC2009*, pp. 398-405.

Moon, K.-S., Connor, J. J. & Fernandez, J. E., 2007. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design.. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, pp. 205-230.

Nejad, P. A. & Kim, J., 2011. Beehive (Hexagrid), New Innovated Structural System for Tall Buildings. *CTBUH 2011 Seoul Conference*, pp. 485-500.

Path2k6, 2006. *Wikimedia.org*. [En línea]
Available at:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Hancock_tower_2006.jpg

Pérez Valcárcel, J., Munoz Vidal, M., López César, I. & Suárez Riestra, F., 2018. España, Patente nº ES2653648 B2.

Samuel, F. L., 2018. Estados Unidos, Patente nº US9976319 B2.

Señis, R., 2014. *Optimización de mallas estructurales de acero envolventes en edificios en altura*.. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña..

Sev, A., 2001. Integrating Architecture and Structural Form in Tall Steel Building Desing.. *CTBUH REVIEW*, pp. 24-30.

Tam, V. W., Tam, C. & Ng, W. C., 2007. Towards adoption of prefabrication in construction. *Building and Enviroment*, 42(10), pp. 3642-3654.

Taranath, S., Mahantesh, N. & Patil, M., 2014. Comparative Study of Pentagrid and Hexagrid Structural System for Tall Building. *Journal of Civil Engineering and Enviromental Technology*, pp. 10-15.

TORR., J. G., 1917. Estados Unidos, Patente nº US1226724.

Weingardt, R. G., 2011. Fazlur Rahman Khan, The Eistein of Structural Engineering. *Structure magazine*, pp. 44-46.

Hexagrids plegables y transportables: Un sistema prefabricado con nudos articulados.

Weisstein, E. W., 2001. *Honeycomb Conjeture*. [En línea]
Available at: <http://mathworld.wolfram.com/HoneycombConjecture.html>

Zeigler, T. R., 1981. Estados Unidos, Patente n° US4280521.

Zeigler, T. R., 1989. Estados Unidos, Patente n° US4838003.

Zhao, F. & Chonghou, Z., 2015. Diagonal arrangements of diagrid tube structures for preliminary design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, pp. 159-175.

ANEXOS

Anexo 1: (De)constructing and analysing a joint.

Publicado en www.archidoct.net en julio del 2019.

ISSN: 2309-0103.

archi|DOCT

*The e-journal for the
dissemination of doctoral
research in architecture*

July 2019

www.archidoct.net

ISSN 2309-0103

13

FORCES

Listed in:
Scopus[®]



(De)constructing and analysing a joint

Hector Cantos Coronel // ETS Arquitectura del Vallès, Universitat Politècnica de Catalunya

Abstract

This paper discusses the possibility of designing a pin joint that is also easy to fasten in position in order to support the stresses of a conventional and not lightweight structure. It is believed that it is possible to prefabricate a structural system based on a Hexagrid configuration that can be folded, transported, deployed and assembled. The model is produced by means of a process that goes from geometric functional design of the joint to validation of its structural resistance using a finite element model through which stresses and deformations will be analysed in order to find a stable solution that is feasible to build.

Keywords

Hexagrid; Joint; Foldable; Modular

I. Introduction

The content of this article is part of broader research that attempts to find a prefabricated and transportable structural system to be implemented in areas of Latin America, where technology is concentrated around large cities but where there is a great need to create new infrastructure in areas relatively far from development poles, where there are no facilities to implement modern building systems.

1.1 *Using tubular systems*

The systematic development of tubular structural systems in buildings started in the Master's thesis completed by Myron Goldsmith in 1953, under the supervision of Mies Van de Rohe, at the Illinois Institute of Technology, Chicago. That thesis proposed three types of tube structure: variable irregular Diagrid frame, narrow regular Diagrid frame and a solution of mega-trusses (Goldsmith, 1953). Fazlur Rhaman Khan paid greater attention to the development of the mega-truss system, while the other two systems proposed have been developed more recently, since construction technology has allowed it and since the need to achieve taller buildings with more complex volumes has demanded it (Montuori, 2015).

1.2 *The Diagrid system*

The Diagrid system consists of a tubular structure composed solely of diagonal bars that are capable of transporting the vertical and lateral forces of a building without columns. Its diamond configuration, together with the rigidity of the slabs, allows axial behaviour of the forces in the bars, which makes it a very efficient system that at the same time has great aesthetic potential in the design of architectural elements. Since the beginning of the 21st century, architect Norman Foster and ARUP have used the Diagrid concept in their designs¹ (Boake, 2013) and it has started to become used more frequently to resolve high-rise building structures.

1.3 *The Hexagrid system*

Operating in antithesis to the mainstream² (HTA Association, 2007), the development of an architectural language based on hexagons has gathered momentum over time in a non-linear yet continuous way, taking as examples Buckminster Fuller's geodesic frames seen at the 1957 World's Fair in Montreal or the contemporary Islamic architecture of Zvi Hecker with Alfred Neumann. One of the major reasons for using hexagonal frames in architecture is based on verifying the honeycomb conjecture, which was mathematically demonstrated at the end of the twentieth century. The conjecture states that a regular hexagonal grid is the best way to divide a surface into regions of equal area with the least total perimeter (Hales, 1999).

The HTA Association hypothesised that a tube structural system might be developed based on hexagonal modular frames that are rigid enough to be considered viable for use in the construction of building structures. This system was called honeycomb tube. The honeycomb tube system demonstrated as a way of designing and building at all scales is explained, from planning to possible application, in three informative books^{3 4 5}.



1.4 Foldability of structural frames

The idea of packaging complete sections of structure to reduce their volume is nothing new. In fact, for lightweight structures there are several solutions based on bars that can be folded for transport and then deployed and placed in situ (Escrig, 2013).

Although there are certain types of structural framework with the capacity to stabilise their position of use, normally at the cost of subjecting their elements to great stresses during the deployment process (Franco, 2010), which can even lead to deformation of the structure, such as the experimental developments of Bricard linkages (Chen, 2003), the majority of frames need elements to be added in order to stabilise their shape and behaviour as a structure, either in the form of cables or bars. A framework may be stabilised by changing a pin joint to a fixed joint. This task often requires complex designs that adapt to the scale, building possibilities and stresses that the structure will have to support. In the search for pin joints that can be stable in their position of use, we have looked at joint patents at different scales, ranging from camera tripods⁶ to the design of lightweight structures^{7,8,9}.

2. Description of the structure to be resolved

Within a set of previously developed and analysed multi-storey building models, ranging from four floors to 15 floors, the tallest possible building height for the proposed conditions is taken as a sample. This square-based building has a volume contained in a parallelepiped, the dimensions of which are 16.17 m by 16.17 m at the base by 52.5 m height. The structural layout is tubes within tubes, which spreads the load distribution between the perimeter structure and a core. The perimeter tubular system is made up of four surfaces identical in their geometry and the load distribution means that each face is subject to equivalent stresses, with behaviour and deformation that can be correlated. Each surface is composed of a horizontal hexagonal frame five hexagonal modules wide by 15 hexagonal modules high. Of all the joints and bars that make up the perimeter frames, joint number 14, corresponding to the intersection of bars 11, 12 and 17, was chosen as a reference. The choice of this joint is justified in the structural analysis indicating that, within the type of joints receiving three bars, it is this joint in which the greatest amount of stress is concentrated (Figure 1 and Figure 2).

2.1 Choice of profile type

The profiles used are rectangular hollow tubes, similar to those used in analyses conducted by other authors (Montuori, et al., 2015) and (de Meijer, 2012), as they simplify the joint design and also work for structures subject to bending and compression.

3. Frame folding method

With a Hexagrid we are looking for a packaging system that, by taking advantage of the vacuum that exists between bars, reduces the volume of the frame as much as possible, with the intention of being able to transport sections of frame as large as possible, reducing and simplifying the assembly work required on the building site (Figure 3 and Figure 4).

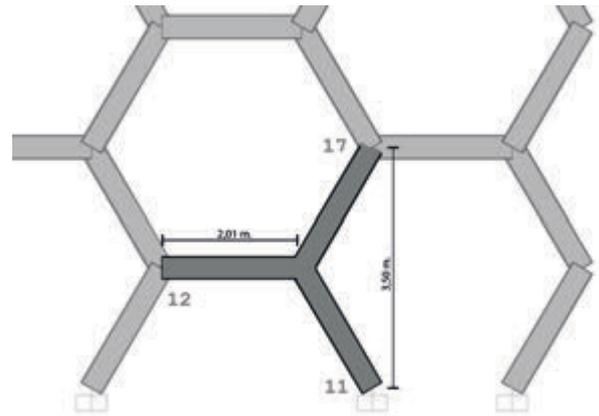
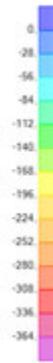
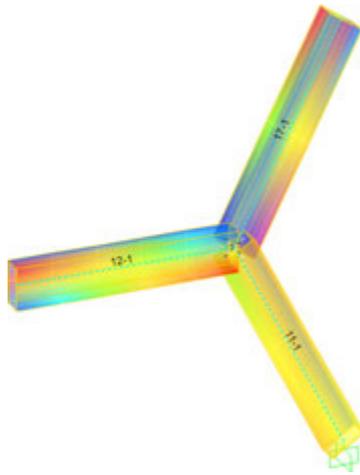


Figure 1.

Bars 11, 12 and 17 stress diagram (N/mm² S11 Max/Min. UDSTL7)

Figure 2.

Joint no. 14. Intersection of bars 11, 12 and 17

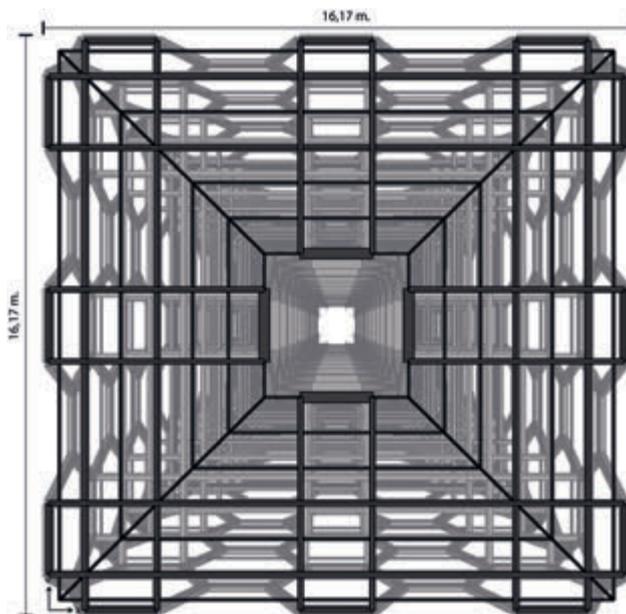


Figure 3.

Hexagrid building structure, floor plan distribution

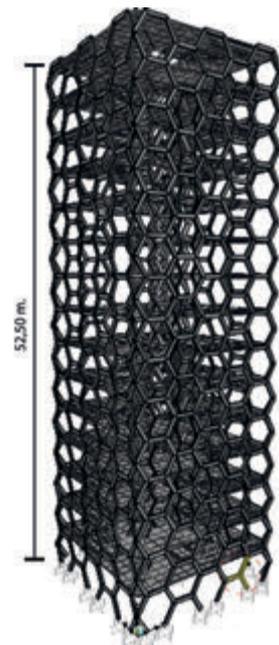


Figure 4.

Hexagrid building structure, axonometric

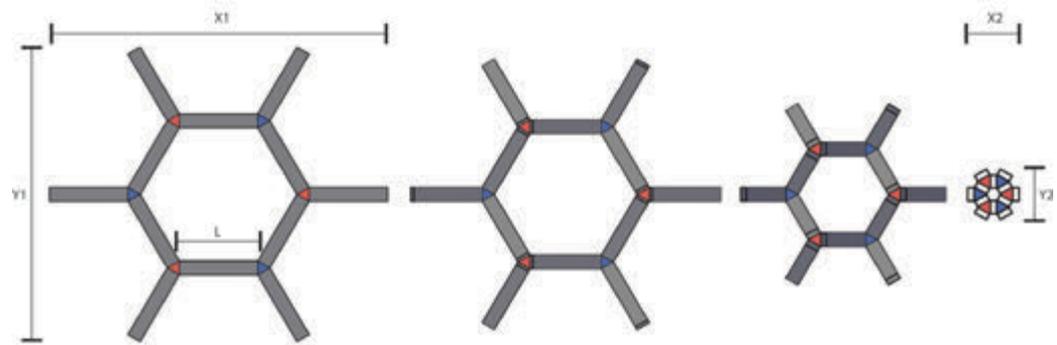


Figure 5.

Conceptual folding of the system, plan view

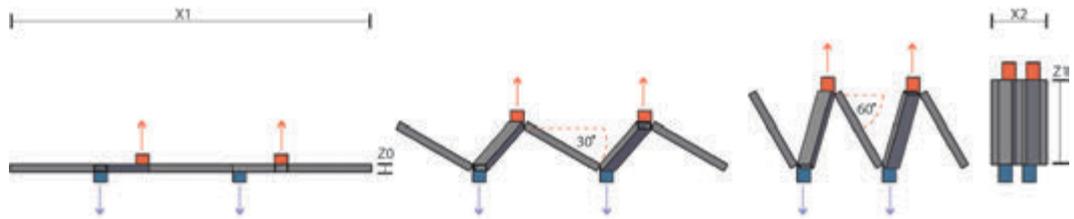


Figure 6.

Conceptual folding of the system, elevation view

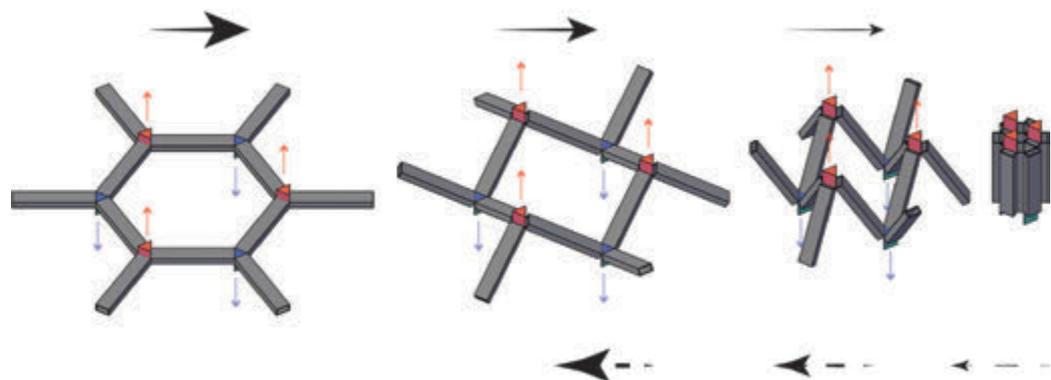


Figure 7.

Conceptual folding of the system, axonometric

3.1 *The folding system*

The frame is defined as an ordered set of joints connected by means of bars that form a surface that extends in the X plane, and with measurements $X1, Y1$ and $Z0$ modulated by means of regular hexagons, each side of which has the same L dimension. The intention of the folding system is that by rotating each articulation connecting the three arms that make up the joint with their respective bars, the frame is transformed into a volume with measurements $X2, Y2$ and $Z1$ so that measurements $X2$ and $Y2$ are smaller than $X1$ and $Y1$, tending hypothetically to zero, while $Z1$ reaches a measurement similar to L. To validate the folding method, it must be possible to return to the frame's initial state (Figure 5, Figure 6 and Figure 7).

4. Joint design conditions and limitations

In order to meet the expectations of the mechanism/structure duality, the design of a hybrid joint with the following characteristics is required:

- Simple mechanisms with simple fastening methods.
- Small number of parts.
- Standardisation of parts.
- Possibility of replicating and adapting the model to different load requirements within the logic of the system.

The design process takes into account that the material used will be S355 steel joined by welding and that connections with bars will be done using bolts.

4.1 *Scope of the design*

Three types of joints are required to assemble the Hexagrid frame:

A: a joint that receives three equal bars, one along each arm, forming an angle of 120 degrees between any bar and its adjacent bar.

B: a joint connecting the structure to the foundations.

C: a joint at the edge of the structural frame that receives two bars and connects the frame with its adjacent frame at the corners.

This article will look at joint type A, since types B and C may be considered designs derived from the original model.

5. Designing the joint type A

The design methodology applied corresponds to linear and delimited phases. A more in-depth description of the design phases is explained below.

5.1 *Geometric and functional design*

From the dimensions taken from the building model, a series of joint models are made that evolve to a level that meets the proposed conditions. Each piece of the model takes a section thickness within the range of 80% to 120% of the section thickness of the bars. In order to look at the joint and check the way it operates, a 1:5 scale model is printed in 3D, in which the pros and cons of the model are noted for correction.



Figure 8.

Model of finite modules by colour for the application of section thicknesses

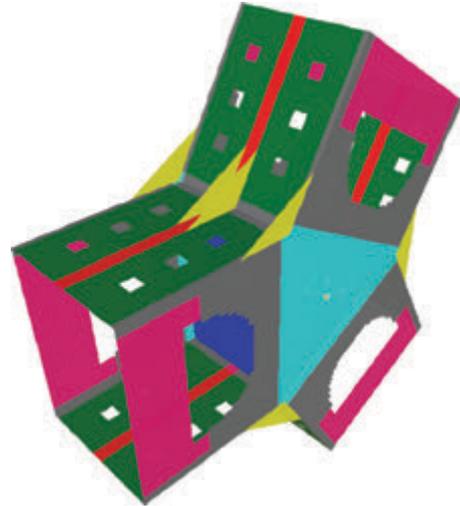


Figure 9.

Model of finite modules with section thicknesses applied

| Finite element thickness applications | | | | | |
|---------------------------------------|----------|-----------------|--------|--------|-------|
| Group | Layer | Thickness (mm.) | | | |
| | | Bar | Part A | Part B | Total |
| 1 | Red | 12.5 | 12.5 | | 25.0 |
| 2 | Yellow | | | 8.0 | 8.0 |
| 3 | Green | 12.5 | 12.5 | 10.0 | 35.0 |
| 4 | Sky blue | | | 10.0 | 10.0 |
| 5 | Blue | | | | 0.0 |
| 6 | Lilac | 12.5 | | | 12.5 |
| 7 | Grey | 12.5 | | 10.0 | 22.5 |

Table 1.

Distribution of section thicknesses in finite element models

| Bar | Flange | Colour |
|-----|--------|----------|
| 11 | A | Lilac |
| | B | Yellow |
| 12 | A | Grey |
| | B | Blue |
| 17 | A | Green |
| | B | Sky blue |

Table 2.

Colours of force application groups per bar



Figure 10.

Location of force application points in joint type

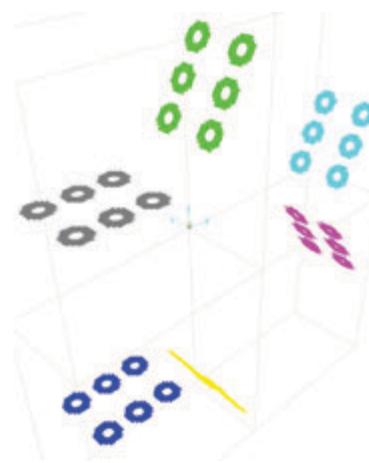


Figure 11.

Diagram of force application groups explained in colour

5.2 Constructing the finite element model

The aim is to be able to transform the results of the search process into a comparable yet simplified model that can be made in design¹⁰ software and entered into the interface of the structural analysis software¹¹. We have created a three-dimensional model composed of two-dimensional finite elements, assigning the material corresponding to S355 steel to these modules, with the determined thickness. In order to facilitate the application of section thickness properties, different layers corresponding to a specific thickness are used (Figure 8, Figure 9 and Table 1).

5.3 Force application area

The equivalent forces of each bar are distributed in the upper and lower flanges of each of the model's arms, causing the joint loads to be distributed across the vertexes of the finite elements around the holes through which the joint parts would be connected to the bars via pins (Table 2). The forces are distributed between 384 points per group on each flange on each of the arms (Figure 10 Figure 11).

5.4 Obtaining forces

From the previous analysis of the overall building model, numerical stress data is obtained for nine load cases corresponding to bars 11, 12 and 17 in the joint from the building model (Table 3).

| Frame | Joint | Output Case | F1 | F2 | F3 | M1 | M2 | M3 |
|-------|-------|-------------|----------|--------|----------|--------|---------|-------|
| Text | Text | Text | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 1236.89 | -18.04 | -2405.28 | -1.88 | 133.40 | -8.15 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -2510.33 | 0.34 | -13.39 | -0.28 | -16.19 | -0.22 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | 1273.44 | 17.70 | 2418.67 | 2.16 | -117.21 | 8.37 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 955.14 | -10.71 | -1824.85 | -6.90 | 86.43 | -5.03 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -1910.71 | 0.14 | 0.80 | -0.11 | -0.34 | 0.22 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | 955.58 | 10.57 | 1824.05 | 7.01 | -86.09 | 4.81 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 1125.05 | -9.86 | -2062.61 | -6.31 | 66.34 | -4.42 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | -2086.89 | 0.43 | 95.97 | -0.35 | 95.49 | -0.07 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | 961.84 | 9.43 | 1966.65 | 6.67 | -161.83 | 4.49 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 785.23 | -11.56 | -1587.08 | -7.49 | 106.52 | -5.65 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -1734.54 | -0.15 | -94.37 | 0.13 | -96.18 | 0.52 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | 949.31 | 11.71 | 1681.45 | 7.36 | -10.34 | 5.13 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 753.32 | -5.78 | -1414.25 | -9.58 | 55.44 | -2.92 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | -1485.50 | 0.00 | 9.24 | 0.00 | 9.10 | 0.49 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | 732.18 | 5.78 | 1405.01 | 9.58 | -64.54 | 2.43 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 1156.95 | -15.64 | -2235.44 | -4.22 | 117.43 | -7.15 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -2335.93 | 0.27 | -7.64 | -0.22 | -9.79 | -0.04 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | 1178.97 | 15.37 | 2243.08 | 4.45 | -107.64 | 7.19 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 1183.72 | -8.41 | -2117.24 | -5.36 | 48.26 | -3.60 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | -2095.27 | 0.60 | 159.30 | -0.50 | 159.27 | -0.28 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | 911.55 | 7.81 | 1957.94 | 5.85 | -207.53 | 3.88 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 617.36 | -11.25 | -1324.68 | -7.31 | 115.23 | -5.65 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -1508.01 | -0.37 | -157.93 | 0.30 | -160.17 | 0.71 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 890.66 | 11.62 | 1482.61 | 7.01 | 44.95 | 4.94 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 564.18 | -1.62 | -1036.64 | -10.80 | 30.09 | -1.10 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | -1092.95 | -0.11 | 14.75 | 0.09 | 15.28 | 0.65 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | 528.77 | 1.73 | 1021.89 | 10.71 | -45.37 | 0.45 |

Table 3.

Resisted forces in joint type, extracted from the building model



| Frame | Joint | Output Case | F(A)Apl. kN | | | F(B)Apl. kN | | |
|-------|-------|-------------|-------------|--------|---------|-------------|--------|---------|
| | | | F1A | F2A | F3A | F1B | F2B | F3B |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 759.61 | -20.97 | -958.13 | 759.61 | -31.57 | -958.13 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -1255.16 | 0.50 | 27.57 | -1255.16 | -1.10 | 27.57 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | 760.75 | 20.47 | 994.50 | 760.75 | 32.67 | 994.50 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 569.03 | 3.49 | -754.01 | 569.03 | -35.50 | -754.01 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -955.36 | 0.86 | 1.13 | -955.36 | 0.23 | 1.13 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | 568.89 | -4.34 | 754.24 | 568.89 | 35.28 | 754.24 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 632.73 | 3.55 | -909.71 | 632.73 | -32.12 | -909.71 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | -1043.44 | 1.05 | -154.11 | -1043.44 | -0.94 | -154.11 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | 652.17 | -4.61 | 686.71 | 652.17 | 33.05 | 686.71 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 505.33 | 3.42 | -598.30 | 505.33 | -38.89 | -598.30 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -867.27 | 0.67 | 156.36 | -867.27 | 1.39 | 156.36 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | 485.60 | -4.08 | 821.76 | 485.60 | 37.50 | 821.76 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 435.32 | 17.99 | -605.52 | 435.32 | -36.12 | -605.52 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | -742.75 | 1.03 | -14.64 | -742.75 | 1.03 | -14.64 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | 434.38 | -19.01 | 584.22 | 434.38 | 35.10 | 584.22 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 702.74 | -11.01 | -902.49 | 702.74 | -34.88 | -902.49 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -1167.96 | 0.69 | 16.89 | -1167.96 | -0.58 | 16.89 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | 703.39 | 10.32 | 924.25 | 703.39 | 35.46 | 924.25 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 642.93 | 3.31 | -970.16 | 642.93 | -26.96 | -970.16 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | -1047.63 | 1.10 | -257.43 | -1047.63 | -1.70 | -257.43 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | 675.38 | -4.41 | 598.60 | 675.38 | 28.66 | 598.60 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 430.61 | 3.08 | -451.14 | 430.61 | -38.25 | -451.14 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -754.01 | 0.46 | 260.03 | -754.01 | 2.17 | 260.03 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 397.77 | -3.54 | 823.69 | 397.77 | 36.08 | 823.69 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 313.93 | 27.36 | -463.17 | 313.93 | -33.64 | -463.17 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | -546.48 | 1.06 | -24.97 | -546.48 | 1.57 | -24.97 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | 312.40 | -28.42 | 427.78 | 312.40 | 32.07 | 427.78 |

Table 4.
Forces applicable (FApl) to joint type
model

| Frame | Joint | Output Case | F(A)Apl.point (384 points) kN | | | F(B)Apl.point (384 points) kN | | |
|-------|-------|-------------|----------------------------------|--------|--------|----------------------------------|--------|--------|
| | | | F1A | F2A | F3A | F1B | F2B | F3B |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 1.978 | -0.055 | -2.495 | 1.978 | -0.082 | -2.495 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -3.269 | 0.001 | 0.072 | -3.269 | -0.003 | 0.072 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | 1.981 | 0.053 | 2.59 | 1.981 | 0.085 | 2.59 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 1.482 | 0.009 | -1.964 | 1.482 | -0.092 | -1.964 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -2.488 | 0.002 | 0.003 | -2.488 | 0.001 | 0.003 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | 1.481 | -0.011 | 1.964 | 1.481 | 0.092 | 1.964 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 1.648 | 0.009 | -2.369 | 1.648 | -0.084 | -2.369 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | -2.717 | 0.003 | -0.401 | -2.717 | -0.002 | -0.401 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | 1.698 | -0.012 | 1.788 | 1.698 | 0.086 | 1.788 |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 1.316 | 0.009 | -1.558 | 1.316 | -0.101 | -1.558 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -2.259 | 0.002 | 0.407 | -2.259 | 0.004 | 0.407 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | 1.265 | -0.011 | 2.14 | 1.265 | 0.098 | 2.14 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 1.134 | 0.047 | -1.577 | 1.134 | -0.094 | -1.577 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | -1.934 | 0.003 | -0.038 | -1.934 | 0.003 | -0.038 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | 1.131 | -0.05 | 1.521 | 1.131 | 0.091 | 1.521 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 1.83 | -0.029 | -2.35 | 1.83 | -0.091 | -2.35 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -3.042 | 0.002 | 0.044 | -3.042 | -0.001 | 0.044 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | 1.832 | 0.027 | 2.407 | 1.832 | 0.092 | 2.407 |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 1.674 | 0.009 | -2.526 | 1.674 | -0.07 | -2.526 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | -2.728 | 0.003 | -0.67 | -2.728 | -0.004 | -0.67 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | 1.759 | -0.011 | 1.559 | 1.759 | 0.075 | 1.559 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 1.121 | 0.008 | -1.175 | 1.121 | -0.1 | -1.175 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -1.964 | 0.001 | 0.677 | -1.964 | 0.006 | 0.677 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 1.036 | -0.009 | 2.145 | 1.036 | 0.094 | 2.145 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 0.818 | 0.071 | -1.206 | 0.818 | -0.088 | -1.206 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | -1.423 | 0.003 | -0.065 | -1.423 | 0.004 | -0.065 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | 0.814 | -0.074 | 1.114 | 0.814 | 0.084 | 1.114 |

Table 5.
Point forces applicable (FApl.point) to
joint type model

5.5 Transforming forces into applicable joint loads

In order to be able to apply the forces extracted from the building model to the joint model, resisted forces (F1, F2, F3, M1, M2 and M3) need to be transformed into applicable point forces (F1A, F2A, F3A; F1B, F2B and F3B). Moments (M1, M2 and M3) are transformed by simple geometric processes into applied forces, with a characteristic direction and sign. Once the magnitudes equivalent to the moments are obtained, they are added vectorially where they correspond to the magnitudes of forces (F1, F2 and F3) in the original model (Table 4 and Table 5).

5.6 Calculation and analysis of model type A

Once the mechanical properties, forces and support conditions of the model have been applied, it is analysed using Sap2000 V.20 software. A static linear calculation is performed for each of the load cases applied. The parameters analysed are: maximum absolute Von Mises stresses and deformations.

5.7 Support conditions and application of loads

To analyse Von Mises stresses, fixed support conditions are used at the end of bar 12, while the loads corresponding to bars 11 and 17 are applied to their respective flanges. To analyse deformations, fixed support conditions are used at the ends of bars 12 and 17, while their respective forces are applied to bar 11 (Table 6).

5.8 Von Mises analysis

When analysing the maximum absolute Von Mises stresses, the aim is to find areas where forces are concentrated which may jeopardise the stability of the parts, and to make the respective geometric amendments to counteract the tendencies observed. Knowing that the nominal yield strength (f_y) of S355 steel is equal to 355 n/mm^2 , the stress analysis is done graphically with a range between 100 n/mm^2 and 355 n/mm^2 (Table 7).

5.9 Deformation analysis

The deformation analysis seeks to ensure that the displacement of the joint arms does not affect the correct functioning of the general structure to which they belong (Table 8 and Figure 12).

6. Description of the joint type A model

The model consists of three parts made of S355 steel, a central part (TYPE A) that acts as a skeleton and two twin parts (TYPE B) that cover the first part symmetrically on each side. The result of the design process resolves the articulations of the bars forming the joint in such a way that the joint has radial symmetry and bilateral symmetry.



| | | |
|--------------------------------|--|---|
| Model type A / 12. (VMS) |  | Forces applied to 11A and 11B. 17A and 17B. |
| Model type A / 12-17. (Def) |  | Forces applied to 11A and 11B. |

Table 6.

Joint type model with supports and applied forces for Von Mises stress and deformation analysis

| Maximum deformation in mm. | | | | |
|----------------------------|---------------------|-----------|-----------|-------------------|
| Model: | 12 17 (Free bar 11) | | | |
| Case | Max def X | Max def Y | Max def Z | Max resulting def |
| UDSTL10 | 0.449 | -0.165 | -0.341 | 0.588 |
| UDSTL2 | 0.323 | -0.132 | -0.267 | 0.439 |
| UDSTL3 | 0.331 | -0.117 | -0.315 | 0.471 |
| UDSTL4 | 0.316 | -0.148 | -0.220 | 0.412 |
| UDSTL5 | 0.238 | -0.117 | -0.214 | 0.341 |
| UDSTL6 | 0.410 | -0.149 | -0.321 | 0.541 |
| UDSTL7 | 0.318 | -0.111 | -0.331 | 0.472 |
| UDSTL8 | 0.292 | -0.151 | -0.174 | 0.372 |
| UDSTL9 | 0.166 | -0.098 | -0.164 | 0.253 |

Table 8.

Maximum deformation joint type / 12-17

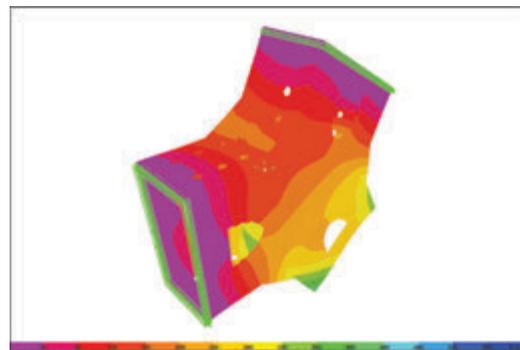


Figure 12.

Maximum resulting deformation UDSTL10 model type / 12-17 (mm)

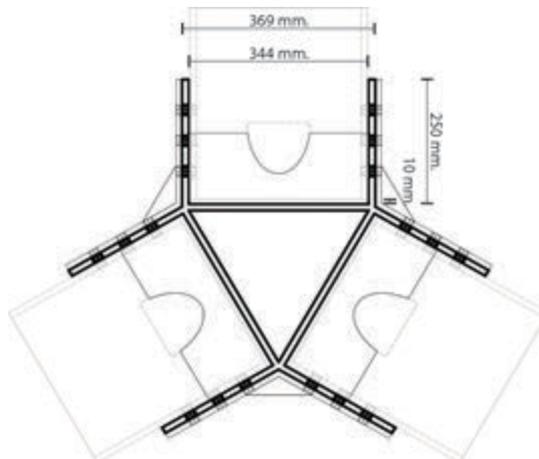


Figure 13.

Type A part, plan view

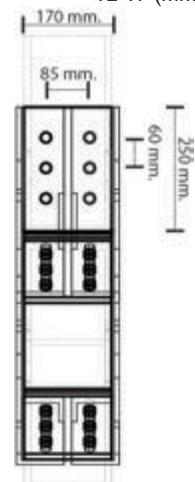


Figure 14.

Type A part, elevation view

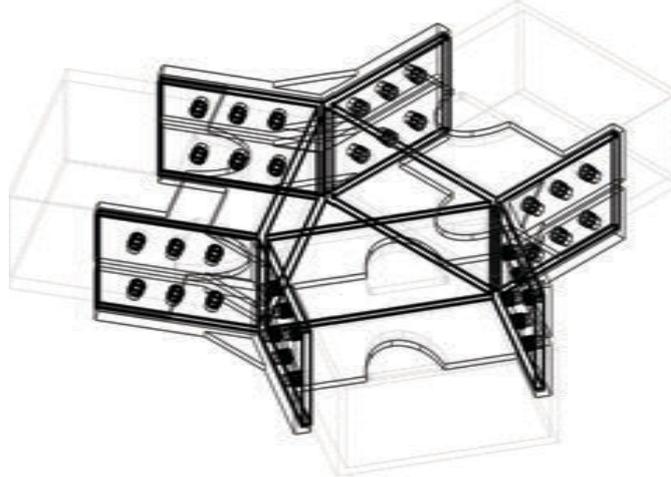


Figure 15.
Type A part, axonometric

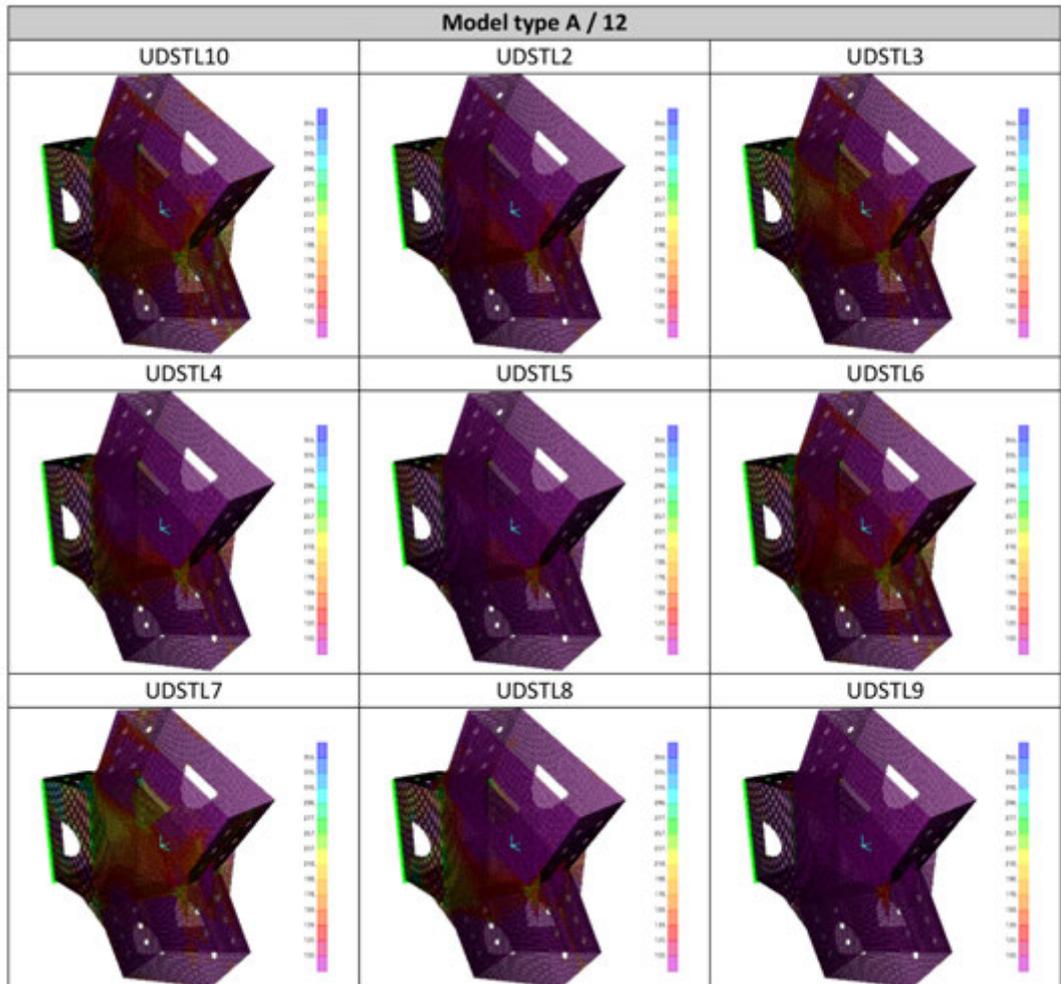


Table 7.
Maximum absolute SVM stress analysis (n/mm²)

6.1 *Type A part*

The core of the part is three steel plates welded together to form an equilateral triangle. This triangle has three symmetrical arms, each made up of two steel plates with three pairs of holes that help, through bolts and pins, to connect the bars to the parts of the joint (Figure 13, Figure 14 and Figure 15).

6.2 *Type B part*

The part comprises a large steel plate, the shape of which resembles a triangle that covers and goes beyond the surface of the type A part and appendages, of the same material and thickness, symmetrically located on each of the arms of the joint (Figure 16, Figure 17 and Figure 18).

These appendages or flanges are perforated in such a way that their holes coincide in number, position and length with the holes of the type A part and extend longitudinally beyond the limits of the superficial steel plate. The type A part is attached to two type B parts and to the bars by means of screws screwed under pressure. In addition, each arm of the joint includes a pin in the pair of holes furthest from the centre, which acts as a pivot to allow the necessary rotation of the bars (Figure 19 and Figure 20).

7. Application of the folding system

The foldability of the system is achieved by creating an articulation in each of the three arms thanks to a pin allowing each of the bars to be rotated. Releasing the free type B part makes it possible for the bars to rotate 90°, going from a vertical position (folded) to a horizontal position (deployed). The type B part is then repositioned and secured (Figure 21, Figure 22, Figure 23 and Figure 24).

8. Conclusion

- The proposed joint allows for packing of the framing bars, which means that the structure will be easier to prefabricate and transport.
- When we move away from the field of lightweight structures, the geometry of the joint mechanism is subordinate to its structural functioning, so that the joint must be capable of supporting and efficiently transferring the building's own forces.
- The right balance between the resistance of parts and the simplicity of the mechanism has led us to look for a design that avoids superfluous use of materials.
- In response, we have tried to reduce to a minimum the number of joint parts and ensure that they have dual purpose, hence the choice of the position of the pins to achieve articulation, or the shape of the type B part, which serves to stop the joint moving during transport.
- Despite not having a connection with the slabs, joint number 14 of the building model is chosen as we are seeking a joint that is representative due to concentration of forces, but at the same time avoids elevating the complexity of the model by introducing shear forces to the joint.
- In the Von Mises stress analysis it is observed that, for almost all load cases, the material stress is below 30% of the allowable stress, and that the concentration of stress is centred on the angle formed by the joint arms.
- With the support conditions applied, the maximum deformations at the ends of the arms should be taken as a trend rather than an absolute value.

- The deformations follow a pattern similar to that shown by the bar model of the building to which this joint belongs.
- More complex finite element models need to be created and non-linear calculations applied to understand the plastic behaviour of the parts in greater depth.
- The efficiency of the design lies in how compact the joint can be. This is easier to achieve if the stresses from the bars have magnitudes that allow them to be distributed among the least number of bolts possible, which means that the system works best for low buildings with less load.

Notes

- (1) See London City Hall (2002), Swiss Re (2001-2003) and Hearst Tower (2003-2006).
- (2) “Hexagonal architecture does not form a single flow in history, nor has it ever generated a dominant trend. However, looking back upon it now, we might perhaps say that these designs have always played the role of posing an antithesis to the main current”.
- (3) “Honeycomb Tube Architecture: The spatial potentialities of hexagons” (2007).
- (4) “Honeycomb Dynamics Architecture” (2008).
- (5) “Honeycomb Tube Architecture Technology” (2009).
- (6) Locking Means for tripods (TORR., 1917).
- (7) Hub Assembly for Collapsible Structure (Beaulieu, 1986).
- (8) Tent System Employing an Improved Spider Hub and Associated Frame Structure and Method of Compacting the Frame for Reduced Storage Size (Samuel, 2018).
- (9) Self-locking joint for folding structures (Pérez Valcárcel, et al., 2018).
- (10) Autodesk AutoCAD 2017.
- (11) In this case, SAP2000 V.19 software has been chosen.

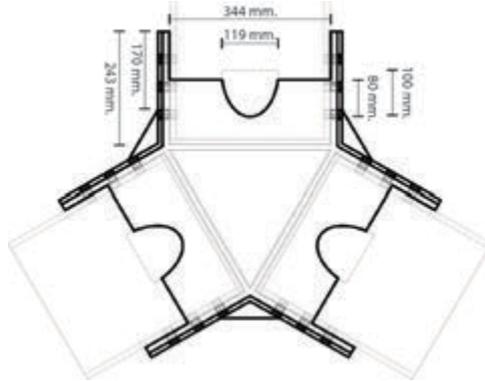


Figure 16.
Type B part, plan view

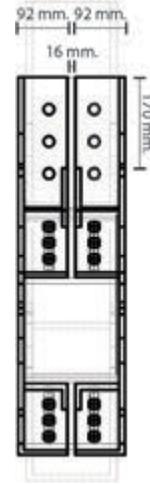


Figure 17.
Type B part, elevation view

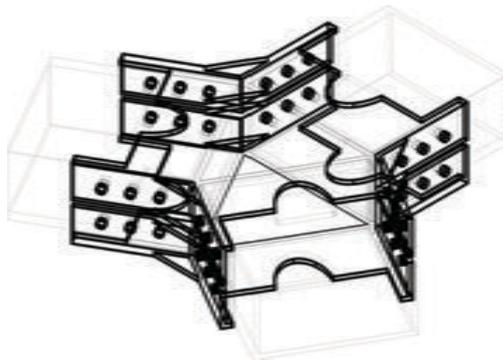


Figure 18.
Type B part, axonometric

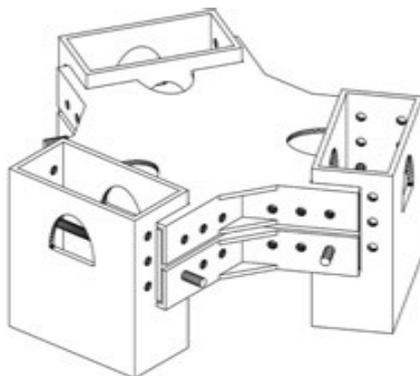


Figure 19.
Joint with bars folded, axonometric

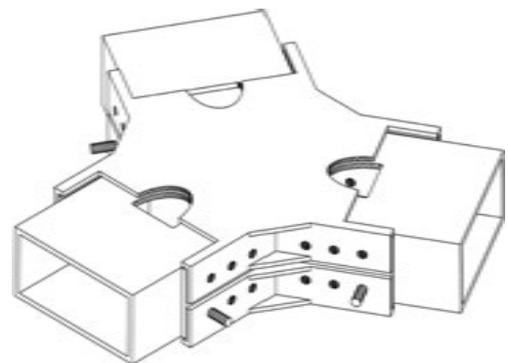


Figure 20.
Joint with bars deployed, axonometric

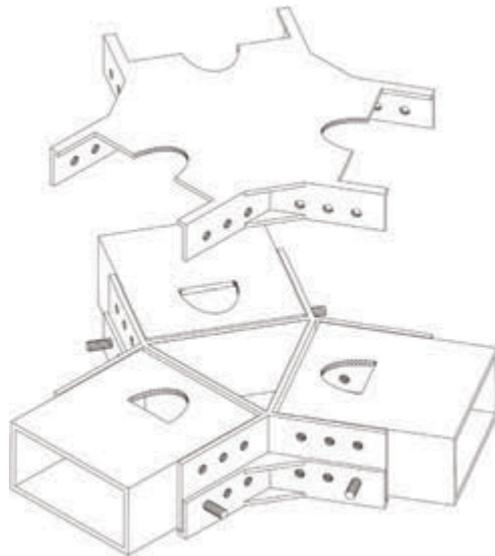


Figure 21.
 Folding process 1, axonometric

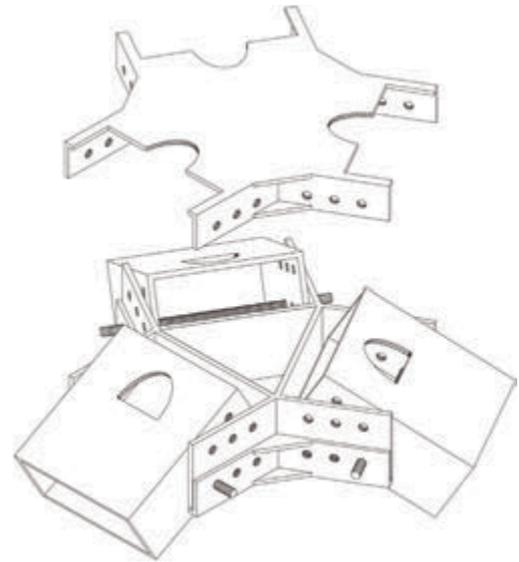


Figure 22.
 Folding process 2, axonometric

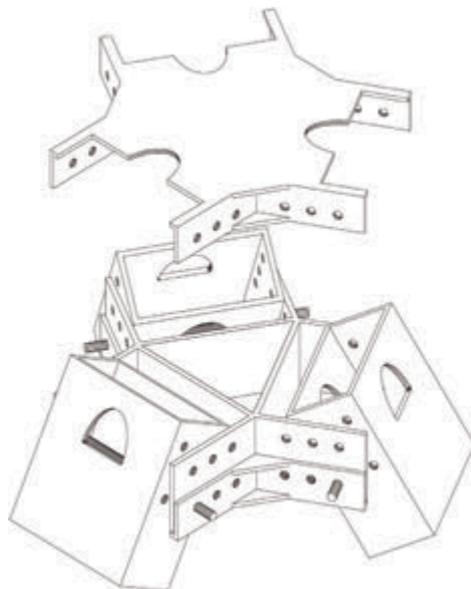


Figure 23.
 Folding process 3, axonometric

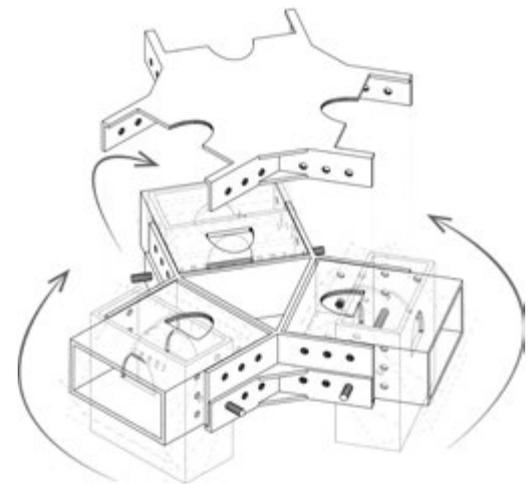


Figure 24.
 Bar deployment process, axonometric

References

- Beaulieu, B. J., 1986. United States, Patent No. US4627210.
- Boake, T., 2013. *Diagrid Structures: Innovation and Detailing*. Portugal, s.n.
- Candela, F. et al., 1993. *Arquitectura Transformable*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.
- Cantos, H., 2015. *Mallas Desplegables Sometidas a Compresión*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Chen, Y., 2003. *Design of Structural Mechanisms*. Oxford: University of Oxford.
- de Meijer, J., 2012. *Lateral Stiffness of Hexagrid Structures*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- Escrig, F., 2013. *Modular, ligero, transformable. Un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Franco, R., 2010. *Hacia una Arquitectura móvil*. Bogotá: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Goldsmith, M., 1953. *The Tall Building: The Effects of Scale*. Chicago: Illinois Institute of Technology.
- Hales, T. C., 1999. The Honeycomb Conjecture. [Online] Available at: <https://arxiv.org/abs/math/9906042>.
- Hales, T. C., 1999. The Honeycomb Conjecture. *Discrete and Computational Geometry*, p. 25.
- HTA Association, 2007. *Honeycomb Tube Architecture*. In: Tokyo: s.n., p. 32.
- HTA Association, 2007. *Honeycomb Tube Architecture*. Tokyo: HTA Association.
- HTA Association, 2008. *Honeycomb Dynamics Architecture*. Tokyo: HTA Association.
- HTA Association, 2009. *Honeycomb Tube Architecture Technology*. Tokyo: HTA Association.
- Korsavi, S. & Maqhareh, M. R., 2014. The Evolutionary Process of Diagrid Structure Towards Architectural, Structural and Sustainability Concepts: Reviewing Case Studies. *Architectural Engineering Technology*, Volume 3.
- Montuori, G. M., 2015. *Innovative Structural Solutions for Tall Buildings*. Naples: University of Naples Federico II.
- Montuori, G. M., Fadda, M., Perrella, G. & Mele, E., 2015. Hexagrid - Hexagonal tube structures for tall buildings: patterns, modeling and design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*.
- Pérez Valcárcel, J., Munoz Vidal, M., López César, I. & Suárez Riestra, F., 2018. España, Patent No. ES2653648 B2.
- Samuel, F. L., 2018. United States, Patent No. US9976319 B2.



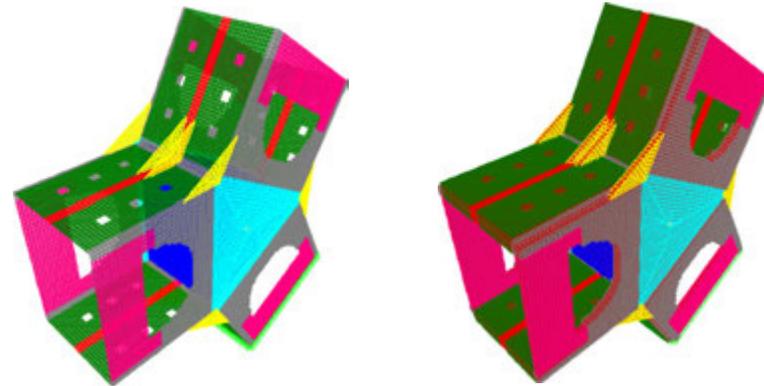
Torr., J. G., 1917. United States, Patent No. US1226724.

Weisstein, E. W., 2001. Honeycomb Conjecture. [Online] Available at: <http://mathworld.wolfram.com/HoneycombConjecture.html>

Anexo 2: Cálculo y diseño de nudo tipo A para propuesta de modelo de edificio tipo C de 8 plantas.

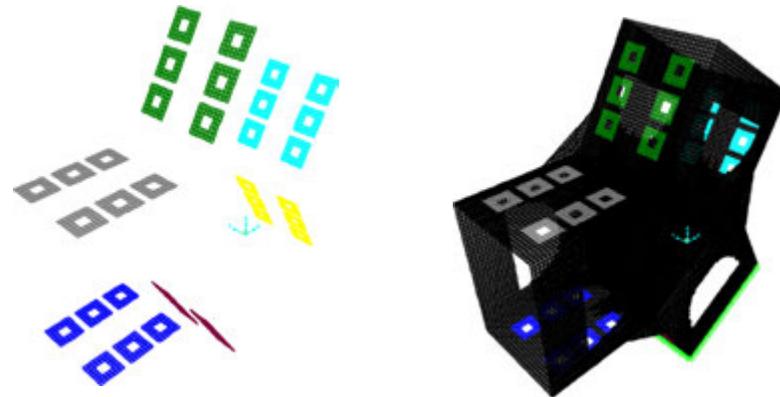
Construcción del modelo de elementos finitos.

| Aplicaciones de espesor en elementos finitos | | | | | |
|--|----------|---------------|---------|---------|-------|
| Grupo | Capa | Espesor (mm.) | | | |
| | | Barra | Pieza A | Pieza B | Total |
| 1 | Rojo | 8,0 | 8,0 | | 16,0 |
| 2 | Amarillo | | | 8,0 | 8,0 |
| 3 | Verde | 8,0 | 8,0 | 6,0 | 22,0 |
| 4 | Celeste | | | 6,0 | 6,0 |
| 5 | Azul | | | | 0,0 |
| 6 | Lila | 8,0 | | | 8,0 |
| 7 | Gris | 8,0 | | 6,0 | 14,0 |



Área de aplicación de las fuerzas.

| Barra | Cordón | Color |
|-------|--------|----------|
| 11 | A | Lila |
| | B | Amarillo |
| 12 | A | Gris |
| | B | Azul |
| 17 | A | Verde |
| | B | Celeste |



Obtención de datos.

| Modelo tipo C 8 pisos | | | Esfuerzos resistidos en nudo | | | | | | Fuerzas equivalentes a momentos M1, M2 y M3 | | | Fuerzas aplicadas. | | | | | | Fuerzas aplicables puntuales. | | | | | |
|-----------------------|-------|-------------|------------------------------|-------|----------|-------|-------|-------|---|---------|--------|--------------------|--------|---------|-------------|--------|---------|-------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|
| Frame | Joint | Output Case | F1 | F2 | F3 | M1 | M2 | M3 | Fm1y | Fm2 | Fm3y | F(A)Apl. kN | | | F(B)Apl. kN | | | F(A)Apl,punt (360 puntos) kN | | | F(B)Apl,punt (360 puntos) kN | | |
| Text | Text | Text | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m | KN | KN | KN | F1A | F2A | F3A | F1B | F2B | F3B | F1 | F2 | F3 | F1 | F2 | F3 |
| 11 | 14 | DSTL10 | 553,39 | -9,98 | -1014,49 | -2,94 | 28,62 | -4,07 | -28,03 | 180,99 | -25,73 | 321,94 | -3,84 | -428,87 | 321,94 | -31,87 | -428,87 | 0,89 | -0,01 | -1,19 | 0,89 | -0,09 | -1,19 |
| 12 | 14 | DSTL10 | 1118,86 | 0,18 | -4,98 | -0,14 | -5,93 | 0,25 | -1,33 | -37,52 | 1,58 | -559,43 | 1,55 | 16,27 | 559,43 | 0,22 | 16,27 | 1,55 | 0,00 | 0,05 | 1,55 | 0,00 | 0,05 |
| 17 | 14 | DSTL10 | 565,46 | 9,80 | 1019,47 | 3,08 | 22,69 | 3,82 | 29,36 | -143,47 | 24,15 | 318,60 | 2,29 | 447,61 | 318,60 | 31,65 | 447,61 | 0,89 | 0,01 | 1,24 | 0,89 | 0,09 | 1,24 |
| 11 | 14 | DSTL2 | 503,24 | -6,53 | -912,45 | -4,08 | 20,85 | -2,88 | -38,84 | 131,84 | -18,21 | 284,58 | 7,05 | -399,14 | 284,58 | -31,79 | -399,14 | 0,79 | 0,02 | -1,11 | 0,79 | -0,09 | -1,11 |
| 12 | 14 | DSTL2 | 1009,49 | 0,01 | -1,10 | -0,01 | -1,68 | 0,54 | -0,05 | -10,61 | 3,44 | -504,74 | 1,75 | 4,76 | 504,74 | 1,70 | 4,76 | 1,40 | 0,01 | 0,01 | 1,40 | 0,01 | 0,01 |
| 17 | 14 | DSTL2 | 506,25 | 6,52 | 913,54 | 4,08 | 19,17 | 2,33 | 38,89 | -121,22 | 14,77 | 283,43 | -8,80 | 404,28 | 283,43 | 30,09 | 404,28 | 0,79 | -0,02 | 1,12 | 0,79 | 0,08 | 1,12 |
| 11 | 14 | DSTL3 | 536,21 | -6,26 | -945,77 | -3,89 | 10,24 | -2,69 | -37,08 | 64,76 | -17,01 | 284,29 | 6,91 | -444,84 | 284,29 | -30,17 | -444,84 | 0,79 | 0,02 | -1,24 | 0,79 | -0,08 | -1,24 |
| 12 | 14 | DSTL3 | 1035,40 | 0,12 | 22,61 | -0,09 | 22,22 | 0,43 | -0,85 | 140,53 | 2,73 | -517,70 | 1,85 | -58,96 | 517,70 | 1,00 | -58,96 | 1,44 | 0,01 | 0,16 | 1,44 | 0,00 | 0,16 |
| 17 | 14 | DSTL3 | 499,20 | 6,15 | 923,17 | 3,98 | 32,46 | 2,26 | 37,93 | -205,29 | 14,28 | 300,92 | -8,75 | 372,69 | 300,92 | 29,17 | 372,69 | 0,84 | 0,02 | 1,04 | 0,84 | 0,08 | 1,04 |
| 11 | 14 | DSTL4 | 470,27 | -6,80 | -879,12 | -4,26 | 31,45 | -3,07 | -40,59 | 198,91 | -19,41 | 284,86 | 7,19 | -353,43 | 284,86 | -33,40 | -353,43 | 0,79 | 0,02 | 0,98 | 0,79 | -0,09 | 0,98 |
| 12 | 14 | DSTL4 | -983,57 | 0,10 | -24,80 | 0,08 | 25,58 | 0,66 | 0,75 | -161,75 | 4,16 | -491,79 | 1,65 | 68,48 | 491,79 | 2,40 | 68,48 | 1,37 | 0,01 | 0,19 | 1,37 | 0,01 | 0,19 |
| 17 | 14 | DSTL4 | 513,31 | 6,90 | 903,92 | 4,18 | -5,88 | 2,41 | 39,85 | -37,16 | 15,26 | 265,94 | -8,84 | 435,87 | 265,94 | 31,00 | 435,87 | 0,74 | 0,03 | 1,21 | 0,74 | 0,09 | 1,21 |
| 11 | 14 | DSTL5 | 456,34 | -4,13 | -820,95 | -4,56 | 15,60 | -2,02 | -43,39 | 98,63 | -12,80 | 252,83 | 13,23 | -367,77 | 252,83 | -30,16 | -367,77 | 0,70 | 0,04 | -1,02 | 0,70 | -0,08 | -1,02 |
| 12 | 14 | DSTL5 | -910,24 | 0,10 | 1,23 | 0,08 | 0,87 | 0,70 | 0,74 | 5,53 | 4,40 | -455,12 | 1,78 | -2,15 | 455,12 | 2,52 | -2,15 | 1,26 | 0,01 | 0,01 | 1,26 | 0,01 | 0,01 |
| 17 | 14 | DSTL5 | 453,90 | 4,23 | 819,72 | 4,48 | 16,47 | 1,33 | 42,66 | -104,16 | 8,40 | 252,99 | -15,01 | 364,76 | 252,99 | 27,65 | 364,76 | 0,70 | 0,04 | 1,01 | 0,70 | 0,08 | 1,01 |

| Modelo tipo C 8 pisos | | | Esfuerzos resistidos en nudo | | | | | | Fuerzas equivalentes a momentos M1, M2 y M3 | | | Fuerzas aplicadas. | | | | | | Fuerzas aplicables puntuales. | | | | | |
|-----------------------|-------|-------------|------------------------------|------|---------|-------|-------|-------|---|---------|--------|--------------------|-------|--------|-------------|-------|--------|-------------------------------|------|------|------------------------------|------|------|
| Frame | Joint | Output Case | F1 | F2 | F3 | M1 | M2 | M3 | Fm1y | Fm2 | Fm3y | F(A)Apl. kN | | | F(B)Apl. kN | | | F(A)Apl,punt (360 puntos) kN | | | F(B)Apl,punt (360 puntos) kN | | |
| Text | Text | Text | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m | KN | KN | KN | F1A | F2A | F3A | F1B | F2B | F3B | F1 | F2 | F3 | F1 | F2 | F3 |
| 11 | 14 | DSTL6 | 550,13 | 8,93 | 1003,94 | -3,60 | 26,10 | -3,73 | -34,28 | 165,04 | -23,62 | 316,33 | 0,87 | 430,51 | 316,33 | 33,41 | 430,51 | 0,88 | 0,00 | 1,20 | 0,88 | 0,09 | 1,20 |
| 12 | 14 | DSTL6 | 1108,73 | 0,12 | -3,42 | -0,09 | -4,23 | 0,39 | -0,84 | -26,75 | 2,49 | -554,37 | 1,72 | 11,66 | 554,37 | 0,88 | 11,66 | 1,54 | 0,01 | 0,03 | 1,54 | 0,00 | 0,03 |
| 17 | 14 | DSTL6 | 558,60 | 8,81 | 1007,37 | 3,69 | 21,87 | 3,34 | 35,12 | -138,29 | 21,13 | 313,87 | -2,59 | 443,80 | 313,87 | 32,53 | 443,80 | 0,87 | 0,01 | 1,23 | 0,87 | 0,09 | 1,23 |
| 11 | 14 | DSTL7 | 530,18 | 5,54 | -917,54 | -3,43 | 2,19 | -2,33 | -32,70 | 13,86 | -14,71 | 268,56 | 6,22 | 452,77 | 268,56 | 26,47 | 452,77 | 0,75 | 0,02 | 1,26 | 0,75 | 0,07 | 1,26 |
| 12 | 14 | DSTL7 | -996,64 | 0,19 | 38,40 | -0,14 | 38,15 | 0,31 | -1,35 | 241,27 | 1,99 | -498,32 | 1,76 | 101,44 | 498,32 | 0,41 | 101,44 | 1,38 | 0,01 | 0,28 | 1,38 | 0,00 | 0,28 |
| 17 | 14 | DSTL7 | 466,46 | 5,36 | 879,14 | 3,57 | 40,34 | 2,01 | 34,05 | -255,14 | 12,72 | 297,01 | -7,98 | 329,09 | 297,01 | 26,06 | 329,09 | 0,83 | 0,02 | 0,91 | 0,83 | 0,07 | 0,91 |
| 11 | 14 | DSTL8 | 420,28 | 6,43 | -806,45 | -4,05 | 37,54 | -2,96 | -38,55 | 237,45 | -18,72 | 269,50 | 6,70 | 300,41 | 269,50 | 31,85 | 300,41 | 0,75 | 0,02 | 0,83 | 0,75 | 0,09 | 0,83 |
| 12 | 14 | DSTL8 | -910,26 | 0,18 | -40,61 | 0,14 | 41,51 | 0,69 | 1,31 | -262,52 | 4,36 | -455,13 | 1,44 | 110,96 | 455,13 | 2,75 | 110,96 | 1,26 | 0,00 | 0,31 | 1,26 | 0,01 | 0,31 |
| 17 | 14 | DSTL8 | 489,97 | 6,61 | 847,06 | 3,91 | 3,97 | 2,27 | 37,24 | 25,08 | 14,36 | 238,72 | -8,14 | 434,39 | 238,72 | 29,11 | 434,39 | 0,66 | 0,02 | 1,21 | 0,66 | 0,08 | 1,21 |
| 11 | 14 | DSTL9 | 397,07 | 1,99 | -709,51 | -4,54 | 11,12 | -1,22 | -43,22 | 70,31 | -7,70 | 216,11 | 16,76 | 324,31 | 216,11 | 26,46 | 324,31 | 0,60 | 0,05 | 0,90 | 0,60 | 0,07 | 0,90 |
| 12 | 14 | DSTL9 | -788,04 | 0,18 | 2,77 | 0,14 | 2,57 | 0,75 | 1,29 | 16,27 | 4,77 | -394,02 | 1,65 | -6,75 | 394,02 | 2,94 | -6,75 | 1,09 | 0,01 | 0,02 | 1,09 | 0,01 | 0,02 |
| 17 | 14 | DSTL9 | 390,97 | 2,17 | 706,73 | 4,40 | 13,69 | 0,46 | 41,93 | -86,59 | 2,93 | 217,13 | 18,41 | 315,87 | 217,13 | 23,52 | 315,87 | 0,60 | 0,05 | 0,88 | 0,60 | 0,07 | 0,88 |

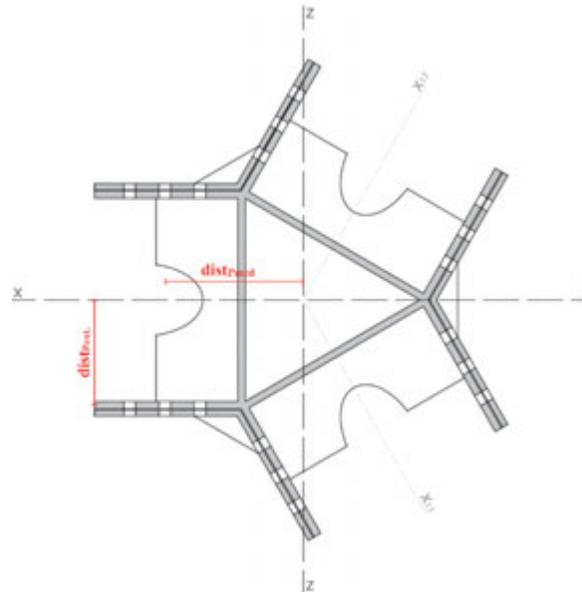
| Descomposición de Fm2 en sus vectores x; z. | | | | | |
|---|-------|------------|---------|--------|---------|
| Frame | Joint | OutputCase | | | |
| Text | Text | Text | Fm2 | Fm2x | Fm2z |
| 11 | 14 | UDSTL10 | 180,99 | 90,50 | 156,75 |
| 12 | 14 | UDSTL10 | -37,52 | 0,00 | 37,52 |
| 17 | 14 | UDSTL10 | -143,47 | 71,74 | -124,25 |
| 11 | 14 | UDSTL2 | 131,84 | 65,92 | 114,17 |
| 12 | 14 | UDSTL2 | -10,61 | 0,00 | 10,61 |
| 17 | 14 | UDSTL2 | -121,22 | 60,61 | -104,98 |
| 11 | 14 | UDSTL3 | 64,76 | 32,38 | 56,08 |
| 12 | 14 | UDSTL3 | 140,53 | 0,00 | -140,53 |
| 17 | 14 | UDSTL3 | -205,29 | 102,64 | -177,79 |

| Descomposición de Fm2 en sus vectores x; z. | | | | | |
|---|-------|------------|---------|-------|---------|
| Frame | Joint | OutputCase | | | |
| Text | Text | Text | Fm2 | Fm2x | Fm2z |
| 11 | 14 | UDSTL4 | 198,91 | 99,46 | 172,26 |
| 12 | 14 | UDSTL4 | -161,75 | 0,00 | 161,75 |
| 17 | 14 | UDSTL4 | -37,16 | 18,58 | -32,18 |
| 11 | 14 | UDSTL5 | 98,63 | 49,32 | 85,42 |
| 12 | 14 | UDSTL5 | 5,53 | 0,00 | -5,53 |
| 17 | 14 | UDSTL5 | -104,16 | 52,08 | -90,20 |
| 11 | 14 | UDSTL6 | 165,04 | 82,52 | 142,93 |
| 12 | 14 | UDSTL6 | -26,75 | 0,00 | 26,75 |
| 17 | 14 | UDSTL6 | -138,29 | 69,15 | -119,76 |

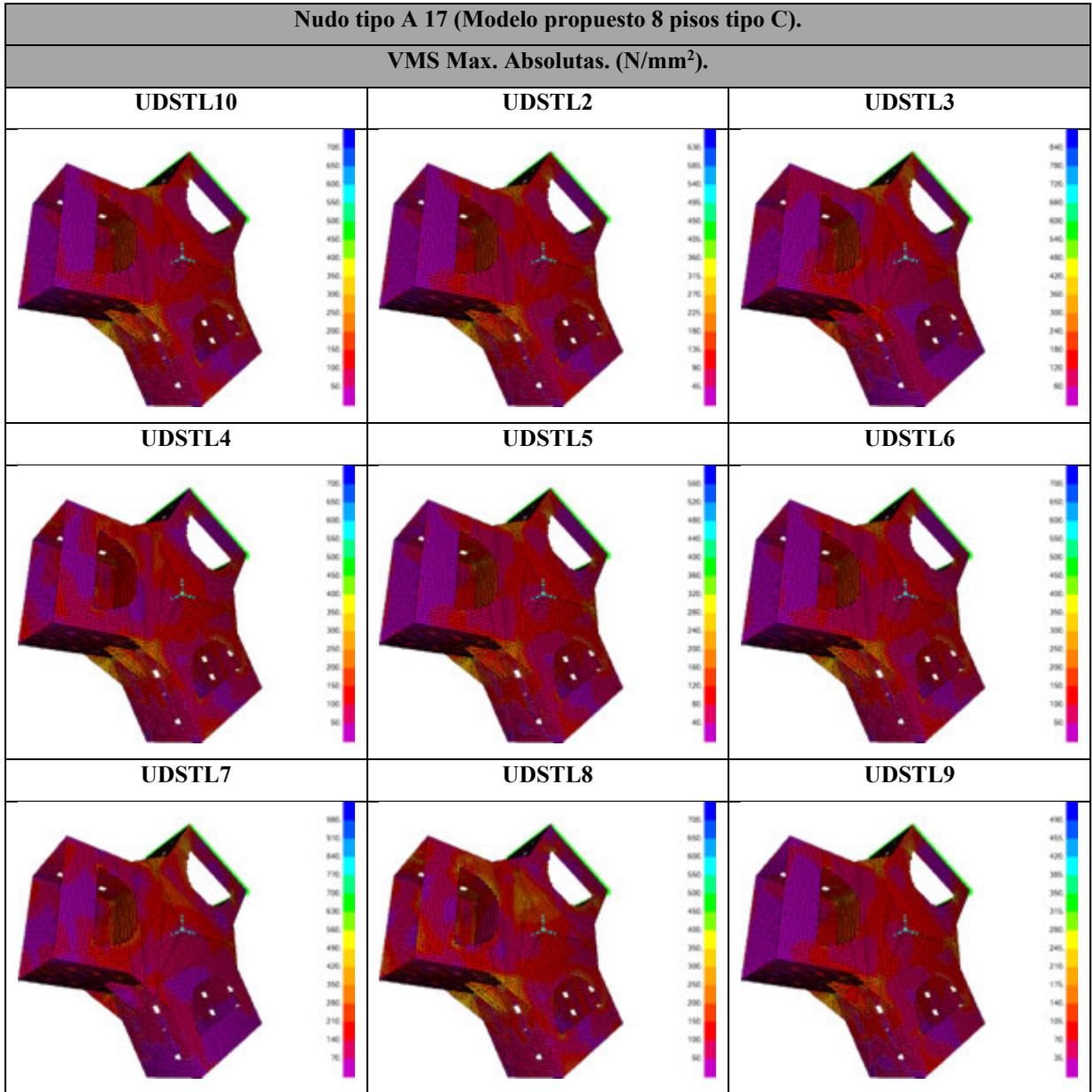
| Descomposición de Fm2 en sus vectores x; z. | | | | | |
|---|-------|------------|---------|--------|---------|
| Frame | Joint | OutputCase | | | |
| Text | Text | Text | Fm2 | Fm2x | Fm2z |
| 11 | 14 | UDSTL7 | 13,86 | 6,93 | 12,01 |
| 12 | 14 | UDSTL7 | 241,27 | 0,00 | -241,27 |
| 17 | 14 | UDSTL7 | -255,14 | 127,57 | -220,96 |
| 11 | 14 | UDSTL8 | 237,45 | 118,72 | 205,63 |
| 12 | 14 | UDSTL8 | -262,52 | 0,00 | 262,52 |
| 17 | 14 | UDSTL8 | 25,08 | -12,54 | 21,72 |
| 11 | 14 | UDSTL9 | 70,31 | 35,16 | 60,89 |
| 12 | 14 | UDSTL9 | 16,27 | 0,00 | -16,27 |
| 17 | 14 | UDSTL9 | -86,59 | 43,29 | -74,99 |

| Coeficientes de cálculo de FM2 | | |
|--------------------------------|------|------------|
| Frame | Fm2x | Fm2y |
| 11 | 0,5 | $\sqrt{3}$ |
| 12 | 0 | -1 |
| 17 | -0,5 | $\sqrt{3}$ |

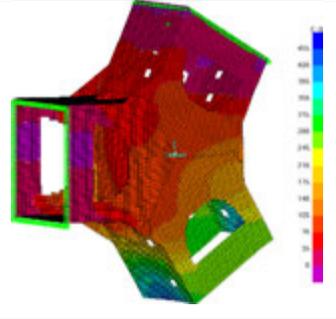
| Distancias para Fm1, Fm2, Fm3 | |
|-------------------------------|--------|
| dist _{Pext.} (mm) | 105,00 |
| dist _{Pmed.} (mm) | 158,12 |

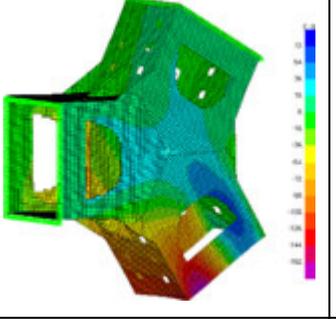
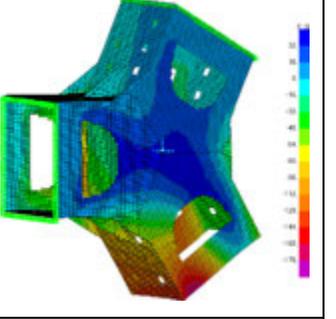
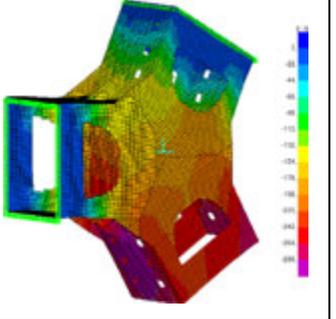
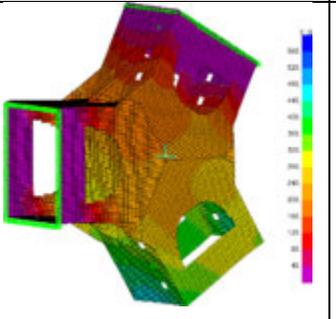


Resultados del cálculo.

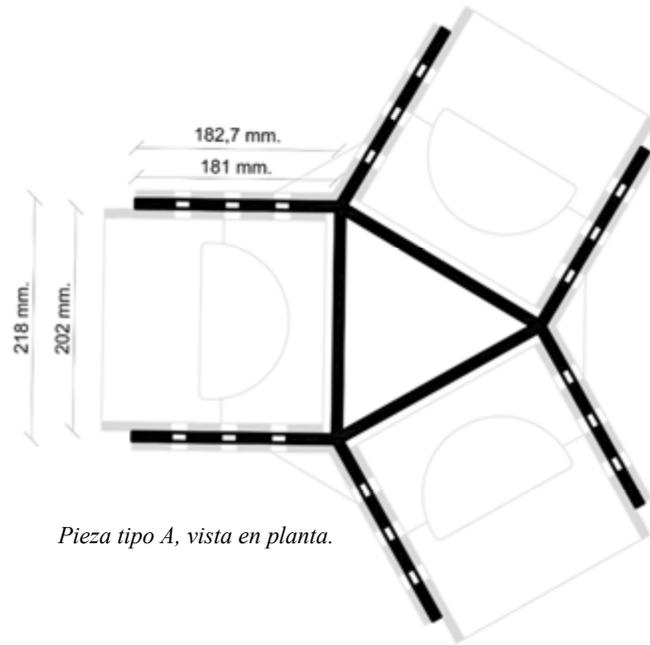


| Nudo tipo A 12-17 (Modelo propuesto 8 pisos tipo C). | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| Deformación máxima (mm.) | | | | |
| Caso | Def max X | Def max Y | Def max Z | Def max resultante |
| UDSTL10 | 0,405 | -0,178 | -0,294 | 0,531 |
| UDSTL2 | 0,329 | -0,156 | -0,269 | 0,453 |
| UDSTL3 | 0,266 | -0,139 | -0,300 | 0,424 |
| UDSTL4 | 0,400 | -0,177 | -0,249 | 0,503 |
| UDSTL5 | 0,276 | -0,137 | -0,246 | 0,395 |
| UDSTL6 | 0,385 | -0,176 | -0,293 | 0,515 |
| UDSTL7 | 0,222 | -0,120 | -0,307 | 0,397 |
| UDSTL8 | 0,432 | -0,178 | -0,223 | 0,518 |
| UDSTL9 | 0,224 | -0,111 | -0,217 | 0,332 |

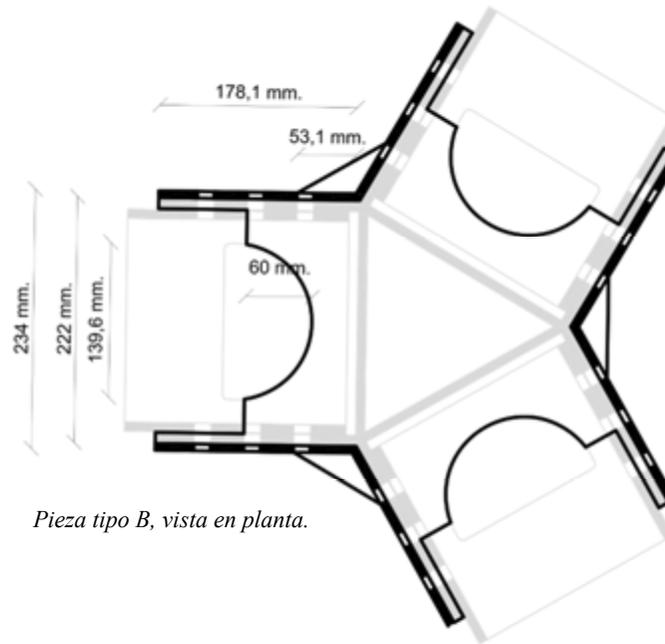
| Nudo tipo A 12-17 (Modelo propuesto 8 pisos tipo C). | | |
|--|--|--|
| Deformación máxima (mm.) | | |
| Def max x |  | |
| | UDSTL8 | |

| | | |
|----------------------|--|---|
| Def max y |  |  |
| | UDSTL8 | UDSTL10 |
| Def max z |  | |
| | UDSTL7 | |
| Def. max resultante. |  | |
| | UDSTL10 | |

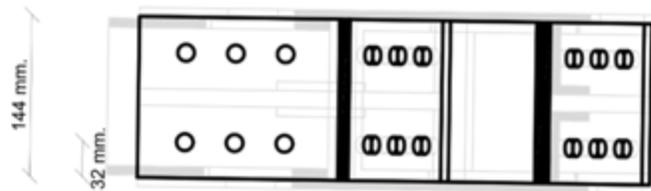
Descripción del diseño I.



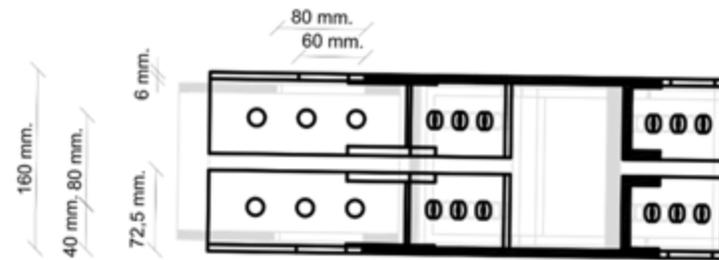
Pieza tipo A, vista en planta.



Pieza tipo B, vista en planta.

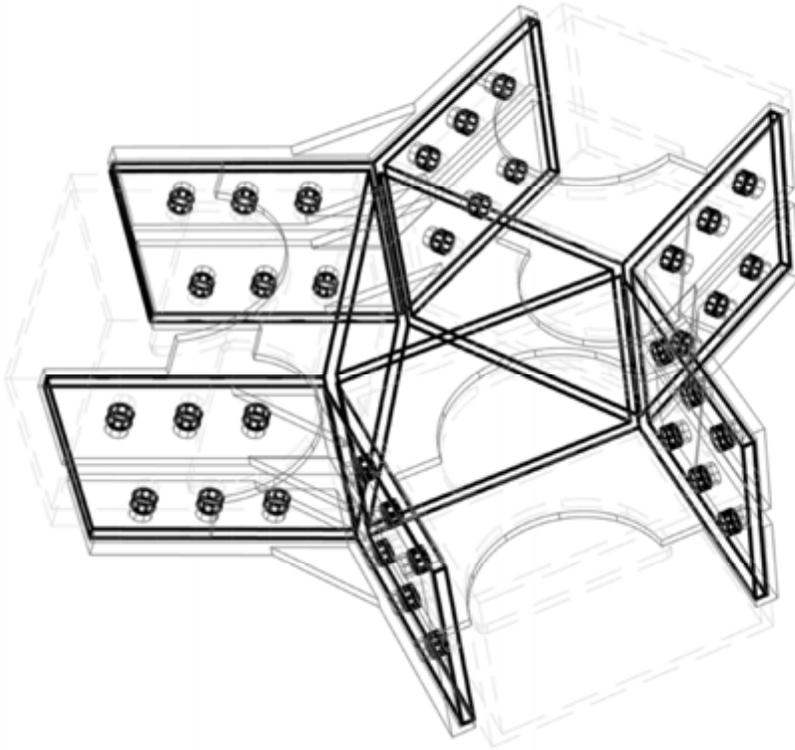


Pieza tipo A, vista en alzado.

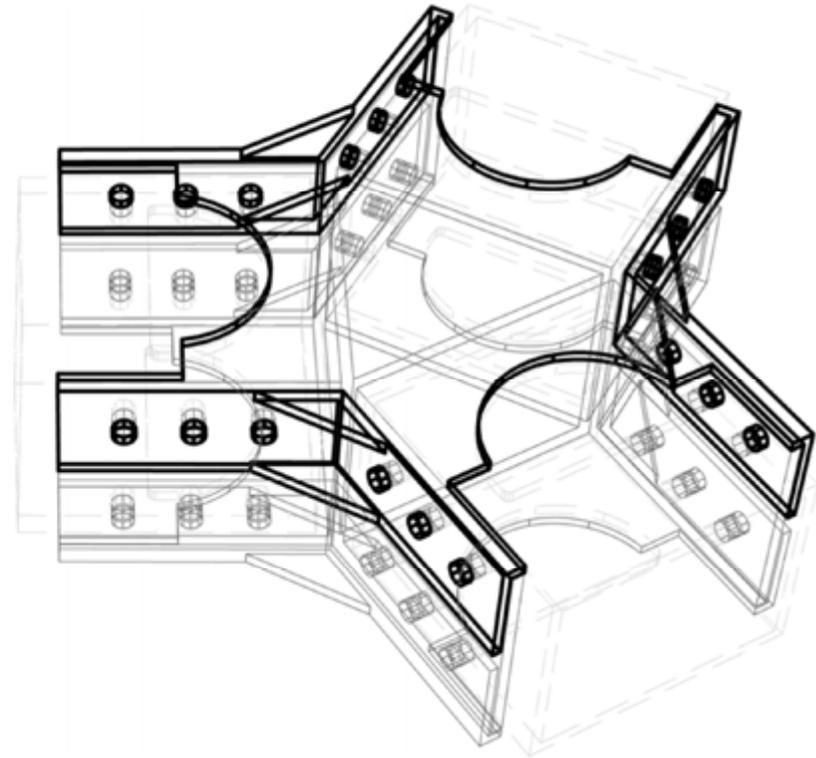


Pieza tipo B, vista en alzado.

Descripción del diseño II.



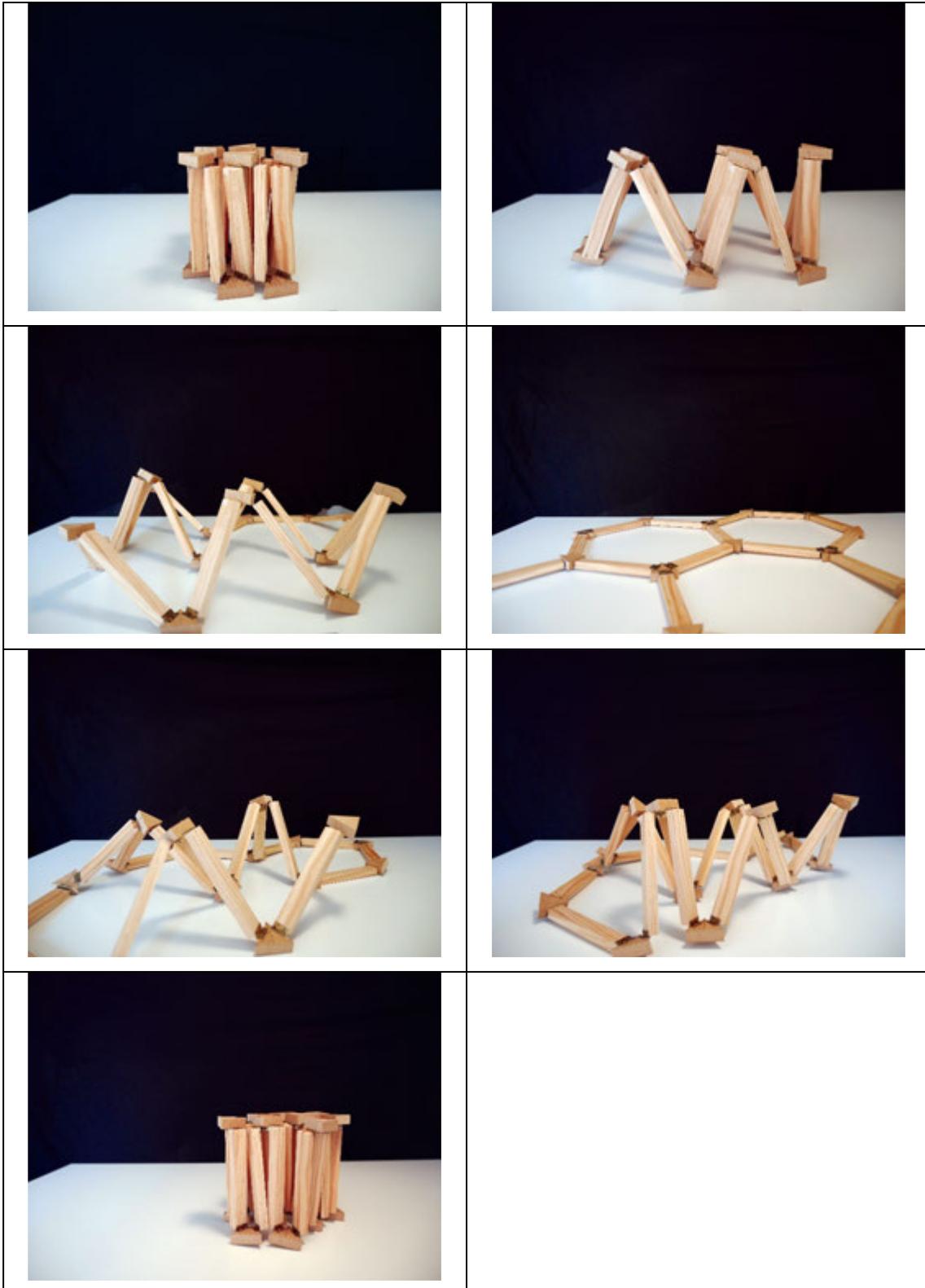
Pieza tipo A, Perspectiva.



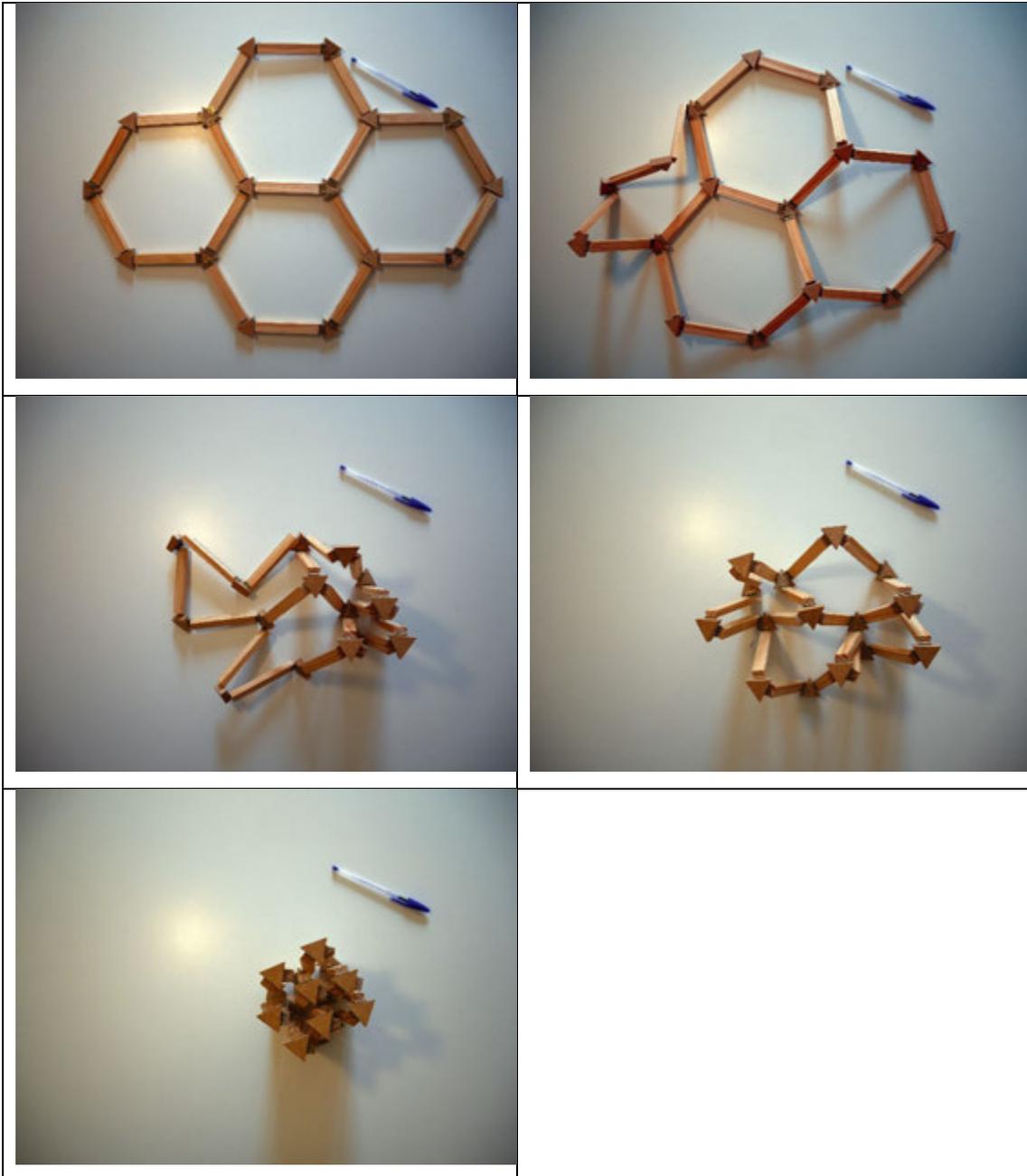
Pieza tipo B, Perspectiva.

Anexo 3: Archivo de maquetas
(físicas)

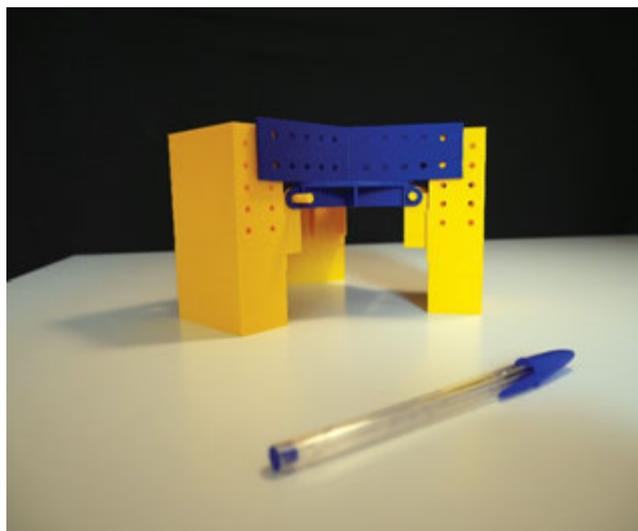
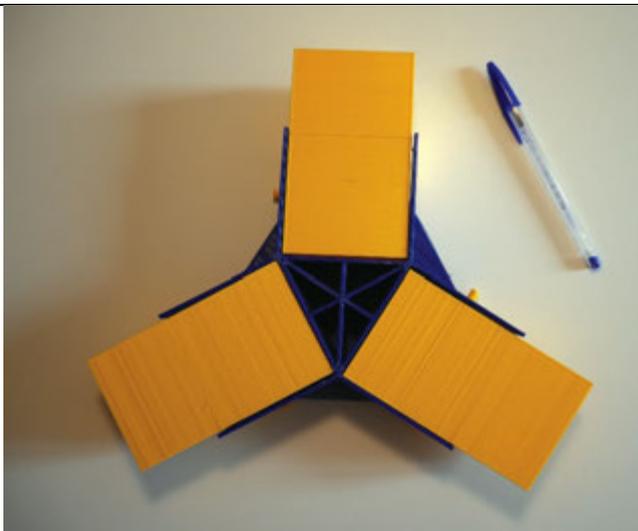
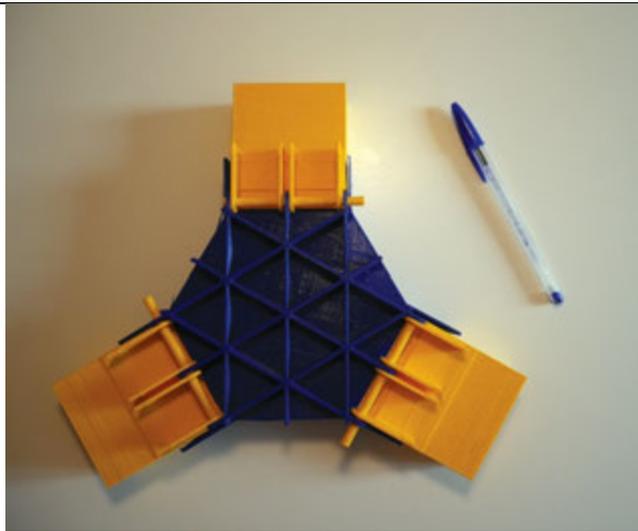
Modelo funcional de despliegue de barras.



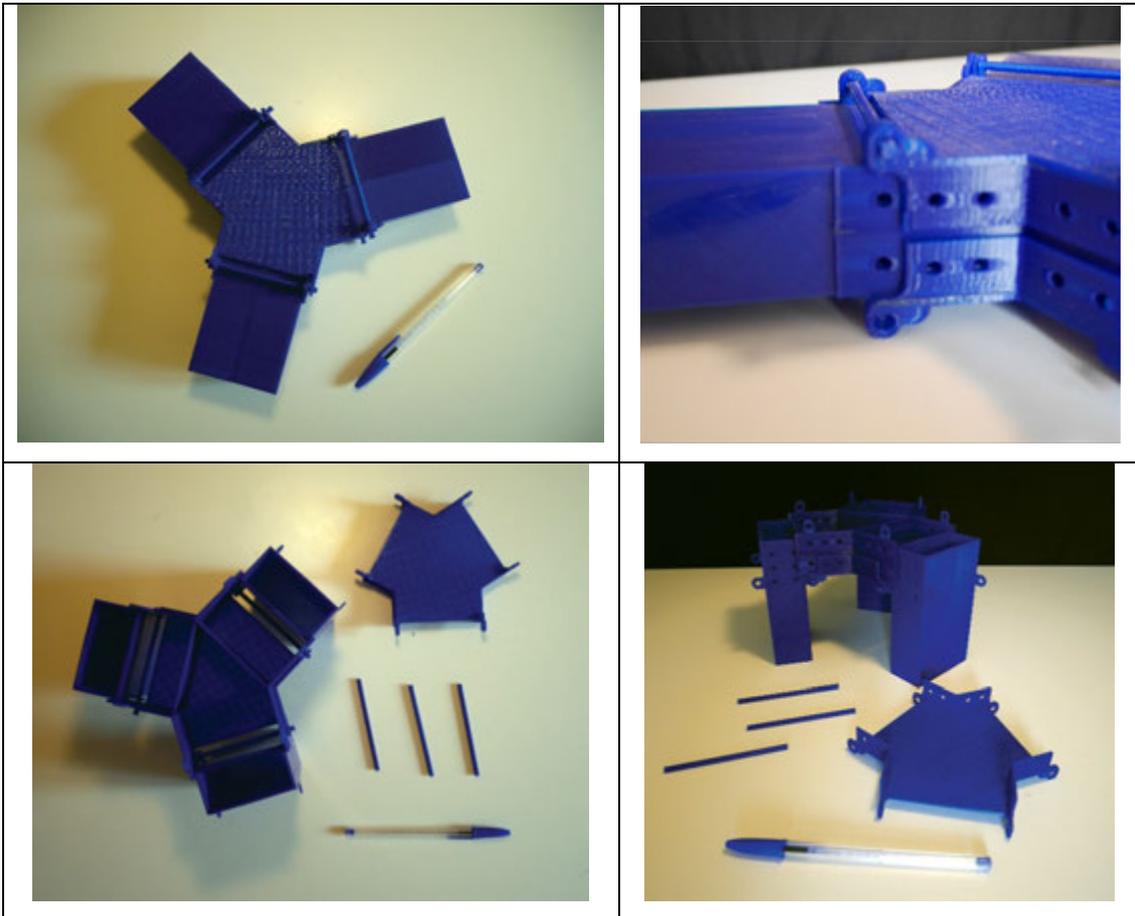
Modelo funcional de despliegue de barras (vista en planta).



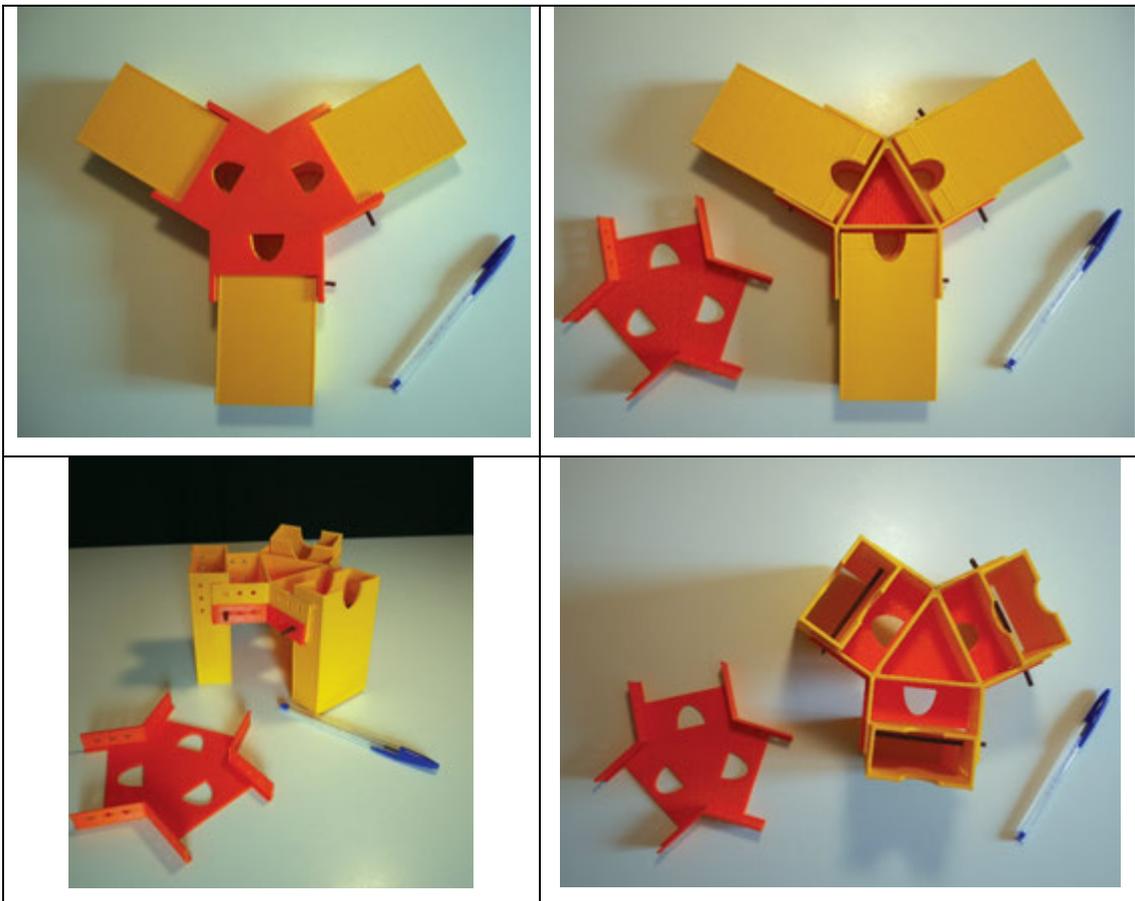
Nudo tipo A, modelo Geométrico 2. (Esc. 1: 5)



Nudo tipo A, modelo geométrico 4. (Esc. 1: 5)



Nudo tipo A, modelo geométrico 5. (Esc. 1: 5)



Nudo tipo A, modelo 7.4 en edificio tipo C de 15 plantas (Capítulo 4) y Nudo tipo A en edificio tipo C de 8 plantas (Capítulo 5). (Esc. 1: 5).

