

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Análisis comparativo entre una malla tensegrítica de doble capa y una
cobertura metálica convencional, en el comportamiento estructural para
una infraestructura deportiva menor en la Ciudad de Arequipa**

Tesis presentada por el Bachiller:

Morón Chávez, Doménico Fabricio

ORCID: 0009-0009-7813-423X

para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor:

Mg. Bustamante Mora, Boris André

ORCID: 0000-0002-7612-315X

Arequipa - Perú

2024

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA CIVIL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 07 de Octubre del 2024

Dictamen: 004738-C-EPIC-2024

Visto el borrador del expediente 004738, presentado por:

2016195051 - MORON CHAVEZ DOMENICO FABRICIO

Titulado:

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE UNA MALLA TENSEGRÍTICA DE DOBLE CAPA Y UNA COBERTURA METÁLICA CONVENCIONAL, EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL PARA UNA INFRAESTRUCTURA DEPORTIVA MENOR EN LA CIUDAD DE AREQUIPA

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO CIVIL

**23884755 - CHAVEZ VEGA OSCAR FELIX
DICTAMINADOR**



**29238311 - GUILLEN MALAGA MILAGROS SOCORRO
DICTAMINADOR**



**29412437 - UGARTE CALDERON ENRIQUE ALFONSO
DICTAMINADOR**



Análisis comparativo entre una malla tensegrítica de doble capa y una cobertura metálica convencional, en el comportamiento estructural para una infraestructura deportiva menor en la Ciudad de Arequipa

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
6	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unican.es Fuente de Internet	<1%

Submitted to SAE Institute (Worldwide)

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen, por formarme católicamente durante toda mi educación universitaria y más aún después de esta, por bendecir a mi familia, por darnos salud y por darme la fuerza para poder haber terminado esta tesis, con la que comencé con muchos problemas; en especial le dedico este trabajo al Corazón de Jesús, el cual me permitió enamorarme de Él, santificar mi esfuerzo y no rendirme nunca, porque con Él todo se puede.

A mis padres, Paul y Victoria, por darme la oportunidad de poder estudiar una carrera profesional y una educación de calidad, por trabajar y sacrificarse para que pueda lograr mis objetivos profesionales; por no rendirse nunca y por haberme esperado y tenerme paciencia el largo tiempo que estuve haciendo esta tesis, sin buenas noticias al comienzo, pero buenas al final.

A mi hermana, por haberme dado ánimos y fuerzas para seguir con mi vida profesional y con este trabajo de investigación, siendo mi figura a admirar de una persona trabajadora, responsable y madura.

A mi enamorada Valeria, por haberme dado aliento cuando lo necesitaba en momentos difíciles durante el desarrollo de este trabajo, por haber sido un apoyo y por haberme tenido paciencia todo el tiempo de ejecución.

Doménico Fabricio Morón Chávez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santa María por haberme enseñado y brindado muchos conocimientos durante los 5 años que estudié ahí, necesarios para la vida profesional que afronto ahora en el trabajo, y por haberme brindado otras necesidades importantes para mí, como seguridad, atención médica, buenas amistades y por darme la oportunidad de hacer deporte siempre, para tener una mente sana en un cuerpo sano.

A mis docentes por haberme enseñado todo lo que saben sin esperar nada a cambio, por la disposición que tienen para enseñar y la amistad que te pueden llegar a brindar, en especial a Msc. Jorge Rosas Espinoza, quien fue mi principal referente en la universidad, un gran amigo y un gran jefe también.

A mi asesor Msc, Boris Bustamante por haberme ayudado con el plan de tesis inicial y haber defendido mi tema. Al docente Msc. Alain Espinoza por haberme brindado su ayuda y su disposición para sacarme de dudas durante la ejecución de este trabajo.

A toda mi familia, padres y hermana, por haber confiado siempre en mí a pesar de poder haberlos defraudado en algunas ocasiones.

Con amor y respeto, Doménico Fabricio Morón Chávez

RESUMEN

En las infraestructuras deportivas abiertas de la ciudad de Arequipa se suele usar mucho estructuras metálicas, desde coberturas totalmente planas (horizontalmente) hasta coberturas con ligera inclinación (respecto a la horizontal); todas son casi iguales y tienen el mismo propósito: ofrecer protección solar a las canchas deportivas; así pues, esta monotonía de estructuras refleja que son sistemas buenos, pero a la vez también refleja una posible escasez de opciones ante la necesidad de la protección solar. Por otro lado, existe un principio físico que está llamando la atención estos últimos años, la “Tensegridad”, un sistema que funciona únicamente bajo cargas axiales: tensión y compresión, presentando únicamente elementos de cables y barras; este sistema axial no permite que dos barras se toquen entre sí en un mismo punto, logrando así un aspecto visual muy llamativo, dando la sensación de que las barras están flotando en el aire sin tocarse unas de otras, y aunque no lo parezca, este sistema funciona muy bien, es capaz de auto soportarse e incluso resistir fuerzas externas sin colapsar.

Este trabajo de investigación junta la necesidad de tener más opciones de estructuras para la protección solar, con la novedosa existencia de un sistema físico poco conocido e indagado, dando como resultado una comparación estructural de dos tipos de estructuras diferentes (coberturas metálicas convencionales y mallas tensegríticas), logrando determinar finalmente qué tan funcional puede ser una cobertura tensegrítica, y si puede ser usada en nuestra ciudad en vez de las coberturas metálicas que existen.

Como se mencionó, la comparación se hizo entre estas dos estructuras: una cobertura convencional y una malla tensegrítica de doble capa; la cobertura convencional es escogida de un trabajo de investigación realizado por dos alumnos de la UCSM de Arequipa, donde analizan muchas de estas coberturas en la ciudad, concluyendo que este tipo de estructuras no son bien diseñadas por parte de los profesionales y presentan deficiencias; de entre todas esas estructuras

analizadas se seleccionó solo una, la cual representará a todas las demás; por otro lado, se escogió también una sola malla tensegrítica representativa para la comparación.

El proceso para seleccionar a la malla tensegrítica representativa consta de una evaluación entre fuerzas internas y desplazamientos; en total se analizaron 35 mallas tensegríticas creadas desde cero a través de dos métodos, uno de ellos es a través de la unión de varios módulos tensegríticos únicos e iguales, los cuales pueden unirse mediante distintas formas, dando así una amplia cantidad de mallas de este tipo; el otro método usado se da a través de la teoría de la “Manipulación Rot-Umbela”, donde se usan mallas de doble capa existentes, pero que con el uso de esta manipulación se convierten en mallas tensegríticas de doble capa. En total se lograron 21 mallas por medio de la unión de módulos y 14 mediante la Manipulación Rot-Umbela; para poder escoger a la mejor malla de las 35 generadas, se analizó cada una de ellas bajo las mismas cargas de viento y bajo las mismas condiciones (misma área, mismo elementos, etc.), logrando una comparación justa para todas; la comparación se hizo en base a fuerzas y desplazamientos, escogiendo como mejor, a la estructura que presente menores fuerzas axiales en sus elementos (tanto a compresión como a tracción) y la que tenga menores desplazamientos, ya que de esta manera se está escogiendo a la malla más segura en cuanto a deformaciones, y a la que puede resistir más fuerzas de viento antes de llegar a un mecanismo de falla.

Una vez obtenida la malla tensegrítica y la cobertura metálica convencional representativa, se procedió con la comparación final; como ya se escogió previamente la cobertura convencional gracias al trabajo citado, se puede conocer su velocidad de viento alcanzada antes de fallar, y se puede conocer también las propiedades que tiene cada uno de sus elementos; por otro lado, la malla tensegrítica representativa al ser diseñada desde cero, tuvo que adaptarse a las mismas condiciones de la cobertura metálica, diseñándola nuevamente bajo los mismos elementos, bajo la misma área y con apoyos similares; así pues, ya diseñada la malla

tensegrítica final, se modela en el programa SAP2000 y se la analiza ante cargas de viento bajo un análisis estático no lineal (a través de rótulas plásticas); tras los análisis se obtuvieron resultados exageradamente buenos en cuanto a la velocidad de viento con la que falla la estructura, y esto se debe a que la malla tensegrítica al tener tantos elementos compresores y tensores genera una densidad de acero muy alta, obteniendo así fácilmente resultados positivos; por esta razón se rediseña nuevamente la malla tensegrítica tratando de generar una densidad de acero similar, como la usada en la cobertura metálica convencional; cuando se vuelve a analizar este segundo diseño de la malla, se observa que no es competente, directamente no es capaz de resistir alguna carga de viento mínima junto con el propio peso de la estructura, concluyendo así que con densidades iguales de acero, la cobertura convencional tiene resultados positivos y la malla tensegrítica no.

Finalmente se vuelve a rediseñar la malla tensegrítica por última vez, cambiando las propiedades de sus elementos y aumentando sus áreas nominales, de tal forma que se obtengan resultados positivos similares a los de la cobertura metálica convencional (velocidades de viento antes de la falla); tras el análisis respectivo, se concluyó que este tercer diseño de malla tensegrítica, soporta ligeramente una mayor velocidad de viento que la alcanzada por la cobertura convencional, sin embargo usa aproximadamente el triple de la densidad de acero.

Palabras clave: Mallas tensegríticas de doble capa, coberturas metálicas convencionales, manipulación Rot-Umbela.

ABSTRACT

In the open sports infrastructures of the city of Arequipa, metal structures are often used, from completely flat covers (horizontally) to covers with a slight inclination (with respect to the horizontal); all of these are almost the same and have the same purpose: to offer solar protection to the sports fields; thus, this monotony of structures reflects that they are good systems, but at the same time it also reflects a possible lack of options when faced with the need for solar protection. On the other hand, there is a physical principle that has been attracting attention in recent years, “Tensegrity”, a system that only works under axial loads: tension and compression, presenting only cable and bar elements; this axial system does not allow two bars to touch each other at the same point, thus achieving a very striking visual appearance, giving the sensation that the bars are floating in the air without touching each other, and although it may not seem so, this system works very well, it is able to self-support and even resist external forces without collapsing.

This research work combines the need for more options for solar protection structures with the novel existence of a little-known and investigated physical system, resulting in a structural comparison of two different types of structures (conventional metal covers and tensegrity grids), finally determining how functional a tensegrity cover can be, and whether it can be used in our city instead of the existing metal covers.

As mentioned, the comparison was made between these two structures: a conventional roof and a double-layer tensegrity grids; the conventional roof is chosen from a research work carried out by two students from the UCSM of Arequipa, where they analyze many of these roofs in the city, concluding that these types of structures are not well designed by professionals and have deficiencies; from all those analyzed structures only one was selected, to represent all the others; on the other hand, a single representative tensegrity grid was also chosen for comparison.

The process to select the representative tensegrity grid consists of an evaluation between internal forces and displacements; in total 35 tensegrity grids were analyzed, created from scratch through two methods, one of them is through the union of several unique and equal tensegrity modules, which can be joined in different ways, thus giving a large number of grids of this type; the other method used is through the theory of "Rot-Umbela Manipulation", where existing double-layer grids are used, but with the use of this manipulation they become double-layer tensegrity grids. In total 21 grids were achieved through the union of modules and 14 through Rot-Umbela Manipulation; in order to choose the best grid of the 35 generated, each of them was analyzed under the same wind loads and under the same conditions (same area, same elements, etc.), achieving a fair comparison for all; The comparison was made based on forces and displacements, choosing as best the structure that presents lower axial forces in its elements (both compression and tension) and the one with lower displacements, since in this way the safest grid is being chosen in terms of deformations, and the one that can resist more wind forces before reaching a failure mechanism.

Once the tensegrity grid and the representative conventional metal cover were obtained, the final comparison was carried out; as the conventional cover was previously chosen thanks to the cited work, its wind speed reached before failure can be known, and the properties of each of its elements can also be known; on the other hand, the representative tensegrity grid, being designed from scratch, had to be adapted to the same conditions of the metal cover, designing it again under the same elements, under the same area and with similar supports; thus, once the final tensegrity grid was designed, it was modeled in the SAP2000 program and analyzed under wind loads under a non-linear static analysis (through plastic hinges); after the analysis, exaggeratedly good results were obtained in terms of the wind speed at which the structure fails, and this is because the tensegrity grid, having so many compressive and tensioning elements, generates a very high steel density, thus easily obtaining positive results;

For this reason, the tensegrity grid is redesigned again, trying to generate a similar steel density as that used in conventional metal roofing; when this second grid design is analyzed again, it is observed that it is not competent; it is simply not capable of resisting a minimum wind load together with the weight of the structure itself, thus concluding that with equal steel densities, conventional roofing has positive results and tensegrity grid does not.

Finally, the tensegrity grid is redesigned for the last time, changing the properties of its elements and increasing its nominal areas, in such a way that positive results similar to those of the conventional metal cover are obtained (wind speeds before failure); after the respective analysis, it was concluded that this third tensegrity grid design slightly supports a higher wind speed than that achieved by the conventional cover, however it uses approximately three times the density of steel.

Keywords: Double-layer tensegrity grids, conventional metal covers, Rot-Umbela manipulation.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y GENERALIDADES.....	5
1.1. Problemática de la investigación.....	5
1.2. Justificación de la investigación.....	6
1.2.1. Social.....	6
1.2.2. Ambiental.....	6
1.2.3. Económica.....	7
1.2.4. Tecnológica.....	7
1.2.5. Político/Institucional.....	7
1.2.6. Ética.....	8
1.3. Objetivos.....	8
1.3.1. Objetivo General.....	8
1.3.2. Objetivos Específicos.....	8
1.4. Hipótesis.....	9
CAPÍTULO II.....	10
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	10

2.1.	Estado del Arte y Antecedentes de la Investigación	10
2.2.	Marco Teórico.....	21
2.2.1.	Tensegridad:	21
2.2.2.	Módulos de Tensegridad para la formación de mallas tensegríticas.....	23
2.2.3.	Clasificación para la unión de módulos de tensegridad:	29
2.2.4.	Manipulaciones de Rot-Umbela y “Mallas Tensegríticas de doble capa” (MTDC).....	31
2.2.5.	Infraestructuras deportivas y/o recreativas menores	36
2.2.6.	Coberturas metálicas convencionales utilizadas en el Perú	37
2.2.7.	Consideraciones de la Norma E.020 “Cargas”	39
2.2.8.	El acero como elemento a compresión, y cables tensados como elementos a tensión	40
2.2.9.	Utilización del análisis no lineal para el Análisis ante Cargas de Viento....	40
2.3.	Marco Legal	45
CAPÍTULO III.....		46
3.	METODOLOGÍA	46
3.1.	Enfoque de Investigación	46
3.2.	Alcance y Tipo de la Investigación.....	46
3.3.	Diseño de la Investigación.....	46
3.4.	Esquema Metodológico	47
3.5.	Métodos de Investigación.....	49
3.5.1.	Variable Dependiente.....	49
3.5.2.	Variable Independiente.....	50
CAPÍTULO IV		51
4.	NORMATIVA PERUANA PARA CARGAS DE VIENTO	51
4.1.	Clasificación de las edificaciones.....	51
4.2.	Velocidad de diseño	53
4.3.	Carga exterior del Viento.....	55

4.4. Carga interior del Viento	58
CAPÍTULO V	59
5. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA SAP 2000 UTILIZADO EN LAS MALLAS TENSEGRÍTICAS	59
5.1. Primer ejercicio validado	60
5.2. Segundo ejercicio validado	72
5.3. Tercer ejercicio validado.....	79
CAPÍTULO VI	86
6. MALLAS TENSEGRÍTICAS COMPUESTAS POR PEQUEÑOS MÓDULOS TENSEGRÍTICOS.....	86
6.1. Descripción de los modelos en formación.....	86
6.2. Aspectos generales y consideraciones tomadas para la formación de mallas	87
6.3. Procedimiento para la formación de Mallas tensegríticas en base a módulos tensegríticos.....	87
6.3.1. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Simplex”	88
6.3.2. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Cuádruplex”	90
6.3.3. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Quíntuplex”	93
6.3.4. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Séxtuplex”	96
6.3.5. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Quastrut-S”.....	99
6.3.6. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Quastrut-Z”	101
6.3.7. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Medio Cuboctaedro”	103
6.3.8. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Octaedro Expandido”	105
6.3.9. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Tetraedro Truncado”.....	107
CAPÍTULO VII.....	110
7. MALLAS TENSEGRÍTICAS COMPUESTAS POR MANIPULACIONES ROT- UMBELA	110
7.1. Descripción de los modelos en formación.....	110
7.2. Aspectos generales y consideraciones tomadas para la formación de mallas ..	111

7.3. Procedimiento para la formación de Mallas tensegríticas en base a la Manipulación Rot-Umbela.....	112
7.3.1. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Space Deck”.....	112
7.3.2. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla plana con separadores V44”	116
7.3.3. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla bidireccional cuadrada compensada”	123
7.3.4. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla bidireccional cuadrada diferencial”	130
7.3.5. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla directa o triangulada”	137
CAPÍTULO VIII	153
8. DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS POR ÁREA TRIBUTARIA EN MALLAS TENSEGRÍTICAS.....	153
8.1. Distribución de áreas para asignación de fuerzas de Mallas tensegríticas formadas por módulos tensegríticos	157
8.2. Distribución de áreas para asignación de fuerzas de Mallas tensegríticas formadas por Manipulación Rot-Umbela	168
CAPÍTULO IX	176
9. MODELADO Y CARACTERÍSTICAS DE MALLAS TENSEGRÍTICAS	176
9.1. Condiciones generales para el Modelado y el Análisis de Mallas Tensegríticas	176
9.2. Modelado y Análisis de mallas tensegríticas formadas por Módulos tensegríticos	179
9.2.1. Simplex	179
9.2.2. Cuádruplex	180
9.2.3. Quíntuplex.....	181
9.2.4. Séxtuplex	182
9.2.5. Quastrut-S.....	184

9.2.6.	Quastrut-Z	184
9.2.7.	Medio Cuboctaedro.....	185
9.2.8.	Octaedro Expandido	186
9.2.9.	Tetraedro Truncado.....	187
9.3.	Modelado y Análisis de mallas tensegríticas formadas por manipulaciones Rot-Umbela.....	191
9.3.1.	Space Deck	191
9.3.2.	Malla Plana con Separadores V44.....	193
9.3.3.	Malla Bidireccional Cuadrada Compensada.....	194
9.3.4.	Malla Bidireccional Cuadrada Diferencial.....	195
9.3.5.	Malla Directa o Triangulada.....	195
CAPÍTULO X.....		199
10.	RESULTADOS Y COMPARACIÓN GLOBAL DE MALLAS TENSEGRÍTICAS	199
10.1.	Resultados del Análisis global de Mallas Tensegríticas.....	200
10.2.	Resultados de Fuerzas y Reacciones máximas de Mallas Tensegríticas funcionales.....	204
10.3.	Resultados de Desplazamientos máximos de Mallas Tensegríticas funcionales	208
10.4.	Observación y discusión de Resultados.....	212
10.5.	Comparación y Elección final de la Malla Tensegrítica representativa	219
CAPÍTULO XI		223
11.	COMPARACIÓN FINAL DE MALLA TENSEGRÍTICA CON COBERTURA CONVENCIONAL.....	223
11.1.	Análisis elástico y análisis estático no lineal de malla tensegrítica final (1er diseño)	228
11.1.1.	Análisis elástico (1er diseño).....	233
11.1.2.	Análisis estático no lineal (1er diseño).....	236

11.2. Análisis elástico y análisis estático no lineal de malla tensegrítica final (2do diseño) 248	
11.2.1. Análisis elástico (2do diseño).....	254
11.2.2. Análisis estático no lineal (2do diseño)	256
11.3. Análisis elástico y análisis estático no lineal de malla tensegrítica final (3er diseño) 257	
11.3.1. Análisis Elástico (3er diseño).....	262
11.3.2. Análisis Estático no Lineal (3er diseño)	264
11.4. Comparación final entre diseños de Malla tensegrítica final con la Cobertura metálica convencional.....	273
CAPÍTULO XII.....	274
12. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	274
12.1. Interpretación de Resultados	274
12.2. Discusión	276
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	279
Conclusiones	279
Recomendaciones	281
REFERENCIAS	282

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 B-Tree.....	22
Figura 2 Módulo Tensegrítico "Simplex"	24
Figura 3 Módulo Tensegrítico "Quastrut-S" (a) y "Quastrut-Z" (b)	24
Figura 4 Simplex (8) y Cuádruplex (9), en perspectiva (a) y en planta (b)	25
Figura 5 Simplex con sus partes (a) y Mitad de Cuboctaedro (b).....	26
Figura 6 Octaedro Expandido	26
Figura 7 Cuboctaedro.....	27
Figura 8 Módulo de Tensegridad "Quastrut-S" (b) y Malla tensegrítica a partir de varios módulos Quastrut-S (c)	28
Figura 9 Módulo de Tensegridad en forma de "v"	30
Figura 10 Transformación de MDC a MTDC en una sola capa	32
Figura 11 Ejemplo de tensegrización de una estructura.....	32
Figura 12 Ejemplos del número de "valencia de umbela"	34
Figura 13 Tensegrización de una estructura.....	35
Figura 14 Estructura metálica convencional en Arequipa	38
Figura 15 Configuración de una estructura metálica convencional	38
Figura 16 Formato de Rótulas plásticas	44
Figura 17 Mapa Eólico del Perú.....	54
Figura 18 1er Ejercicio para Validación	60
Figura 19 Ejercicio 1 modelado en SAP2000	67
Figura 20 Inserción del material para los compresores (ejercicio 1)	68
Figura 21 Definición de la sección de los compresores (ejercicio 1)	69
Figura 22 Deformada y Fuerzas internas del Ejercicio 1	70
Figura 23 Resultados de fuerzas internas del Ejercicio 1	70

Figura 24 Resultados de Desplazamientos del Ejercicio 1	71
Figura 25 Resultados de Reacciones del Ejercicio 1	71
Figura 26 2do Ejercicio para Validación	72
Figura 27 Ejercicio 2 modelado en SAP 2000	76
Figura 28 Inserción del material para los cables (ejercicio 2)	76
Figura 29 Definición de la sección de los cables (ejercicio 2).....	77
Figura 30 Deformada del Ejercicio 2	77
Figura 31 Resultados de Fuerzas Internas del cable 1 del Ejercicio 2	78
Figura 32 Resultados de Fuerzas Internas del cable 2 del Ejercicio 2	79
Figura 33 3er Ejercicio para Validación	80
Figura 34 Ejercicio 3 modelado en SAP2000	82
Figura 35 Deformada y Fuerzas Internas del Ejercicio 3.....	83
Figura 36 Fuerzas Internas del compresor del Ejercicio 3	84
Figura 37 Fuerzas internas de los Cables del Ejercicio 3.....	84
Figura 38 Módulo "Simplex"	88
Figura 39 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Simplex", mediante la Unión Unilateral	89
Figura 40 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Simplex", mediante la Unión Bilateral	89
Figura 41 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Simplex", mediante la Conexión Arista- Arista.....	90
Figura 42 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Cuádruplex", mediante la Conexión Arista-Arista 1	91
Figura 43 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Cuádruplex", mediante la Conexión Arista-Arista 2	92

Figura 44 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Cuádruplex", mediante la Conexión Arista-Arista 3	93
Figura 45 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quíntuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 1	94
Figura 46 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quíntuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 2	95
Figura 47 Geometría complicada de Malla tensegrítica formada por Módulos "Quíntuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 3	96
Figura 48 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Séxtuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 1	97
Figura 49 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Séxtuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 2	98
Figura 50 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Séxtuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 3	99
Figura 51 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-S", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 1	100
Figura 52 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-S", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 2	101
Figura 53 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-Z", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 1	102
Figura 54 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-Z", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 2	103
Figura 55 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Medio Cuboctaedro", mediante la Conexión Arista-Arista en una sola capa 1	104

Figura 56 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Medio Cuboctaedro", mediante la Conexión Arista-Arista en una sola capa 2	105
Figura 57 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Octaedro Expandido", mediante la Unión Unilateral 1	106
Figura 58 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Octaedro Expandido", mediante la Unión Unilateral 2	107
Figura 59 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Tetraedro Truncado", mediante la Conexión Arista-Arista en una sola capa 1.	108
Figura 60 Malla Tensegrítica formada por Módulos "Tetraedro Truncado", mediante la Conexión Arista-Arista en una sola capa 2	109
Figura 61 Malla del centro de FP en la Celsa, Madrid.....	112
Figura 62 Obtención de MTDC de "Cuádruplex" a partir de la malla Space Deck con Manipulaciones R-U.	113
Figura 63 Tipos de geometrías de Mallas Tensegríticas formadas desde la Space Deck con Tensores iniciales	115
Figura 64 Tipos de geometrías de Mallas Tensegríticas formadas desde la Space Deck con Tensores adicionales	116
Figura 65 Módulos tensegríticos V33 y V44	117
Figura 66 Malla compuesta por Separadores V44	117
Figura 67 Malla compuesta por Separadores V44 replicada manualmente	118
Figura 68 Vista en planta de la malla con Separadores V44 con la colocación de cuadrados.	119
Figura 69 Giro de 90° en sentido horario para la malla con separadores V44.....	119
Figura 70 Vista en planta de malla con separadores V44 tras los giros de 90° de los cuadrados.....	120

Figura 71 Vista Isométrica del resultado final de la malla tensegrítica con separadores V44.	121
Figura 72 Vista en planta del resultado final de la malla tensegrítica con separadores V44.	121
Figura 73 Vista Isométrica de la totalidad de la malla tensegrítica final con separadores V44.	122
Figura 74 MDC Malla Bidireccional cuadrada compensada 1.	123
Figura 75 Malla Bidireccional cuadrada compensada replicada manualmente.	124
Figura 76 MDC Malla Bidireccional cuadrada compensada 2.	124
Figura 77 Malla Bidireccional cuadrada compensada tras la selección de cada elemento. ...	125
Figura 78 Inserción de cuadrados en la Capa Superior e Inferior para la manipulación R-U (Malla bidireccional cuadrada compensada).	126
Figura 79 Recorte de barras y Reubicación de vértices de la Malla bidireccional cuadrada compensada.	127
Figura 80 Giro de 90° de cuadrados insertados en capas superior e inferior de la Malla Bidireccional cuadrada compensada.	128
Figura 81 Colocación de nuevos tensores verticales en la capa intermedia.	128
Figura 82 Vista Isométrica del resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Bidireccional cuadrada compensada.	129
Figura 83 Vista en planta del resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Bidireccional cuadrada compensada.	130
Figura 84 MDC Mallas Bidireccionales cuadradas diferenciales.	131
Figura 85 Malla Bidireccional cuadrada Diferencial 1 replicada manualmente.	131
Figura 86 Malla Bidireccional cuadrada Diferencial 2 replicada manualmente.	132
Figura 87 Colocación de cuadrados y giro de 45°, con la reubicación respectiva de barras y cables, en la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 1.	133

Figura 88 Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 1 (vista isométrica).....	134
Figura 89 Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 1 (vista en planta).....	134
Figura 90 Colocación de cuadrados y giro de 45°, con la reubicación respectiva de barras y cables, en la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 2.....	135
Figura 91 Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 2 (vista isométrica).....	136
Figura 92 Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 2 (vista en planta).....	137
Figura 93 MDC Malla Directa o triangulada 1.....	138
Figura 94 Malla Directa o Triangulada 1 replicada manualmente.....	138
Figura 95 MDC Malla Directa o triangulada 2.....	139
Figura 96 Malla Directa o Triangulada 2 replicada manualmente.....	139
Figura 97 Inserción de cuadrados girados 45°, en los nudos de la malla tensegrítica directa o triangulada 1.....	140
Figura 98 Recorte de barras y Reubicación de vértices de la Malla Directa o Triangulada 1.....	141
Figura 99 Adición de nuevos compresores en Malla Directa o Triangulada 1, tras la implementación de cuadrados en los nudos.....	142
Figura 100 Giro de 45° de cuadrados en los nudos, con la reubicación de barras y cables, en la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1.....	143
Figura 101 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 (vista isométrica).....	144

Figura 102 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 (vista en planta).....	145
Figura 103 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 modificada (vista isométrica).	146
Figura 104 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 modificada (vista en planta).	147
Figura 105 Inserción de triángulos en los nudos para Manipulación R-U, en Malla Directa o Triangulada 2.....	148
Figura 106 Reubicación de barras y cables, en la malla tensegrítica Directa o triangulada 2.	149
Figura 107 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 2 (vista isométrica).	150
Figura 108 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 2 (vista en planta).....	150
Figura 109 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada, con una ubicación rápida de tensores y compresores (vista isométrica).	151
Figura 110 Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada, con una ubicación rápida de tensores y compresores (vista en planta).	152
Figura 111 Capa superior con un área rectangular de 50 m ² , con 45 nudos distribuidos. ...	154
Figura 112 Distribución de áreas tributarias por nudo de la capa superior de 50 m ²	155
Figura 113 Modelado de Malla Simplex Unión Lateral	179
Figura 114 Modelado de Malla Simplex Unión Bilateral	179
Figura 115 Modelado de Malla Simplex Unión Conexión Arista-Arista	180
Figura 116 Modelado de Malla Cuádruplex Unión Conexión Arista-Arista 1.	180
Figura 117 Modelado de Malla Cuádruplex Unión Conexión Arista-Arista 2.	181

Figura 118	Modelado de Malla Cuádruplex Unión Conexión Arista-Arista 3.....	181
Figura 119	Modelado de Malla Quíntuplex Unión Conexión Arista-Arista 1.....	182
Figura 120	Modelado de Malla Quíntuplex Unión Conexión Arista-Arista 2.....	182
Figura 121	Modelado de Malla Séxtuplex Unión Conexión Arista-Arista 1.....	183
Figura 122	Modelado de Malla Séxtuplex Unión Conexión Arista-Arista 2.....	183
Figura 123	Modelado de Malla Séxtuplex Unión Conexión Arista-Arista 3.....	183
Figura 124	Modelado de Malla Quastrut-S Conexión Arista a medias 1.	184
Figura 125	Modelado de Malla Quastrut-S Conexión Arista a medias 2.	184
Figura 126	Modelado de Malla Quastrut-Z Conexión Arista a medias 1.	185
Figura 127	Modelado de Malla Quastrut-Z Conexión Arista a medias 2.	185
Figura 128	Modelado de Malla Medio Cuboctaedro Conexión Arista en una sola capa 1. .	186
Figura 129	Modelado de Malla Medio Cuboctaedro Conexión Arista en una sola capa 2. .	186
Figura 130	Modelado de Malla Octaedro Expandido Conexión Unilateral 1.	187
Figura 131	Modelado de Malla Octaedro Expandido Conexión Unilateral 2.	187
Figura 132	Modelado de Malla Tetraedro Truncado Conexión Arista en una sola capa 1. .	188
Figura 133	Modelado de Malla Tetraedro Truncado Conexión Arista en una sola capa 2. .	188
Figura 134	Modelado de Malla Space Deck con Tensores Adicionales Forma 1.	191
Figura 135	Modelado de Malla Space Deck con Tensores Adicionales Forma 2.	192
Figura 136	Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 1.....	192
Figura 137	Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 2.....	192
Figura 138	Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 3.....	193
Figura 139	Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 4.....	193
Figura 140	Modelado de Malla Plana con Separadores V44.....	194
Figura 141	Modelado de Malla Bidireccional Cuadrada Compensada.	194
Figura 142	Modelado de Malla Bidireccional Cuadrada Diferencial 1.	195

Figura 143 Modelado de Malla Bidireccional Cuadrada Diferencial 2.	195
Figura 144 Modelado de Malla Directa o Triangulada 1.	196
Figura 145 Modelado de Malla Directa o Triangulada 2.	196
Figura 146 Modelado de Malla Directa o Triangulada 3.	196
Figura 147 Modelado de Malla Directa o Triangulada 4.	197
Figura 148 Porcentaje de Disminución de Fuerzas Internas Máximas.	213
Figura 149 Porcentaje de Disminución de Fuerzas Internas Mínimas.	214
Figura 150 Porcentaje de Disminución de Reacciones Máximas.	214
Figura 151 Porcentaje de Disminución de Reacciones Mínimas.	215
Figura 152 Malla Tensegrítica Escogida para la comparación final, compuesta por Módulos de Octaedros Expandidos, a través del tipo de Unión Unilateral (Vista en planta/perfil).	221
Figura 153 Malla Tensegrítica escogida para la comparación final, compuesta por Módulos de Octaedros Expandidos, a través del tipo de Unión Unilateral (Vista isométrica/canto). ..	222
Figura 154 Vista en planta y Vista Isométrica del Módulo Octaedro Expandido	222
Figura 155 Primera Selección de Cable a usar, mediante un catálogo de Tensores (cables).	225
Figura 156 Malla Tensegrítica final, adaptada a nuevas condiciones para la Comparación final.	227
Figura 157 Áreas tributarias para cada punto de la capa superior de la malla tensegrítica final.	227
Figura 158 Definición de material para cables en programa SAP2000 (1er diseño).	228
Figura 159 Definición de material para barras en programa SAP2000 (1er diseño).	229
Figura 160 Definición de propiedades geométricas para barras en programa SAP2000 (1er diseño).	229

Figura 161 Definición de propiedades geométricas para cables en programa SAP2000 (1er diseño).	230
Figura 162 Modelado Final de Malla tensegrítica final representativa, modelada en el programa SAP2000 en una vista en planta (1er diseño).	231
Figura 163 Modelado Final de Malla tensegrítica final representativa, modelada en el programa SAP2000 en una vista isométrica (1er diseño).	232
Figura 164 Asignación de cargas en cada nudo de la capa superior de la malla tensegrítica representativa, en el programa de análisis SAP2000 (1er diseño).	233
Figura 165 Definición del estado de cargas para el análisis elástico, en el programa SAP2000 (1er diseño).	234
Figura 166 Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis elástico bajo cargas de viento (1er diseño).	235
Figura 167 Clasificación de elementos a compresión de acuerdo a su relación de esbeltez. 237	
Figura 168 Inserción de datos para diagrama fuerza-desplazamiento de elementos compresores (1er diseño).	240
Figura 169 Inserción de rótulas plásticas en elementos compresores de malla Tensegrítica final (1er diseño).	241
Figura 170 Definición del estado de cargas para el análisis estático no lineal, en el programa SAP2000 (1er diseño).	242
Figura 171 Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis estático no lineal bajo cargas de viento (1er diseño).	243
Figura 172 Step 6 de falla de malla tensegrítica tras el análisis estático no lineal (1er diseño).	243
Figura 173 Resultados de la Rótula del primer elemento en fallar tras el análisis estático no lineal (1er diseño).	244

Figura 174 Segunda selección de Barra a usar, mediante un catálogo de Compresores (Barras).....	249
Figura 175 Segunda Selección de Cable a usar, mediante un catálogo de Tensores (cables).	250
Figura 176 Definición de material para barras en programa SAP2000 (2do diseño)	251
Figura 177 Definición de propiedades geométricas para barras en programa SAP2000 (2do diseño).	252
Figura 178 Definición de material para cables en programa SAP2000 (2do diseño).....	252
Figura 179 Definición de propiedades geométricas para cables en programa SAP2000 (2do diseño).	253
Figura 180 Malla tensegrítica final, previamente modelada en SAP2000 (2do diseño).....	253
Figura 181 Definición del estado de cargas para el análisis elástico, en el programa SAP2000 (2do diseño).....	254
Figura 182 Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis elástico bajo cargas de viento (2do diseño).....	255
Figura 183 Tercera selección de Barra a usar, mediante un catálogo de Compresores (Barras).	257
Figura 184 Tercera Selección de Cable a usar, mediante un catálogo de Tensores (cables).258	
Figura 185 Definición de material para barras en programa SAP2000 (3er diseño).	259
Figura 186 Definición de propiedades geométricas para barras en programa SAP2000 (3er diseño).	260
Figura 187 Definición de material para cables en programa SAP2000 (3er diseño).....	260
Figura 188 Definición de propiedades geométricas para cables en programa SAP2000 (3er diseño).	261
Figura 189 Malla tensegrítica final, previamente modelada en SAP2000 (3er diseño).....	261

Figura 190 Definición del estado de cargas para el análisis elástico, en el programa SAP2000 (3er diseño).....	262
Figura 191 Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis elástico bajo cargas de viento (3er diseño).....	263
Figura 192 Inserción de datos para diagrama fuerza-desplazamiento de elementos compresores (3er diseño).	266
Figura 193 Inserción de rótulas plásticas en elementos compresores de malla Tensegrítica final (3er diseño).	267
Figura 194 Definición del estado de cargas para el análisis estático no lineal, en el programa SAP2000 (3er diseño).	268
Figura 195 Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis estático no lineal bajo cargas de viento (3er diseño).....	268
Figura 196 Ubicación exacta de los compresores rotulados en la Malla Tensegrítica.	269
Figura 197 Ubicación a detalle de los compresores rotulados en la Malla Tensegrítica.	269
Figura 198 Resultados de la Rótula del primer elemento en fallar tras el análisis estático no lineal (3er diseño).....	270
Figura 199 Resultados de la Rótula del segundo elemento en fallar tras el análisis estático no lineal (3er diseño).....	271

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Factor de Forma (C)</i>	56
Tabla 2 <i>Factores de forma para determinar cargas adicionales en elementos de cierre (c)</i> .	58
Tabla 3 <i>Ubicación en coordenadas de cada punto (Ejercicio 1)</i>	61
Tabla 4 <i>Grados de libertad para cada nudo (1er ejercicio)</i> .	61
Tabla 5 <i>Propiedades geométricas y mecánicas de cada elemento (Ejercicio 1)</i> .	61
Tabla 6 <i>Determinación de grados de libertad a cada elemento, nudo inicial y final</i> ,	62
Tabla 7 <i>Fuerzas Internas de los elementos del ejercicio 1 tras el análisis matricial</i> .	66
Tabla 8 <i>Desplazamientos en los nudos A, B y D del ejercicio 1, tras el análisis matricial</i> ...	67
Tabla 9 <i>Ubicación en coordenadas de cada punto (Ejercicio 2)</i>	73
Tabla 10 <i>Grados de libertad para cada nudo (2do ejercicio)</i> .	73
Tabla 11 <i>Propiedades geométricas y mecánicas de cada elemento (Ejercicio 2)</i> .	73
Tabla 12 <i>Fuerzas Internas de los elementos del ejercicio 2 tras el análisis matricial</i> .	75
Tabla 13 <i>Desplazamiento en los nudos A del ejercicio 2, tras el análisis matricial</i>	75
Tabla 14 <i>Cantidad total de Mallas Tensegrítica posibles a partir de Módulos tensegríticos</i> .	86
Tabla 15 <i>Cantidad total de Mallas Tensegrítica posibles a partir de la Manipulación R-U</i>	110
Tabla 16 <i>Fuerza total que hay en cada punto de la malla del Ejercicio previsto</i>	156
Tabla 17 <i>Distribución de áreas tributarias para cada nudo (Mallas tensegríticas formadas por Módulos tensegríticos)</i>	157
Tabla 18 <i>Distribución de áreas tributarias para cada nudo (Mallas tensegríticas formadas por Manipulación Rot-Umbela)</i> .	168
Tabla 19 <i>Características generales de Mallas generadas por Módulos Tensegríticos</i> .	189
Tabla 20 <i>Características generales de Mallas generadas por la Manipulación Rot-Umbela</i>	198

Tabla 21 <i>Resultados generales de Fuerzas y Reacciones de Todas las Mallas Tensegríticas.</i>	200
Tabla 22 <i>Resultados generales de Fuerzas y Reacciones de las Mallas Tensegríticas funcionales con solo 4 columnas como apoyo.</i>	204
Tabla 23 <i>Resultados generales de Fuerzas y Reacciones de las Mallas Tensegríticas funcionales con 6 columnas como apoyo.</i>	206
Tabla 24 <i>Desplazamientos de Mallas Tensegríticas funcionales en el sentido "x", tras el análisis elástico ante carga de viento.</i>	208
Tabla 25 <i>Desplazamientos de Mallas Tensegríticas funcionales en el sentido "y", tras el análisis elástico ante carga de viento.</i>	209
Tabla 26 <i>Desplazamientos de Mallas Tensegríticas funcionales en el sentido "z", tras el análisis elástico ante carga de viento.</i>	210
Tabla 27 <i>Resultados y Características generales de las 3 mejores Mallas Tensegríticas tras el análisis elástico de cargas de viento (4 columnas iniciales).</i>	217
Tabla 28 <i>Resultados y Características generales de las 3 mejores Mallas Tensegríticas tras el análisis elástico de cargas de viento (4 columnas iniciales con 2 columnas adicionales).</i>	218
Tabla 29 <i>Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis elástico (1er diseño de malla).</i>	235
Tabla 30 <i>Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis estático no lineal (1er diseño de malla).</i>	245
Tabla 31 <i>Determinación del factor de escala para la velocidad de viento (1er diseño).</i>	245
Tabla 32 <i>Metrado de acero de Estructura metálica convencional.</i>	247
Tabla 33 <i>Metrado de acero de Malla tensegrítica final (1er diseño).</i>	248
Tabla 34 <i>Metrado de acero de Malla tensegrítica final (2do diseño).</i>	250

Tabla 35 <i>Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis elástico (2do diseño de malla).</i>	255
Tabla 36 <i>Metrado de acero de Malla tensegrítica final (3er diseño).</i>	259
Tabla 37 <i>Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis elástico (3er diseño de malla).</i>	263
Tabla 38 <i>Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis estático no lineal (3er diseño de malla).</i>	271
Tabla 39 <i>Determinación del factor de escala para la velocidad de viento (3er diseño).</i>	272
Tabla 40 <i>Resumen y Comparación Final entre diseños de Mallas tensegríticas finales.</i>	273



INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un sistema estructural muy novedoso e innovador que tiene una gran flexibilidad y una increíble forma de auto soportarse, basado en el principio de la Tensegridad. Este sistema está basado en el ensamblaje de una estructura a partir de elementos que estén sometidos únicamente a tracción y compresión, ambos efectos por separado. Este sistema se inventó hace mucho tiempo atrás, y su autoría es un tema controversial; según Gómez-Jauregui (2008), se puede decir que la invención de las formas tensegríticas fue por Kenneth Snelson, y el descubrimiento de la Tensegridad por Buckminster Fuller. El nombre de "Tensegridad" viene de la traducción al español de "Tensegrity", un término que acuñó Fuller al juntar las palabras "Tensional Integrity", que significan "Integridad Tensional".

A pesar de que la tensegridad es un tema antiguo, aún es muy poco explorado e investigado en comparación con todas las aplicaciones que puede tener, especialmente en la Ingeniería, donde podría dar algunos aportes a los distintos usos que se dan en muchas estructuras de nuestra sociedad.

En el Perú, en especial en la ciudad de Arequipa, se ejecutan frecuentemente estructuras de acero destinadas a la protección solar (específicamente en infraestructuras deportivas), las cuales a través de una investigación relacionada con el comportamiento que tienen, evidenciaron que muchas de ellas fallan debido a un inadecuado diseño por parte de los proyectistas; como iniciativa a la indagación de nuevas tecnologías y propuestas de nuevas soluciones a problemas de la sociedad, se decide iniciar la presente comparación.

Esta comparación se desarrollará en 12 capítulos a lo largo de todo el trabajo de investigación; para el capítulo I, denominado "Planteamiento del problema y generalidades", se describe la problemática de la investigación en nuestra ciudad y se

presenta también las justificaciones por las cuales es necesaria y requerida la investigación, al igual que los objetivos y la hipótesis que se espera tras la comparación.

En el capítulo II “Fundamento Teórico”, se muestra toda la información relevante para poder entender los fundamentos de esta comparación, se describe cada uno de los documentos más importantes que respaldan la tesis, desde los antecedentes de la investigación hasta el estado de arte; también se presenta el marco teórico con cada uno de los temas necesarios para poder comprender bien el desarrollo de la investigación, especialmente temas relacionados con la tensegridad y las mallas tensegríticas.

En el capítulo III “Metodología”, como lo dice el título, se describe toda la metodología usada en este trabajo de investigación, se explica el alcance, el tipo de investigación, el tipo de enfoque y el tipo de diseño que presenta, se describen también las variables dependiente e independiente del tema propuesto, y se resumen todos los pasos a seguir para la elaboración de la tesis.

En el capítulo IV “Normativa Peruana para cargas de viento”, se explica detalladamente todo lo que contempla la Norma Técnica Peruana E.020 “Cargas”, específicamente todo lo relacionado a las cargas de viento; se habla de los 3 tipos de clasificaciones que hay, se muestra la fórmula estipulada para encontrar la velocidad de diseño en cada estructura, y a su vez se detalla cada uno de los factores adimensionales que afectan al cálculo de la presión o succión de viento desde una carga exterior o interior en la estructura.

En el capítulo V “Validación del programa SAP 2000 utilizado en las mallas tensegríticas”, se desarrollan 3 ejercicios propuestos por el libro “Ingeniería Mecánica Estática” de Russell Charles Hibbeler. El primero consiste en una armadura en 3 dimensiones, el segundo consiste en una estructura con cables, y el tercero en una estructura

combinada con cables y barras, un sistema similar a una malla tensegrítica; se desarrollan todos los ejercicios manualmente y luego computacionalmente mediante el programa SAP 2000, de tal forma que se obtengan los mismos resultados para poder asegurar que el programa a usar en esta investigación es seguro y confiable.

En el capítulo VI “Mallas tensegríticas compuestas por pequeños módulos tensegríticos”, se empieza el desarrollo de la comparación, aquí se describen 21 mallas tensegríticas de las 35 que se dan en toda la investigación, cada una de estas 21 mallas son generadas a partir de la unión de 9 módulos tensegríticos; se detallan también todas las consideraciones generales y los aspectos tomados para la construcción de cada una y el tipo de unión que generan.

En el capítulo VII “Mallas tensegríticas compuestas por manipulaciones Rot-Umbela”, se detallan todas las consideraciones generales y los aspectos tomados para la construcción de 14 mallas tensegríticas, todas formadas a través de la manipulación Rot-Umbela; se describe también paso a paso como es que se forma cada una de estas mallas, partiendo desde una estructura de doble capa.

En el capítulo VIII “Distribución de fuerzas por área tributaria en mallas tensegríticas”, se explica cómo es que se distribuyen las fuerzas de viento en cada una de las mallas tensegríticas a analizar, pasando de una presión de fuerza por área a una fuerza puntual por nudo. Se muestran además dos figuras por cada malla tensegrítica, con el objetivo de poder visualizar bien la distribución de fuerzas que se da en cada una de ellas; todas estas figuras están desde una vista en planta y solo se muestran sus capas superiores.

En el capítulo IX “Modelado y características de mallas tensegríticas”, se modelan en el programa SAP 2000 todas las mallas tensegríticas generadas y se las analiza bajo las cargas de viento respectivas, valores generados tras la distribución de fuerzas en el capítulo

8; se detallan las consideraciones generales para todas y se muestra gráficamente el modelado de cada una de ellas.

En el capítulo X “Resultados y comparación global de mallas tensegríticas”, se presentan en tablas todos los resultados obtenidos tras el análisis con cargas de viento del capítulo 9 (resultados de fuerzas, de reacciones máximas y mínimas en los apoyos, y de desplazamientos máximos en los puntos); tras la observación y discusión de los resultados, se hace una comparación global entre todas las mallas, para poder elegir a la malla tensegrítica que representará a las demás para la comparación final.

En el capítulo XI “Comparación final de malla tensegrítica con cobertura convencional”, se escoge a la cobertura metálica convencional representativa (habiendo encontrado antes a la malla tensegrítica representativa), y se procede a realizar la comparación final (objetivo de esta investigación); se adapta primero la estructura tensegrítica a las mismas condiciones con la que la cobertura metálica se diseñó, y luego se le analiza bajo un análisis elástico y un análisis estático no lineal, para la obtención de la velocidad de viento con la que falla.

En el último capítulo, el capítulo XII “Interpretación de Resultados y Discusión”, se discuten los resultados obtenidos tras la comparación final del capítulo XI, detallando cada aspecto tomado y explicando las cualidades y deficiencias que tiene cada una de las estructuras a comparar; se genera esta discusión para así poder obtener conclusiones sólidas y argumentadas, y para poder saber también que cobertura es mejor estructuralmente para una infraestructura deportiva menor en la ciudad de Arequipa.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y GENERALIDADES

1.1. Problemática de la investigación

Existen investigaciones y estudios que dan bastante información sobre la Tensegridad, algunos son arquitectónicos, otros físicos y unos cuantos ingenieriles; uno de los más influyentes en la rama de la Ingeniería Civil, es una investigación hecha sobre la alternativa de usar techos de tensegridad de determinada área, realizada por Ramakanta Panigrahi, Ashok Gupta y Suresh Bhalla, donde se concluye que es posible utilizar estructuras tensegríticas en refugios temporales o coberturas momentáneas. (Panigrahi, Gupta, & Bhalla, 2008). Es por esta razón que a pesar de que la tensegridad tenga algunas limitaciones, nace la duda y la necesidad de saber si estas estructuras tensegríticas (mallas o techos) son utilizables y realmente útiles para la Ingeniería Civil.

Al tratarse de mallas, el uso que tienen es similar al de las coberturas metálicas que se usan en todo el Perú, las cuales tienen como objetivo proporcionar protección solar a un área determinada; en infraestructuras deportivas menores es donde más se hace uso de estos tipos de cobertura, y la gran mayoría de estas toman la misma forma y el mismo diseño convencional; según Morón y Milón (2019), en la ciudad de Arequipa se hace uso de muchas de estas estructuras metálicas, y tras un análisis estructural de cada una de ellas, se encontró que muchas no cumplen con las características necesarias para un diseño seguro y funcional, fallando con velocidades de viento menores a las solicitadas por la norma peruana (Morón Flores & Milón Zevallos, 2019); si bien esas estructuras fallan por estar mal diseñadas y no por ser malas, probablemente no sean las únicas opciones que ofrezcan protección solar; por esta razón surge la necesidad de hacer una comparación entre estas coberturas convencionales y las mallas tensegríticas, para saber que tan funcionales y útiles son (mallas

tensegríticas), si es que tienen un mejor comportamiento estructural, y si pueden ser tomadas o no como alternativas en este tipo de infraestructuras.

1.2. Justificación de la investigación

1.2.1. Social

La comparación de ambas estructuras, indicará que tan buena opción de uso son las coberturas metálicas convencionales que se emplean en la actualidad, pudiendo existir otras alternativas para el mismo propósito; si con los resultados de la investigación se determina que las mallas tensegríticas son mejores que las metálicas convencionales para infraestructuras deportivas menores, se podrían empezar a usar en un futuro, brindando más seguridad a la sociedad y ofreciendo muchos otros beneficios con su utilización, logrando además que este tema llegue cada vez a más personas y su conocimiento sea global.

1.2.2. Ambiental

La ejecución de esta comparación no hace uso de materiales ni experimentos reales en nuestra localidad; los análisis y las observaciones son de los diseños y las resistencias que pueden llegar a tener cada una de las estructuras luego de su evaluación. Con los resultados que se obtengan, si las coberturas convencionales resultan mejores, no existirá un impacto ambiental negativo; por el contrario, si las mallas tensegríticas son mejores, existirá un gran impacto ambiental positivo, debido a que la construcción y el ensamblaje de este nuevo tipo de estructuras (mallas tensegríticas) no tienen ningún tipo de contaminación para el medio ambiente, ni en su ejecución, ni en su movilización o desarmado, incluso son más atractivas para la naturaleza que las convencionales.

1.2.3. Económica

Al obtener los resultados de la comparación, existirán dos posibilidades, que las mallas tensegríticas sean mejores que las coberturas convencionales o en su defecto, que sean similares o peores; si sucede lo último mencionado, las coberturas metálicas seguirán siendo la mejor opción para este tipo de infraestructuras, sin embargo, si sucede lo primero, se pueden empezar a usar más las mallas tensegríticas, y al requerir solo de tirantes y pequeños elementos rígidos (barras), se tendría un sistema mucho más ligero, reduciendo posibles costos en materiales, costos en construcción, en movilización y en mantenimiento.

1.2.4. Tecnológica

El fundamento de la Tensegridad consiste en el empleo de únicamente la tensión en unos elementos y la compresión en otros, sin involucrar otros tipos de esfuerzos, como la flexión, flexo-compresión, y torsión, que, si se dan en las coberturas metálicas convencionales, incluyendo además la acción combinada de ambos esfuerzos axiales para un mismo elemento (tensión y compresión). Así pues, con la investigación y el posible empleo de este nuevo sistema, se logrará una gran innovación en la ingeniería civil, implementando así una nueva tecnología en las infraestructuras deportivas menores. Además, con esta comparación, independientemente de los resultados, se incentivará al estudio y empleo de nuevas tecnologías y nuevos sistemas como este, que son novedosos y posiblemente mejores de los que se usan actualmente.

1.2.5. Político/Institucional

Las coberturas a comparar, y el lugar donde se llevará a cabo esta comparación, son estructuras que se usan mucho en proyectos de municipalidades, colegios e instituciones educativas, debido a que la mayoría de estas tienen espacios recreacionales para actividades deportivas como las que se mencionan en el presente trabajo; al tomar como estudio una de

estas estructuras, se podrá saber que tan bien implementadas y diseñadas están, tanto para las municipalidades, como para las instituciones educativas en Arequipa; si se concluye que las coberturas tensegríticas son mejores, se dará como opción esta estructura más moderna y segura para su implementación, obteniendo grandes beneficios en comparación con el uso habitual de las estructuras de siempre.

1.2.6. Ética

El presente estudio, a través de su comparación, busca mejorar sistemas y renovar estructuras que se usan mucho en nuestra sociedad, para poder obtener así más seguridad y mejores beneficios, como minimizar costos, mejorar la estética, facilitar la construcción, etc.; es decir, que se está tratando de encontrar una mejoría en nuestra sociedad, comparando sistemas típicos con sistemas nuevos, los cuales posiblemente ofrezcan una mejor solución a nuestras necesidades.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Analizar y comparar estructuralmente una malla tensegrítica de doble capa con una cobertura metálica convencional, para el uso de una infraestructura deportiva menor en la ciudad de Arequipa.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar e identificar la malla tensegrítica más resistente posible, por medio de 2 procedimientos, a través de un conjunto de módulos, y por medio de la manipulación “Rot-Umbela”.
- Obtener una cobertura metálica convencional representativa para la comparación.
- Obtener una malla tensegrítica representativa para la investigación.

- Obtener una adecuada distribución de cargas de viento para el análisis de fuerzas en mallas tensegríticas.
- Obtener el mecanismo de falla de ambas estructuras (cobertura tensegrítica y cobertura convencional) ante cargas de viento.
- Determinar y obtener la velocidad del viento con la que ambas estructuras llegan al colapso.
- Identificar y entender el comportamiento general de ambas estructuras, la transmisión de fuerzas y sus reacciones ante cargas externas de viento.
- Conocer el alcance y la utilidad de la malla tensegrítica de doble capa en una infraestructura deportiva menor.

1.4.Hipótesis

Para las infraestructuras deportivas menores en la ciudad de Arequipa, las mallas tensegríticas de doble capa son más resistentes estructuralmente en comparación con las coberturas metálicas convencionales, soportando mayores velocidades y presiones de viento.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte y Antecedentes de la Investigación

- **ESTRUCTURAS TENSEGRÍTICAS: INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

NOVEDOSAS:

- **Autor:** Valentín Gómez-Jauregui
- **Lugar y fecha:** Santander, España - 2008
- **Formato:** Artículo de Revista Científica
- **Descripción:** El artículo de revista muestra mucha información al respecto de lo que trata a grandes rasgos la tensegridad, muestra su historia, cómo es que se descubrió y quien la hizo; muestra los principios en los cuales está basado; muestra también sus ventajas y desventajas, sus aplicaciones en nuestro mundo, y muchos ejemplos hechos en la realidad.
- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Valentín Gómez-Jauregui, indica, que es posible desarrollar módulos de tensegridad en la realidad, y juntos varios de estos llegan a ser auto soportantes. Afirma que es un sistema autosoportante, que requiere de simetría, de elementos pretensados para los cables, y requiere de una muy delicada colocación de elementos, porque todo debe estar en equilibrio (fuerzas); además, indica que los elementos trabajan en un rango no lineal. Indica, también, que es un sistema con flexibilidad, pero a la vez con mucha rigidez y firmeza. (Gómez-Jauregui, Estructuras Tensegríticas: ingeniería y arquitectura novedosas, 2008)

Esta revista nos indica como dato importante, que la invención de la Tensegridad como tal, fue gracias a Kenneth Snelson, mientras que el descubrimiento fue por Buckminster Fuller.

René Motro (quien fue quizás el que más cerca y preciso estuvo de definir este término) dijo que:

Un sistema tensegrítico es un sistema que está en equilibrio, es estable por sí mismo y comprende un conjunto discontinuo de componentes comprimidos dentro de un conjunto continuo de componentes atirantados. (Motro, 2003)

A opinión personal, esta descripción es muy técnica, y un poco difícil de entender; para términos más coloquiales, se puede decir que la tensegridad es:

Un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos (generalmente puntales o barras) no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes tensados (habitualmente cables) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema. (Tang, 2018, pág. 3)

- **TENSEGRIDAD Y ARQUITECTURA:**

- **Autor:** Ruichen Tang
- **Lugar y fecha:** Madrid, España – 11 de Junio de 2018
- **Formato:** Trabajo de Fin de Grado
- **Descripción:** El trabajo trata de una investigación y recopilación de teoría existente que hay sobre todo el tema de la Tensegridad, desde su origen, cómo es que funciona, su definición, su evolución, la tipología y tipos de estructuras tensegríticas que existen en la actualidad. También habla de algunas

aplicaciones de este principio en la realidad, tales como en obras civiles o estructuras grandes, mostrando en cada una de estas, si se trata de una verdadera o falsa tensegridad. Se muestra la nomenclatura básica de elementos de tensegridad según varios autores, y las características que deben tener estructuras de este tipo, como es que se forman y en que grupos se dividen.

- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** La tensegridad depende mucho de la pre-tensión de los elementos, para su buen funcionamiento. Este sistema como estructura pura, no puede ser adoptada aún en edificaciones, debido a que no es mejor ni similar a los materiales usados en la actualidad, como el concreto armado; a pesar de no ser muy viable su implementación en edificaciones, puede tener otros propósitos, como estructuras de carpas resistentes a terremotos, con construcción fácil y rápida, o estructuras que sean solamente estéticas. (Tang, 2018)
- **DISMOUNTABLE STEEL TENSEGRITY GRIDS AS ALTERNATE ROOF STRUCTURES:**
 - **Autor:** Ramakanta Panigrahi, Ashok Gupta, y Suresh Bhalla
 - **Lugar y fecha:** Delhi, India – 24 de Diciembre de 2008
 - **Formato:** Artículo de Revista Científica
 - **Descripción:** El artículo de estos autores, muestra un análisis estructural de cómo es que funcionaría y se cómo se comportaría un conjunto de módulos de Tensegridad (módulo de medio cuboctaedro individual) en una malla o techo desmontable. En los resultados se ve que es posible usarlas en estructuras reales como refugios temporales, o similares. El análisis se hizo

en programas de modelado con elementos finitos, y a la vez se hizo con experimentos reales, mostrando su fabricación y cada parte del ensamblado, como las uniones de los elementos; primero se hizo con una malla de 1x1m y luego con una de 2x2m, para así comprobar y asegurarse que los resultados del programa sean los más similares a los que se reflejan en la realidad, y poder así analizar luego, con confianza, una estructura final con una malla de 8x8m. (Panigrahi, Gupta, & Bhalla, 2008)

- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Las mallas tensegríticas, si son funcionales y viables, especialmente cuando se trata de un refugio temporal, o un área afectada por calamidades, donde se requiere un montaje fácil y rápido para cubrir áreas. Se puede hacer un análisis estructural de cada elemento de estas mallas para ver desplazamientos, fuerzas internas y rigideces. Al validar la malla tensegrítica con un área de 8m x 8m, se afirma que se pueden usar estas mallas para áreas más grandes.
- **MALLAS TENSEGRÍTICAS DE DOBLE CAPA Y MANIPULACIONES DE ROT-UMBELA:**
 - **Autor:** Valentín Gómez-Jauregui
 - **Lugar y fecha:** Santander, España – 1 de Junio de 2011
 - **Formato:** Artículo de Revista Científica
 - **Descripción:** Este artículo, muestra la teoría que hay sobre estructuras tensegríticas, ya sean ficticias o existentes en la realidad, especialmente de mallas de doble capa, que tienen cierto nivel de tensegridad; así pues, estas pueden ser transformadas de MDC (malla de doble capa) a MTDC (malla tensegrítica de doble capa) mediante un proceso denominado “manipulación

de Rot-Umbela”. Este trabajo describe todo el proceso para conseguir una MTDC desde una MDC convencional. (Gómez-Jáuregui, Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela, 2012)

- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** El autor, gracias a la teoría de la Manipulación Rot-Umbela, nos demuestra que podemos crear mallas tensegríticas de doble capa, las cuales pueden ser de infinitas formas para no tener que usar siempre las mismas, incluso para no tener que obtener mallas de un bajo nivel de tensegridad, que no sean totalmente puras, por lo que el aporte de este trabajo es una gran herramienta para escoger una determinada malla de tensegridad, que pueda ser nueva y funcione adecuadamente con nuestro propósito.
- **TENSILE TENSEGRITY STRUCTURES:**
 - **Autor:** Robert. E. Skelton, y Kenji Nagase
 - **Lugar y fecha:** La Jolla, San Diego, Estados Unidos- 24 de Abril de 2012
 - **Formato:** Artículo de Revista Científica
 - **Descripción:** Este trabajo se enfoca en la tensión de las estructuras de tensegridad; coge un sistema de unidades simples de Tensegridad, con un elemento en compresión (barra) y cuatro elementos en tracción (cuerdas), y hace el estudio a través de fórmulas para identificar el ángulo más óptimo entre las cuerdas de cada unidad, para así minimizar la masa del Sistema total; todo esto lo hace con una restricción de rigidez requerida.
 - **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Se puede optimizar un sistema de tensegridad para que sea lo más eficiente en cuanto a la tensión, a

través de variaciones en los ángulos de las cuerdas; y a su vez, se puede minimizar la masa del sistema sin tener que variar la rigidez total.

- **NOVEL TECHNIQUE FOR OBTAINING DOUBLE-LAYER TENSEGRITY GRIDS:**

- **Autor:** Valentín Gómez-Jauregui, Rubén Arias, César Otero y Cristina Manchado.
- **Lugar y fecha:** Cantabria, España – 19 de Abril de 2012
- **Formato:** Artículo de Revista Científica
- **Descripción:** Este documento desarrolla la explicación completa sobre la manipulación Rot-Umbela, desarrollada por el mismo Gómez-Jauregui; detalla todo este sistema para poder convertir DLG convencionales a DLTGs de diferentes formas, sin usar siempre las estructuras habituales, donde se duplican y se juntan todas para formar así una malla Tensegrítica formada por varios módulos. Además, se muestra las fuerzas internas que hay en el sistema y el análisis de la grilla.
- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Se puede generar una nueva malla Tensegrítica de doble capa a partir de la manipulación Rot-Umbela de una malla simple de doble capa, encontrando buenos resultados y posibles mejores mallas de las que se construyen al unir distintos módulos de tensegridad.

- **INTERACTIVE DYNAMIC DESIGN AND ANALYSIS OF TENSEGRITY SYSTEMS:**

- **Autor:** Julien Averseng, Jeromé Quirant, Jean-Francois Dubé

- **Lugar y fecha:** Montpellier, Francia – 22 de Marzo de 2012
- **Formato:** Artículo de Revista Científica
- **Descripción:** Se hace un análisis de programas en este artículo, usando el T2000 y el CAST3M, los cuales difieren un poco en cuanto a su metodología, ya que uno es especial para estructuras tensegríticas usando matrices de rigidez global, y otro usa elementos finitos para la mecánica estructural y de fluidos, respectivamente. Se hace una comparación de ambos programas con el programa ToyGL, y se demuestra a través de estos que, si se pueden modelar este tipo de mallas tensegríticas, tanto en 3d como en 2d, analizando su estado inicial de pretensado, y su estado final global, y también analizando su estado cinemático al plegarlas; además, se demuestra que se puede ir modificando durante el análisis las propiedades de los elementos, para ver su reacción ante agentes externos, como los cambios por temperatura, etc. Se puede ver el comportamiento no lineal en estos programas, y se puede ver los mecanismos de fallas, junto con todas las fuerzas internas en los elementos, al mismo tiempo que se demuestra manualmente algunas fórmulas que se consideran el programa, como el análisis dinámico de elementos de masa resorte.
- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** A través de programas computacionales, se puede conocer el comportamiento estructural de las mallas tensegríticas, incluso desde su estado de pretensado inicial. De los dos programas analizados, es más exacto el programa con uso de matrices de rigidez, considerando características como elementos de masa-resorte, y no de elementos finitos; ambos programas pueden introducir valores adecuados

de pretensado, durante y antes del análisis, haciendo que las longitudes de los elementos sean menores o mayores con el paso del tiempo; también, se pueden ver distintos mecanismos de falla, ante cargas excesivas.

- **STRUCTURAL PERFORMANCES OF SINGLE-LAYER TENSERITY DOMES:**

- **Autor:** Davide Cadoni y Andrea Micheletti
- **Lugar y fecha:** Roma, Italia – 2 de Abril de 2012
- **Formato:** Artículo de Revista Científica
- **Descripción:** En este trabajo, lo que se hace es diseñar y evaluar a la vez una cúpula formada por una malla tensegrítica de una sola capa, y posteriormente compararla con una cúpula común y corriente con materiales convencionales. Se hizo la búsqueda de la mejor forma de cúpula, comparado con trabajos anteriores similares, y se obtuvieron buenas conclusiones y comparaciones entre este principio de tensegridad y las metodologías comunes.
- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Los domos de compresión flotante (tensegridad), son viables y funcionales, incluso siendo una malla de una sola capa; comparándolos con estructuras convencionales de acero y perfiles, este tipo de estructura resulta ser en cierto grado menos pesado que las convencionales, pero no tanto, sin embargo, si son mucho más caras, debido al proceso de fabricación. Se pueden hacer estructuras de este tipo, partiendo desde cero, creando uno mismo la forma que tendrán estas mallas, pero aún su área de investigación es amplia, y sus investigaciones se resultan largas; en nuevas investigaciones, se podrían definir las propiedades de los elementos, las restricciones geométricas y los sistemas de anclaje.

- **DESIGN ASPECTS OF A DEPLOYABLE TENSEGRITY-HOLLOW-ROPE**

FOOTBRIDGE:

- **Autor:** L. Rhode-Barbarigos. N. Bel Hadj Ali, R. Motro y I.F.C. Smith
- **Lugar y fecha:** Lausanne, Suiza – 22 de Marzo de 2012
- **Formato:** Artículo de Revista Científica
- **Descripción:** Este documento se centra en aspectos de diseño de una pasarela desplegable de cuerda hueca de tensegridad; se hace un análisis de diseño general para su implementación, tomando como variable la presencia e influencia de los cables agrupados, que sean continuos o discontinuos, y el uso de resortes para el comportamiento dinámico y estático del sistema. Así pues, para estos análisis, se trata de encontrar algunos esquemas de actuación para identificar los casos en los que el despliegue se vuelve crítico.
- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** En este tipo de pasarelas de tensegridad, se encuentra que el diseño con resortes es el mejor para reemplazar los actuadores, justo cuando el despliegue es el caso de diseño crítico, y al cumplir con los requisitos estáticos y dinámicos, los elementos del sistema aumentan sus dimensiones. El empleo de estos resortes en el sistema, reduce significativamente el número de actuadores y elimina sus limitaciones. Para estructuras de este tipo, que sean desplegables, es muy importante incluir el despliegue o los escenarios de cambio de forma.

- **TENSEGRIDAD COMO SISTEMA ESTRUCTURAL ALTERNATIVO**

APLICADO A PUENTES PEATONALES:

- **Autor:** Jaswant Israel Cobos Cobos

- **Lugar y fecha:** Cuenca, Ecuador – Febrero de 2018
 - **Formato:** Trabajo de Titulación
 - **Descripción:** Este trabajo es una tesis, donde se buscó la forma y el diseño de un puente peatonal usando la tensegridad; al no haber normativa para este sistema, se cuidó mucho las deflexiones máximas permitidas y las capacidades de los elementos. El trabajo se centra mucho en el pre esfuerzo integral, donde se buscó un modo factible para la geometría propuesta, a través de programas como MatLab, MatCad y Sap2000, usando plantillas de otros autores y demostrando que se puede ensamblar este tipo de puente.
 - **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Es posible diseñar un puente peatonal tensegrítico de 30m de longitud, usando un determinado módulo, respetando las deflexiones y requisitos para puentes peatonales que rige la norma. En este tipo de estructuras es muy influenciado el estado de pretensado de los elementos antes del ensamblaje de la estructura; para que la estructura pueda ser más larga en cuanto a su luz, y pueda soportar más peso sin deflexiones excesivas, se debe modificar el estado de pretensión. Es necesario hacer un análisis no lineal de pandeo para este tipo de estructuras.
- **DESIGN, FABRICATION AND CONSTRUCTION OF A DEPLOYABLE DOUBLE-LAYER TENSEGRITY GRID:**
 - **Autor:** Valentín Gómez-Jauregui, Michael Quilligan, Cristina Manchado, Cesar Otero
 - **Lugar y fecha:** Francia– 31 de Enero de 2018
 - **Formato:** Artículo de Revista Científica

- **Descripción:** Este último artículo de la época, muestra un procedimiento para diseñar, fabricar y ensamblar una malla tensegrítica de doble capa desplegable, compuesto por módulos de tensegridad Quastrut-S, que sea económica y liviana. Se construyó experimentalmente una estructura de cuadrícula de 4 x 4 m, mostrando todas las propiedades de los materiales, las uniones y como se hizo el ensamblaje.
 - **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Estas mallas tensegríticas son fácilmente desplegadas, y su fabricación y montaje son viables; son fáciles de almacenar y montar rápidamente en poco tiempo, son seguras, económicas, livianas y simples. El auto estrés en los elementos es difícil de encontrarlo al momento de armar la malla, y aún es difícil definir con exactitud las fuerzas internas de tensión en los elementos al igual que las deflexiones y los desplazamientos en los nudos.
-
- **PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO ANTE CARGAS DE VIENTO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE COBERTURA EN INFRAESTRUCTURAS DEPORTIVAS MENORES EN LA CIUDAD DE AREQUIPA**
 - **Autor:** Morón Flores Pierina Antuanette, Milón Zevallos Amdreé Alexis
 - **Lugar y fecha:** Arequipa, Perú – Septiembre de 2019
 - **Formato:** Tesis de Titulación
 - **Descripción:** El trabajo hecho por estudiantes de la Universidad Católica de Santa María evidencia el mal diseño que existe en la gran mayoría de

coberturas metálicas que se usan en la ciudad de Arequipa, donde de 24 estructuras analizadas, solo 4 resisten la velocidad mínima de viento requerida por la norma técnica peruana; todo esto se hizo a través de una modificación del análisis Push Over obteniendo presiones de viento y mecanismos de fallas ante las cargas de viento. Posterior a esto se hizo una propuesta de metodología para un adecuado análisis y un buen diseño para todas estas estructuras metálicas en infraestructuras deportivas menores, evitando que fallen con velocidades muy bajas y así poder respetar la norma; se probó también esta propuesta concluyendo que es eficaz y viable, dando buenos resultados de análisis.

- **Aporte Teórico / Metodológico (conclusión):** Con este trabajo se sabe que se puede modificar y usar parte del análisis elástico push over para analizar estructuras metálicas y no solo edificaciones de concreto armado, obteniendo velocidades de viento, mecanismos de fallas y presiones de viento. En la ciudad de Arequipa existen muchas coberturas metálicas de las cuales solo algunas están bien diseñadas; así pues, al ser similares toda estas, se pueden comparar con otro tipo de estructuras, para analizar si son las mejores opciones para nuestra ciudad. Con los resultados obtenidos en este trabajo se podrá realizar la comparación del presente trabajo de investigación.

2.2.Marco Teórico

2.2.1. *Tensegridad:*

Para entender el presente trabajo hay que conocer a exactitud cuál es el fundamento y la teoría de la Tensegridad. Este término, tiene diferentes definiciones a lo largo de los

últimos 50 años. Para la presente investigación, se le va a definir tal cual lo hizo el máximo investigador actual sobre el tema, Gómez-Jauregui, quién dice que:

La Tenseguridad es un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos (generalmente barras) no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes traccionados (habitualmente cables) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema. (Gómez-Jáuregui, 2008, pág. 87)

A modo ilustrativo, se mostrará una estructura realizada por uno de los padres de la Tenseguridad, o de la “compresión flotante”, tal como el la llamaba; el autor se trata de Kenneth Snelson.

Figura 1

B-Tree.



Nota. Foto tomada de una escultura de tenseguridad, basada de Kenneth Snelson. Adaptada de “B-Tree” [Fotografía], 1981, Kenneth Snelson

(<http://kennethsnelson.net/category/sculptures/outdoor-works/>).

La figura 1 refleja gráficamente de lo que trata la Tensegridad. Este sistema expresado en una forma más conceptual, es un sistema espacial reticulado, compuesto por elementos comprimidos y otros tensados, que forman un estado de equilibrio estable entre sí; cada barra está conectada con elementos tensados o cables en sus dos extremos, y cada cable está conectado con barras o elementos comprimidos en sus extremos también, dándole esa gran forma a la tensegridad, como si la estructura estuviera “flotando”.

El diseño de estos sistemas es muy complejo porque se pueden dar distintas formas para lograr dicho principio, distintos ángulos entre barras, distintas dimensiones, distinta disposición entre elementos, etc. Cabe resaltar que este sistema requiere de fuerzas internas grandes en los cables (estado de pretensión), las cuales permiten estabilidad y rigidez en todos los elementos.

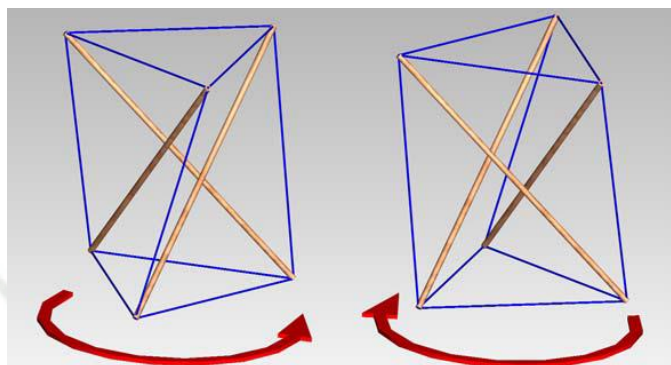
2.2.2. Módulos de Tensegridad para la formación de mallas tensegríticas

Existen varios módulos de Tensegridad creados o diseñados desde hace mucho tiempo atrás, desde el inicio de la Tensegridad hasta el día de hoy, los cuales tienen diferentes fuerzas internas, diferentes geometrías, diferentes resistencias ante cargas externas, diferente número de tensores y compresores, diferente ángulo entre elementos, etc. Estos módulos que ya son estables de por sí, resisten cargas externas y transmiten todas las fuerzas entre sus elementos; cuando se habla de una malla tensegrítica, se refiere al conjunto de varios módulos iguales, que unidos llegan a formar una gran malla de tensegridad, que reacciona mucho mejor que un solo módulo. A continuación, se verán algunos de los módulos más prácticos y conocidos en este tema:

- **Simplex:**

Figura 2

Módulo Tensegrítico "Simplex"

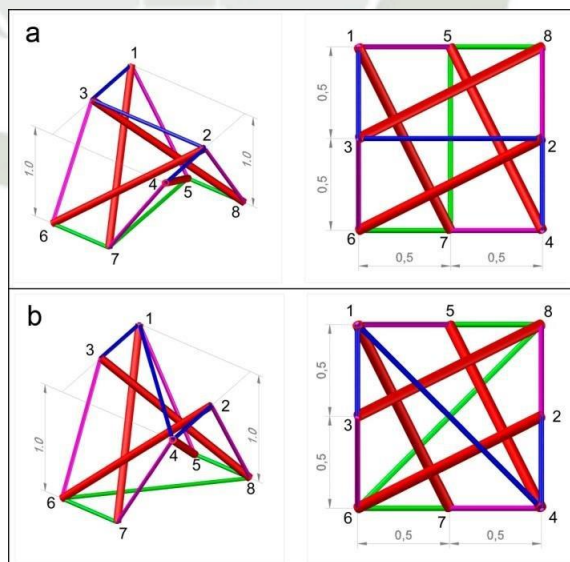


Nota. Adaptada de *Tensegridad, Estructuras de Compresión flotante* (p. 3), por Valentín Gómez-Jauregui, 2013.

- **Quastrut-S y Quastrut-Z:**

Figura 3

Módulo Tensegrítico "Quastrut-S" (a) y "Quastrut-Z" (b)

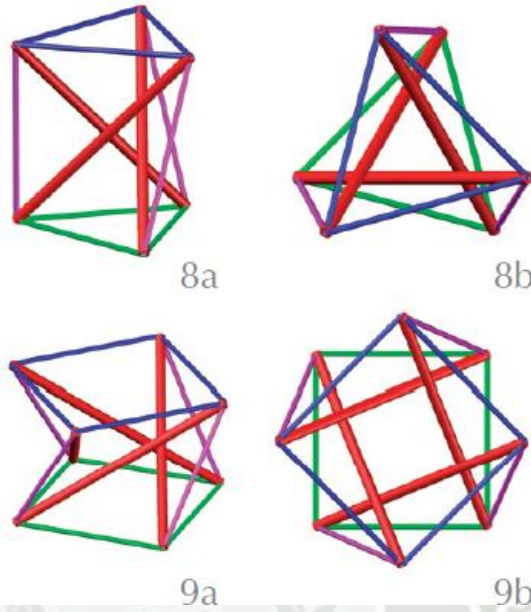


Nota. Adaptada de *Comparison between new families of Double-Layer Tensegrity Grids* (p. 2), por V. Gómez-Jauregui, C. Manchado, C. Otero, 2013, EDITORIAL STARBOOKS.

- Simplex y Cuádruplex:

Figura 4

Simplex (8) y Cuádruplex (9), en perspectiva (a) y en planta (b)

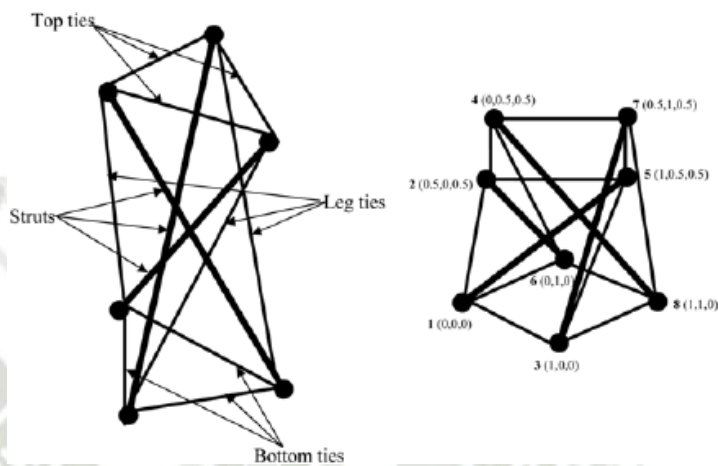


Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 335), por Valentín Gómez-Jauregui, 2012, Informes de la Construcción.

- **Simplex y medio Cuboctaedro (con sus partes):**

Figura 5

Simplex con sus partes (a) y Mitad de Cuboctaedro (b)

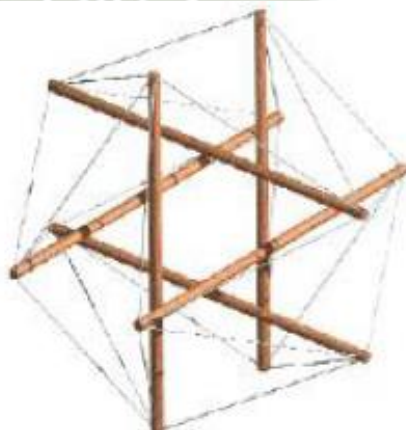


Nota. Adaptada de *Dismountable steel tensegrity grids as alternate roof structures* (p. 239), por R. Panigrahi, A. Gupta, S. Bhalla, 2009, Steel and Composite Structures.

- **Octaedro expandido:**

Figura 6

Octaedro Expandido

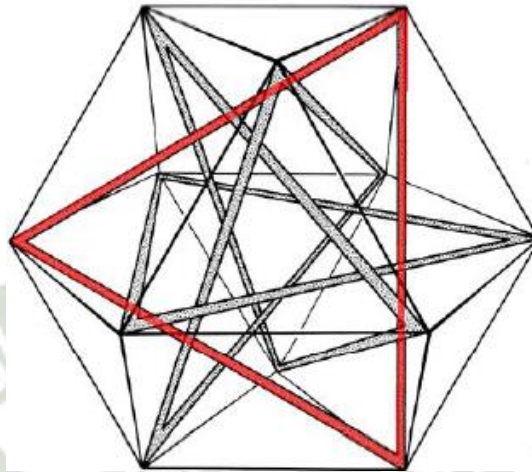


Nota. Adaptada de *Tensegridad y Arquitectura* (p. 8), por Ruichen Tang, 2018, Universidad Politécnica de Madrid.

- **Cuboctaedro:**

Figura 7

Cuboctaedro



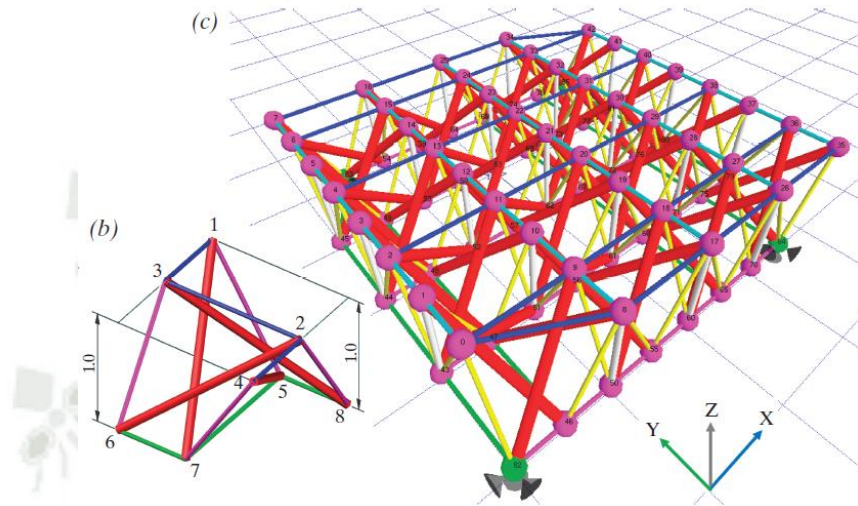
Nota. Adaptada de *Tensegridad y Arquitectura* (p. 17), por Ruichen Tang, 2018, Universidad Politécnica de Madrid.

Así como estas formas antes vistas, también existen muchas otras bibliografías donde se pueden ver infinidad de estructuras estables de este tipo, como las configuraciones de análisis que hizo Emmerich, etc.

Como se mencionó antes, al escoger un determinado módulo de tensegridad, y juntarlos con varios de estos, se logra una gran malla tensegrítica capaz de auto soportarse y soportar cargas externas; en la figura 8, se puede ver un claro ejemplo de esto mencionado.

Figura 8

Módulo de Tensegridad "Quastrut-S" (b) y Malla tensegrítica a partir de varios módulos Quastrut-S (c)



Nota. Adaptada de *Design, Fabrication and Construction of a Deployable Double-Layer Tensegrity Grid* (p. 14), por V. Gómez-Jauregui, M. Quilligan, C. Manchado, C. Otero, 2018, Structural Engineering International.

Como se puede ver en la Figura 8, a partir de varios módulos tensegríticos “Quastrut-S”, se puede formar una malla tensegrítica. Para todo esto se debe de tener algunas consideraciones, como saber dónde se conectarán los módulos, si las uniones se harán entre sus vértices o si se harán entre sus lados y cables, ya que dependiendo de eso, se considerará si la estructura es de una verdadera o falsa Tensegridad (existen estructuras denominadas como mallas tensegríticas cuando no lo son); también hay que tener en consideración de que al unir módulos, se pueden hacer algunos arreglos, como: intercambiar algunas barras por cables, usar una misma barra para la unión de dos módulos distintos, esto último sucede ya que al juntar estas formas geométricas iguales, puede que dos barras iguales coincidan en

una misma ubicación y se junten, reforzando indirectamente así a un mismo elemento (sobredimensionamiento de la estructura).

2.2.3. *Clasificación para la unión de módulos de tensegridad:*

Según los tipos de conexión de módulos, los sistemas se pueden clasificar de distintas formas, una de ellas es a través de números:

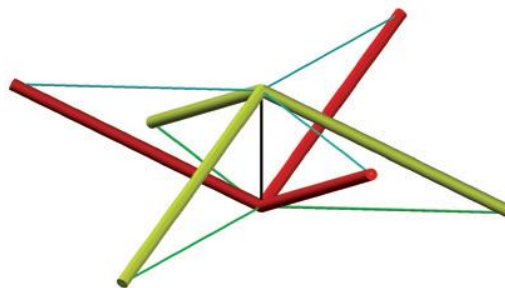
- Primero tenemos las conexiones con barras aisladas, que toman un valor de $k=1$. Estas barras aisladas se dan cuando los elementos en compresión, no tienen ningún contacto entre sí, la única forma de unión que tienen es mediante elementos que trabajan a tracción pura. Estas a su vez, pueden ser dos:
 - *Conexión Vértice-Arista*. Aquí, se pueden dar dos formas también, la unión Unilateral y la unión Bilateral; según Gómez-Jauregui, la primera se da cuando “dos vértices de ambas capas superior e inferior de un mismo módulo intersecan dos aristas, superior e inferior respectivamente, de otro módulo” (Gómez-Jauregui, 2012, pág. 336); y la segunda se da cuando: “el vértice de un módulo interseca la arista de otro en una de las capas (p. ej. superior) mientras que a su vez una arista suya es contactada por un vértice del otro módulo en la otra capa” (Gómez-Jauregui, 2012, pág. 336)
 - *Conexión Arista-Arista*. Esta conexión Gómez-Jauregui la define cuando “dos módulos adyacentes comparten la misma arista parcialmente (los vértices no coinciden) en ambas capas (superior e inferior).” (Gómez-Jauregui, 2012, pág. 336)

- Luego se tiene a las Barras Contiguas, que toman un valor de $k > 1$. Esta clasificación se da cuando los miembros de un módulo que trabajan a compresión, comparten o hacen contacto directo con los compresores de otros módulos a través de sus vértices. A esta clasificación, se le da cierta controversia, porque muchos autores no consideran como “tensegridad pura” estos sistemas al no tratarse de barras comprimidas sin contacto alguno con otras; sin embargo, otros autores, si lo hacen, ya que según ellos se sigue cumpliendo el principio de estabilidad a través de elementos que trabajan únicamente a fuerza axial.

Como se vio anteriormente, existen varias formas adquiridas por los módulos, desde figuras geométricas simples como rectángulos, hasta figuras complejas, pero siempre todas simétricas; también existen grupos de compresores aislados, como el uso de “v” entre dos barras o más, las cuales se enlazan en un solo punto y forman como una estrella, y junto con otra parte igual pero opuesta, unidas mediante cables, logran un diferente tipo de módulo tensegrítico, tal como se muestra en la figura 9.

Figura 9

Módulo de Tensegridad en forma de "v"



Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 336), por Valentín Gómez-Jaúregui, 2012, Informe de la Construcción.

La figura 9 nos demuestra que un módulo de tensegridad no solo puede formarse por barras aisladas, sino que también puede hacerse mediante la unión de barras juntas, formando así conjuntos aislados.

2.2.4. Manipulaciones de Rot-Umbela y “Mallas Tensegríticas de doble capa” (MTDC)

Las mallas tensegríticas de doble capa, más conocidas como “MTDC”, son un sistema conformado por dos mallas traccionadas paralelas, conectadas por una capa intermedia, la cual presenta únicamente elementos comprimidos y elementos traccionados, ya sean colocados verticalmente y/o diagonalmente.

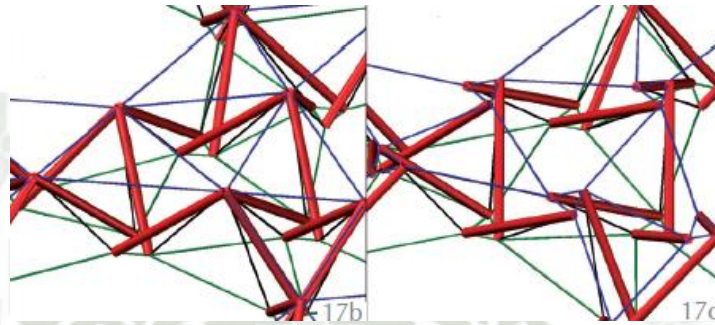
Existe un método manual, para poder establecer un patrón adecuado y para poder darle alguna forma en específico a este nuevo sistema.

Las manipulaciones Rot-Umbela, son este método, que lo que hace es pasar de una malla de doble capa convencional (MDC), a una malla tensegrítica de doble capa. Para lograr esto, lo que se hace es “abrir” cada vértice de cada polígono de una malla convencional (donde convergen los elementos comprimidos); es decir, que si a un vértice llegan 4 barras, este nudo de conexión se abre, y las 4 barras se separan cierta distancia; explicándose de otra manera desde una vista en planta, a ese vértice se le pone un círculo de cierto radio (justo en el centro), el cual cortará a todas las barras que llegan (en este caso 4), luego, al círculo creado con cuatro pequeñas barras dentro de él, se le hace una rotación de determinado ángulo, finalmente, los nuevos vértices generados por las barras cortadas, buscan nuevamente unirse con sus restos cortados (ubicados dentro del círculo), siendo así rotados y ubicados en un nuevo punto; visto en una forma en 3D, finalizado todo el proceso, se puede observar cómo las barras cambiaron de dirección y ya no convergen en el mismo punto de antes (vértice), todas son barras separadas y tienen distintos vértices, sin ningún contacto entre ellas. Todo este proceso, se hace tanto para la parte inferior, como para la

parte superior de la MDC, y así una estructura que no es tensegrítica, se convierte en una, logrando que ninguna barra se toque entre sí, tal cual como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Transformación de MDC a MTDC en una sola capa



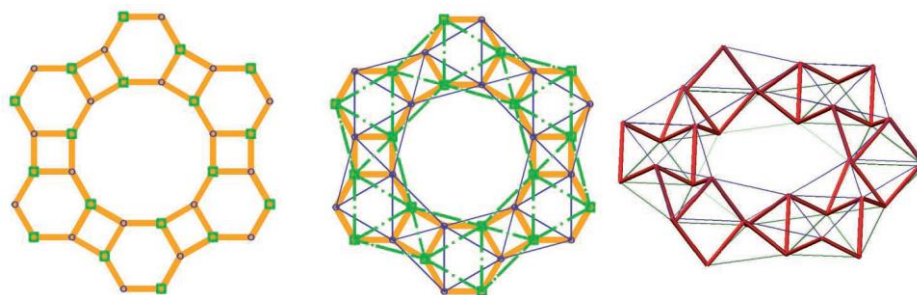
Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 339), por Valentín Gómez-Jaúregui, 2012, Informe de la Construcción.

Esto es lo que se conoce como “tensegrizar a la estructura”, ya que pasa de ser una estructura de doble capa simple, a una estructura tensegrítica de doble capa.

Para poder entender mejor este procedimiento, se verá en la figura 11, 3 imágenes extraídas del mismo documento de donde se extrajo toda esta información.

Figura 11

Ejemplo de tensegrización de una estructura



Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 338), por Valentín Gómez-Jaúregui, 2012, Informe de la Construcción.

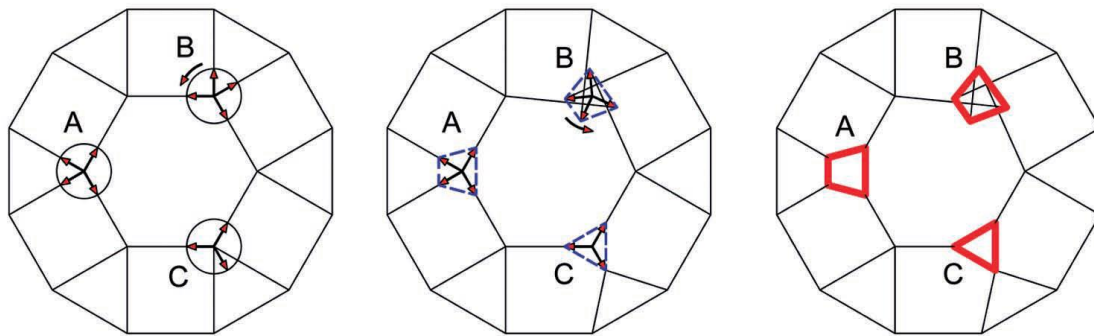
Lo que dicen estas imágenes, es que se puede iniciar con una figura en 2D como el de la izquierda (primera foto de líneas amarillas); esta figura tiene vértices de color verde y no se puede ver, pero tiene dos capas, es decir que tiene profundidad. La segunda imagen muestra unas líneas azules y unas verdes, las azules forman triángulos y se conectan en algunos de los vértices de dicha capa, mientras que las verdes cogen los vértices restantes. Si se observa la tercera imagen, que está en 3D, se puede apreciar cómo es la distribución en el espacio de la unión de ambos colores de líneas, las líneas verdes se trataban de la parte superior del sistema, es decir que los vértices seleccionados eran los de la parte superior, y las líneas azules se trataban de los vértices de la parte inferior. Así es como de una forma dada en 2d (primera imagen de la figura 11), se pasa a una estructura tensegrítica de dos capas (tercera imagen de la figura 11); cabe resaltar que esta estructura es tensegrítica, pero no en su totalidad.

Para que esta estructura alcance una completa tensegridad, se debe mejorar añadiéndole cierto grado de rigidez, y acá es donde entra la “manipulación de Rot-Umbela”; como se explicó antes, esta manipulación consiste en girar los vértices, tanto de la capa superior como inferior, y a través de este procedimiento ocurrió algo bastante interesante, pues resulta que en una investigación donde se usaron varias de estas formas en 2D, se trabajó con una cuadrícula formada por cuadrados, a la cual se le hizo estas manipulaciones, y se obtuvo como resultado final una malla tensegrítica 3D totalmente igual a una formada por la unión de módulos ya conocidos, los cuales se usaron tiempo atrás por diferentes autores para explicar este principio de Tensegridad; esto demuestra que la teoría de la manipulación Rot-Umbela es funcional.

La “tensegrización” tiene también cierta nomenclatura; para poder entender bien esto, se mostrarán unas imágenes en la figura 12.

Figura 12

Ejemplos del número de "valencia de umbela"



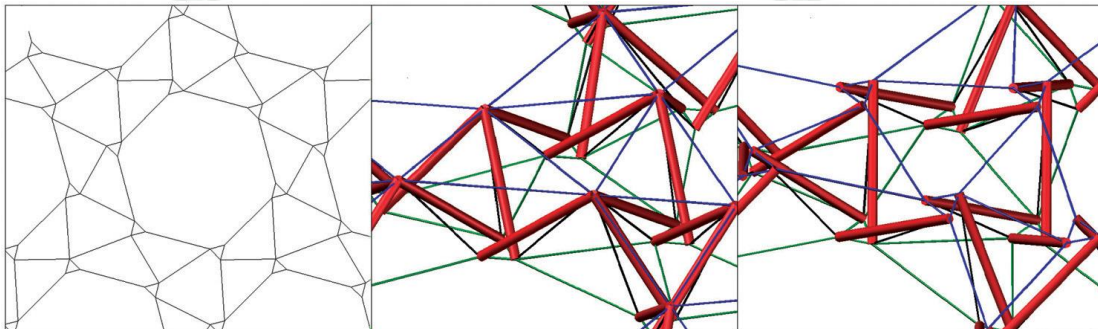
Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 338), por Valentín Gómez-Jaúregui, 2012, Informe de la Construcción.

Observando la figura 12, se puede apreciar la vista en planta de una estructura 3D que tiene elementos comprimidos y traccionados; esta tiene 3 ejemplos tomados (vértices A, B y C), el vértice A tiene lo que se llama una valencia de " v " = 4, ya que en él, inicialmente confluyen 4 aristas del mismo plano, y al finalizar la manipulación Rot-Umbela (última imagen) termina también con una "valencia de umbela" (" u ") de 4 (4 lados y 4 aristas en el polígono cerrado); a este vértice (A) no se le dio ninguna rotación, sin embargo, al ejemplo B si se le da un giro de 120° en sentido anti horario durante la manipulación; en este ejemplo (B), las 4 barras confluyentes se deforman tras el giro y ya no terminan en el mismo vértice, sino que terminan en uno nuevo; para este último caso los valores de " v " y de " u " siguen siendo de 4 a pesar de la rotación; por otro lado, en el ejemplo C, se puede observar que con 4 barras solo se consideraron 3 lados en el polígono, y no 4, haciendo que 2 de las barras se corten y se junten en un nuevo vértice (segunda imagen); en este último caso, se comenzó con un valor de " v " igual a 4 y se terminó con un valor de " u " de 3.

Si al ejemplo de la figura 12 se le hace una manipulación natural (“ v ” = “ u ”) a todos sus vértices, si se extienden sus barras cortadas, y si se replica el procedimiento tanto en su capa superior como inferior, la estructura quedaría como se muestra en la tercera imagen de la figura 13.

Figura 13

Tensegrización de una estructura



Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 339), por Valentín Gómez-Jaúregui, 2012, Informe de la Construcción.

Para cerrar con este tema, se puede observar como la primera imagen de la Figura 13 representa lo que pasaría en planta si a toda una estructura se le da una manipulación de “ u ” = 3, cualquiera sea el número de barras confluyentes en un mismo vértice siempre se formará un polígono de 3 lados (triángulo), y las barras que llegaban a dicho punto se redistribuirán en los nuevos vértices; posteriormente, si a cada uno de los triángulos de la capa inferior se les da una rotación, se obtiene la estructura de la segunda imagen; a pesar de ya haber separado las barras de la parte inferior, aún se tiene un sistema de $k=3$ porque en la parte superior se tienen unidas tres barras en un mismo vértice, sin embargo, si se hace el mismo procedimiento también en la parte superior, todas las barras finalmente estarían separadas y así la estructura en su totalidad tendría un valor de tensegridad de $k=1$. Tras todo este procedimiento, la estructura si puede ser calificada como una estructura pura de Tensegridad.

2.2.5. *Infraestructuras deportivas y/o recreativas menores*

En la presente investigación, al comparar dos estructuras con propósitos similares, se requiere de un lugar o de una infraestructura dada para poder llevar a cabo la comparación; en este caso, al tratarse ambas estructuras de coberturas metálicas, es claro que la aplicación se dará en lugares amplios y donde se requiera de protección solar, y para esto solo hay un tipo de infraestructuras: las “infraestructuras deportivas”, donde por lo general se alberga losas deportivas como de fútbol, vóley y básquet, e incluso alguna otra estructura adicional, como graderías, almacenes, baños públicos, etc. dependiendo de la consideración de cada país y localidad.

Por ejemplo, según el Instituto Colombiano de deportes, este tipo de infraestructuras se puede definir como:

Un espacio físico en donde se desarrollan una o más actividades o disciplinas deportivas en donde su dimensionamiento se realiza con base en especificaciones arquitectónicas, de ingeniería y deportivas, además reconoce como infraestructuras deportivas a canchas, pistas, gimnasios, piscinas. (Hahn, 2021, pág. 15).

Por otro lado, según una ordenanza municipal en el Perú del 2016, específicamente del consejo Municipal del distrito de Ate, (Morón Flores & Milón Zevallos, 2019), existen algunas clasificaciones para estas infraestructuras:

- Infraestructura deportiva y/o recreacional menor. Espacios públicos deportivos y/o recreativos para actividades deportivas específicas, se clasifican en:
 - Losa deportiva simple. Equipamiento necesario solo para una disciplina deportiva.

- Losa deportiva múltiple. Equipamiento necesario para dos o más disciplinas deportivas.
- Infraestructura deportiva y/o recreacional mayor.
 - Complejos deportivos
 - Campos de fútbol

Así pues, según esta última clasificación, la infraestructura en donde se realizará la comparación será en las infraestructuras deportivas y/o recreacionales menores, ya que son abundantes en el Perú y en las que se requiere más de este tipo de cubiertas a comparar (convencionales y tensegríticas).

2.2.6. Coberturas metálicas convencionales utilizadas en el Perú

En el Perú se hace uso de las estructuras metálicas para muchos fines, desde edificios hasta coberturas de metal o acero como naves industriales, etc. Un ambiente donde se usa la gran mayoría de estructuras metálicas es en las infraestructuras deportivas menores que se mencionaron en el apartado anterior, y por ser estas el lugar de estudio del presente trabajo, se tomará una estructura metálica de este tipo para la comparación; así pues, existen muchas formas adquiridas por estas coberturas, sin embargo todas son muy similares y prácticamente con el mismo diseño; el diseño más usado en la ciudad de Arequipa (lugar de estudio) es el que tiene varios paños cortados inclinados con respecto a la horizontal, y es uno de los diseños y configuraciones más modernos que hay; este tipo de estructura mencionado se puede apreciar en las Figuras 14 y 15.

Figura 14

Estructura metálica convencional en Arequipa



Nota. Adaptada de Propuesta de Metodología para el análisis y diseño ante cargas de viento de estructuras metálicas de cobertura en infraestructuras deportivas menores en la ciudad de Arequipa (p. 5), por P. Morón & A. Milón, 2019, Repositorio de Tesis UCSM.

Figura 15

Configuración de una estructura metálica convencional



Nota. Adaptada de Propuesta de Metodología para el análisis y diseño ante cargas de viento de estructuras metálicas de cobertura en infraestructuras deportivas menores en la ciudad de Arequipa (p. 6), por P. Morón & A. Milón, 2019, Repositorio de Tesis UCSM.

Morón y Milón (2019), en su trabajo de tesis, pusieron a prueba muchas de estas estructuras metálicas en la ciudad de Arequipa y las analizaron estructuralmente para saber que tan mal diseñadas están, y luego poder encontrar así, una propuesta de metodología buena para poder diseñarlas mejor; del 100% de coberturas que analizaron, solo el 17% estaban diseñadas para resistir la velocidad de viento de diseño que dispone la norma E 020, evidenciando así el mal diseño por parte de los especialistas; esto a su vez deja abierta la posibilidad de que puedan existir mejores diseños o incluso mejores sistemas de coberturas para estas infraestructuras.

Para que la comparación final (objetivo de este estudio) sea coherente y fundamentada, se tomará como referencia ese 17% de cubiertas metálicas buenas y seguras que cumplen con la velocidad de viento mínima requerida por la norma.

2.2.7. Consideraciones de la Norma E.020 “Cargas”

La Norma Técnica Peruana E.020 “Cargas” dice que todas las edificaciones y sus partes implícitas, deben de soportar todas las cargas debido al uso que tengan; estas deben analizarse con las combinaciones prescritas y no deben tener esfuerzos excesivos ni deformaciones exageradas.

Según lo que estipula la Norma, las estructuras de este tipo de infraestructura y sus elementos, deberán ser diseñados para soportar cargas exteriores e interiores debidas al viento (presiones y succiones), considerando también que estas fuerzas actúan en dos direcciones.

Para el análisis de las velocidades de diseño, las cargas exteriores e interiores del viento deberán tomar todas las consideraciones que dice la norma, haciendo uso de las fórmulas que brinda y de los mapas eólicos en el Perú, al igual que algunas tablas que proporciona.

Para el caso del método de análisis, la Norma Peruana no estipula un método de análisis en específico para estructuras sometidas a cargas de viento, por lo que la mayoría de proyectos como este, consideran un método estático.

2.2.8. El acero como elemento a compresión, y cables tensados como elementos a tensión

Se tiene que definir bien qué elementos se usarán para el diseño de ambas estructuras, para poder conocer las propiedades de los materiales y saber el performance que tendrán; como se sabe, las mallas tensegríticas usan acero para las barras a compresión, y cables para la tensión, mientras que las coberturas convencionales usan puro acero en todos sus elementos; entonces, para la investigación se tiene que averiguar y obtener todas las propiedades del acero a utilizar, siendo el mismo para ambas coberturas; por otro lado, para los cables se tiene que averiguar y usar un material que resista fuerzas internas similares a las de las barras de acero, para que la malla tensegrítica sea homogénea y falle primero por compresión y no por tracción. Cabe resaltar que los elementos a tensión (cables), se fabrican por solicitaciones de fuerzas, por lo que si se usa cables de alta tensión la estructura estaría sobredimensionada; es por esta razón que el material a usar en los cables debe ser uno de características similares al del material usado en las barras de compresión.

Para este trabajo se van a requerir principalmente las propiedades físicas de estos materiales, los rangos elásticos y plásticos, y sus esfuerzos máximos, para poder llevar las estructuras a un estado de fluencia y poder ver sus mecanismos de falla.

2.2.9. Utilización del análisis no lineal para el Análisis ante Cargas de Viento

El análisis no lineal brinda resultados estructurales muy realistas, ya que lleva a una estructura al límite de su resistencia, hasta que falle; esto indica hasta qué fuerzas internas pueden resistir cada uno de sus elementos. Para las estructuras de la comparación, este

análisis permitirá identificar sus mecanismos de falla y saber que elemento fallará primero antes de que el sistema deje de funcionar en su totalidad.

Es importante usar este análisis y no solo el elástico lineal, ya que, ante eventos complejos (en este caso de viento), puede que una estructura no funcione en su rango elástico, invalidando así todo un análisis previo, especialmente en este tipo de estructuras donde se conectan muchos elementos entre sí y funcionan axialmente.

Existen varios métodos para determinar de la mejor manera el comportamiento real de una estructura, como el análisis dinámico tiempo-historia y el análisis estático Pushover (ambos métodos no lineales); dado que el primer análisis es para estructuras de uso importante y requiere de registros previos de fuerzas, no se usará en la investigación porque se volvería muy complicada, buscando registros de vientos pasados y en el Perú es muy difícil conseguirlos. Por ello, el método más óptimo para el presente trabajo, es el análisis estático no lineal, el cual se puede considerar como un método promedio entre el análisis elástico lineal y el análisis dinámico no lineal.

El análisis Pushover, que se conoce como el análisis estático no lineal de carga incrementado, es un método que se usa en edificaciones, aplicándoles un patrón de cargas laterales como las sísmicas, hasta llevarlas al rango plástico y su posterior colapso, obteniendo finalmente una curva de capacidad que describe la respuesta de la estructura; sin embargo, la presente investigación, al analizar otro tipo de estructuras no puede estar sujeta al mismo análisis, debido a que no se va a poder generar un espectro de demanda, porque nuevamente se necesitaría de registros y factores de viento, los cuales no se tienen, y por ende no se podría conseguir tampoco el punto de desempeño de las estructuras; es por todas estas razones por las que el análisis Pushover como tal, no es posible aplicarlo en este

trabajo, más sí las curvas de capacidad y los mecanismos de falla, los cuales brindan mucha información para el objetivo de la investigación.

Para el análisis a usar, es muy importante tener en consideración las propiedades y características no lineales de los materiales empleados en las estructuras, esto se logra a través de las rótulas plásticas; estas rótulas, lo que hacen es indicar cuál es la capacidad de fluencia y la capacidad última que tiene cada elemento ante determinadas cargas. Estas rótulas van apareciendo en los elementos de una estructura con cada iteración analítica que se haga, y en el momento en el que un elemento falla, se puede evidenciar el mecanismo de falla que puede generar.

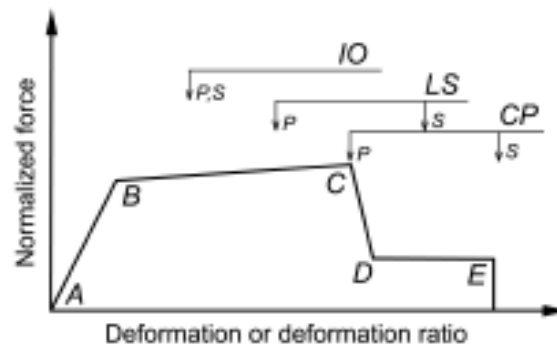
En el análisis elástico no lineal, se hace uso también de la curva de capacidad, la cual se utiliza en edificaciones grandes, con varios niveles y con determinados modos de vibración, y claramente estas curvas se hacen con el análisis de fuerzas sísmicas, sin embargo, en mallas tensegríticas y coberturas convencionales de este tipo, como trabajan bajo fuerzas de viento, al análisis común que se conoce se le debe hacer una modificación para poder adaptarlo a estos sistemas. El patrón de cargas en este caso, seguirá una dirección vertical en el sentido de la gravedad, siendo perpendicular al paño de la lona de cada estructura, considerando efectos de presión y succión (como lo dice la norma); en el caso de las mallas tensegríticas, el paño de la lona es un paño totalmente horizontal, mientras que, en las mallas convencionales a comparar, estos paños tienen una ligera inclinación con respecto a la horizontal.

Respecto a la modificación del análisis no lineal típico, se sabe que para la formación de la curva de capacidad de estructuras con solicitaciones sísmicas, se considera como punto de mayor desplazamiento lateral, el centro de masas del último nivel; pero para este tipo de estructuras, el punto que recibe el mayor desplazamiento será el centro del área de cada

estructura; en el caso de las mallas tensegríticas, al ser de doble capa y al ser una estructura discontinua en elementos a compresión, se considera al punto ubicado más el centro de la capa inferior como crítico si es que hay presión, y se considera al punto ubicado más el centro de la capa superior como crítico si hay succión; en teoría se buscará el punto que esté más centrado, porque como se sabe, en estas coberturas hay dos capas y ambas tienen vértices a diferente altura y en diferente ubicación, por lo que una capa tiene un punto ubicado más al centro que la otra. En el caso de las mallas convencionales el punto de mayor desplazamiento si es el centro geométrico de la estructura.

Para este análisis estático no lineal es muy importante conocer los gráficos y las relaciones de los materiales a utilizar; en este caso, se necesita las características del acero para ambas mallas. Se necesita ver la respuesta de cada uno de estos materiales con su comportamiento no lineal, en todas sus etapas, desde la zona elástica hasta la zona de fluencia y la de endurecimiento. También se necesita determinar las relaciones de esfuerzo-deformación de los elementos estructurales para las mallas tensegríticas y las relaciones de momento-curvatura para los elementos de la cobertura convencional. El modelamiento en el programa para el comportamiento estático no lineal de las estructuras tensegríticas, se da con el uso de rótulas plásticas como se mencionó antes, datos que se obtienen justamente con los diagramas de Fuerza-Desplazamiento, gráficas que nacen del diagrama de Esfuerzo-Deformación.

La longitud de estas rótulas se determina a través de la teoría de Paulay y Priestley; así pues, para introducir estas rótulas en el programa, se debe seguir el formato mostrado en la Figura 16, el cual se usará para la relación Fuerza-Desplazamiento.

Figura 16*Formato de Rótulas plásticas*

Nota. Adaptada de *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (p. 240), por Craig D. Comartin & Richard W. Niewiarowski, 1996, ATC 40.

Para la utilización del programa, se deben definir todas las rótulas plásticas de cada uno de los elementos del sistema; una vez definidas, se debe ir asignando cada una según su zona de concentración de esfuerzos mayores; como la malla tensegrítica es un sistema que tiene únicamente esfuerzos axiales, la rótula se deberá colocar en el medio de cada elemento, en comparación con la otra cobertura donde las rótulas deben colocarse en los extremos de los elementos, debido a que presentan también fuerzas de momentos y rotaciones. Para finalizar con este análisis en el programa, se debe definir el caso de carga que corresponde, considerando como punto de control el punto con mayor desplazamiento vertical; luego, como no se considerará la curva de capacidad, lo último que se hace con la malla modelada es ir corriendo el programa paso a paso, hasta que un elemento de la estructura falla, evidenciando así su colapso; obviamente, se deben verificar las fuerzas y/o desplazamientos últimos en cada una de las rótulas, asegurando que sí se hayan superado en el análisis; y finalmente para determinar el mecanismo de falla de la estructura, se debe eliminar el elemento colapsado y hacer nuevamente el mismo procedimiento para ver que otro elemento falla y así sucesivamente hasta que la estructura sea incapaz de sostenerse.

2.3. Marco Legal

- Norma Técnica Peruana E.020 “Cargas”
- Norma Técnica Peruana E 090 “Estructuras Metálicas”



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque de Investigación

El enfoque de la investigación es “Cuantitativo”, porque refleja la necesidad de medir y tomar las magnitudes de los fenómenos a estudiar (Tensegridad) y a comparar (mallas tensegríticas con mallas convencionales).

3.2. Alcance y Tipo de la Investigación

El alcance y tipo de la investigación, es exploratorio y descriptivo en el inicio, sin embargo, al final, toma la forma de una investigación de alcance explicativo.

Al iniciar es exploratorio porque se trata de un nuevo tema para la Ingeniería Civil (tensegridad), además, según los antecedentes que se tienen, se muestra que no se ha ahondado mucho en el tema; es descriptivo también, porque la investigación busca especificar las propiedades y características de un fenómeno que se somete a un análisis, este fenómeno es la tensegridad, y se analiza a través de una malla tensegrítica y una malla convencional. (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 92)

El alcance explicativo que se logra al final del trabajo, se da a través de la comparación de las mallas, donde se explica por qué ocurren los fenómenos y por qué una malla es mejor que otra, además de saber bajo qué condiciones se concluyen los resultados. (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 95).

3.3. Diseño de la Investigación

El presente trabajo, se trata de un tipo de Investigación Experimental, y de la clase experimental puro, ya que se tienen grupos de comparación, que en este caso son las distintas mallas que se comparan (una malla tensegrítica y una malla convencional), y estas a la vez

se van manipulando para lograr el control y la validez interna de la investigación. (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 141)

3.4. Esquema Metodológico

En este apartado se detallará en resumen todo el procedimiento realizado para la comparación de la investigación. Al tratarse de un análisis comparativo entre dos tipos de estructuras, se buscará escoger una representativa para cada una; en este caso, para las coberturas convencionales, se tomará como referencia a las estructuras analizadas en el trabajo de Morón y Milón (2019), donde de un gran número de cubiertas solo el 17% resisten la velocidad de viento mínima sin colapsar, así pues, para este trabajo solo se escogerá una de estas coberturas, la cual representará a todo este grupo de coberturas metálicas convencionales.

Por otro lado, para la elección de la malla tensegrítica representativa, se hará un análisis elástico de varias mallas y se escogerá la mejor; para tener varias opciones de estas, se diseñarán y se establecerán distintas formas y geometrías que puede adquirir una malla tensegrítica; esto se hará a través de dos procedimientos: mediante la formación de un módulo global compuesto por pequeños módulos tensegríticos, y a través de la “manipulación de Rot-Umbela” partiendo desde una malla convencional de doble capa (MDC).

Para el primer procedimiento mencionado, se escogerá un módulo de tensegridad ya existente (pequeño y único), para luego unirlos con varios de estos y formar así una malla tensegrítica grande; así pues, este procedimiento se hará con distintos módulos tensegríticos (9 en total), obteniendo así una gran cantidad de mallas. Para el segundo procedimiento, se usarán mallas de doble capa existentes, y con la manipulación Rot-Umbela se volverán

tensegríticas, esto se hará con varias MDC, obteniendo así, más mallas tensegríticas para analizar.

En total se trabajará con 35 mallas, 21 de ellas serán por medio del primer método y las otras 14 por medio del segundo. Para la elección de la mejor de las 35, se modelará y analizará elásticamente cada una de las mallas en el programa SAP 2000 usando para todas las mismas características, como mismas restricciones de apoyos, mismos materiales, mismas luces, mismas cargas, etc; se verán sus comportamientos de fuerzas y desplazamientos, y con los resultados se podrá evaluar cual es la más resistente estructuralmente, la cuál será la malla tensegrítica representativa.

Luego de tener las dos mallas representativas, se procederá a escoger el lugar o la infraestructura para llevar a cabo la comparación; la infraestructura que se tomará, será la misma donde está ubicada la cobertura metálica convencional escogida, porque de este forma, el área y las características que tendrá esa cubierta (cobertura convencional escogida) serán las mismas con las que fue diseñada, explotando así su diseño inicial; la malla tensegrítica por otro lado, se tendrá que diseñar nuevamente adaptándola a esas condiciones (área y características).

Después de tener las mallas y la infraestructura donde se llevará a cabo la comparación, se procederá a hacer el análisis estático no lineal. Para todo esto, primero se asegurará que los resultados del programa sean los correctos, validando así la investigación, por esta razón, se realizarán una serie de ejercicios con cables y barras (usados en la tensegridad), provenientes del libro de Estática de Russell Charles Hibbeler; así pues, se resolverán estos ejercicios a través de un análisis manual y luego mediante un análisis computacional, usando el programa Sap2000 (programa usado para la comparación), comparando ambos resultados, y evidenciando así que los resultados obtenidos en este

trabajo sean válidos; cabe recalcar que estos ejercicios de validación son para supervisar el buen funcionamiento del programa SAP2000, usado únicamente para las mallas tensegríticas, por lo que los 3 ejercicios estarán basados en sistemas y estructuras con fuerzas netamente axiales.

Para finalizar, como se mencionó antes, se procederá con el análisis estático no lineal de cargas de viento para la malla tensegrítica final (con el uso de rótulas plásticas en los elementos compresores), donde se determinará la velocidad de viento con la que colapsa, la presión de succión del viento que alcanza, y el mecanismo de falla que obtiene; con todos estos datos se tendrán conclusiones sólidas para poder comparar las dos coberturas y determinar cuál es mejor estructuralmente. Los resultados de la malla tensegrítica se compararán con los resultados que ya se tienen en la tesis de Milón y Morón.

Cabe resaltar que la comparación se hará con las mismas características en los elementos (es decir, con el mismo material y las mismas propiedades geométricas), porque así compararemos los diferentes sistemas (funcionamiento estructural), y no la calidad de los elementos. En caso de que la malla tensegrítica falle rápidamente y requiera de mejores propiedades en sus materiales, se rediseñará con estas nuevas características, pero solo hasta cierto punto, evitando una comparación dispareja. Cabe resaltar también que estos resultados (velocidad y presión del viento) deben ser los mínimos y necesarios por la norma peruana, para que la estructura se considere segura y viable.

3.5. Métodos de Investigación

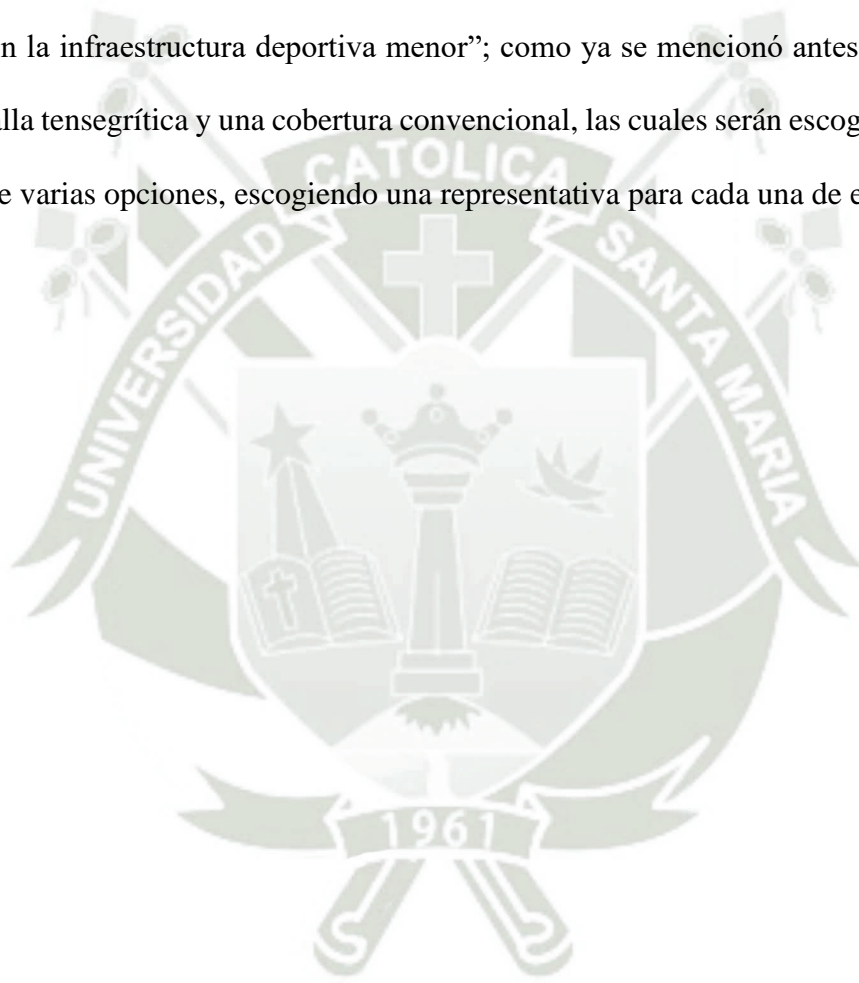
3.5.1. Variable Dependiente.

Esta variable es el “conjunto de resultados del comportamiento estructural de la infraestructura deportiva menor” que se investigará, donde se medirá la resistencia que alcanza esta infraestructura dependiendo de la forma y tipo de estructura que tome, pudiendo

ser una malla tensegrítica de doble capa, o una cobertura convencional con bridas y arriostres; se medirá a través de la velocidad del viento que alcance antes del colapso, y el mecanismo de falla que tenga.

3.5.2. *Variable Independiente.*

Como variable Independiente se tiene a “la forma y el tipo de la estructura que se usará en la infraestructura deportiva menor”; como ya se mencionó antes, estas serán dos: una malla tensegrítica y una cobertura convencional, las cuales serán escogidas previamente de entre varias opciones, escogiendo una representativa para cada una de ellas.



CAPÍTULO IV

4. NORMATIVA PERUANA PARA CARGAS DE VIENTO

La Norma Peruana vigente que se encarga de regularizar las cargas de viento en nuestro país es la Norma Técnica Peruana E 0.20 “Cargas”; esta norma abarca todo lo que se refiere a cargas en estructuras de todo tipo (desde esfuerzos hasta deformaciones máximas); en cuanto a las cargas de viento, la norma dice que todas las estructuras y los componentes que estén expuestas a la acción del viento deben ser diseñadas para resistir cargas de presión y succión, ya sean cargas exteriores o interiores; se debe suponer también que esta fuerza del viento debe actuar en las dos direcciones horizontales perpendiculares entre sí (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020, pág. 20)

4.1. Clasificación de las edificaciones

La norma clasifica en 3 tipos a las edificaciones ante cargas de viento:

Tipo 1. Edificaciones poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento, tales como edificios de poca altura o esbeltez y edificaciones cerradas con cobertura capaz de soportar las cargas sin variar su geometría. Para este tipo de edificaciones se aplicará lo dispuesto en los artículos 12 (12.3) y 12 (12.4). (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020, pág. 20)

En este grupo se encuentran estructuras como edificios y edificaciones cerradas que no varíen la forma de su cubierta al contacto con el viento (estructuras no sensibles al viento).

Tipo 2. Edificaciones cuya esbeltez las hace sensibles a las ráfagas, tales como tanques elevados y anuncios y en general estructuras con una dimensión corta en la dirección del viento. Para este tipo de edificaciones la carga exterior especificada en

el Artículo 12 (12.4) se multiplicará por 1,2. (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020, pág. 20)

En esta clasificación se encuentran tanques elevados, anuncios y similares, aquellas estructuras que tengan su dirección más corta expuesta a fuertes vientos (estructuras sensibles al viento); aquí se obliga a multiplicar por 1.2 a las presiones y succiones encontradas para el tipo 1.

Tipo 3. Edificaciones que representan problemas aerodinámicos especiales tales como domos, arcos, antenas, chimeneas esbeltas y cubiertas colgantes. Para este tipo de edificaciones las presiones de diseño se determinarán a partir de procedimientos de análisis reconocidos en ingeniería, pero no serán menores que las especificadas para el Tipo 1. (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020, pág. 20)

En este último grupo se consideran a domos, arcos, antenas, cubiertas colgantes y todas aquellas estructuras que tengan dificultades en cuanto a la aerodinámica; para este grupo no se tiene un método establecido para el análisis de presiones y succiones, por lo que se puede usar otros análisis con sustentos válidos para un adecuado comportamiento y buenos resultados, siempre y cuando sean inferiores a las del tipo 1.

Esta análisis también se detalla en la tesis presentada por “ (Morón Flores & Milón Zevallos, 2019)”, donde a las coberturas metálicas convencionales se las ubica en los Tipos 2 y 3, según encuestas realizadas; las mallas tensegríticas por su lado, también pueden considerarse dentro de estos dos tipos ya que tienen la misma función, pese a que por su geometría y configuración tiendan a pertenecer más en el grupo 3, ya que la aerodinámica interna es compleja y especial. Sea cual fuese el grupo de cada una, ambas estructuras tienen una tipología bastante similar y se pueden usar métodos ingenieriles distintos a los que nos presenta la norma.

4.2. Velocidad de diseño

La velocidad de diseño se ve determinada por los valores expuestos en un mapa eólico (figura 17), el cual se ubica en el Anexo 02 de la Norma; también se pueden extraer estos valores a través de mediciones seguras localizadas en la ubicación donde se usen estas estructuras, siempre y cuando procedan de un estudio verídico y las estructuras no superen los 10 m de altura. De cualquier forma, ningún registro de velocidad de viento debe ser inferior a los 75 km/h.

Para todas aquellas estructuras que superen los 10m, la norma (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020, pág. 20) nos dice que se debe usar la siguiente fórmula:

$$V_h = V \left(\frac{h}{10} \right)^{0.22} \quad (1)$$

Donde:

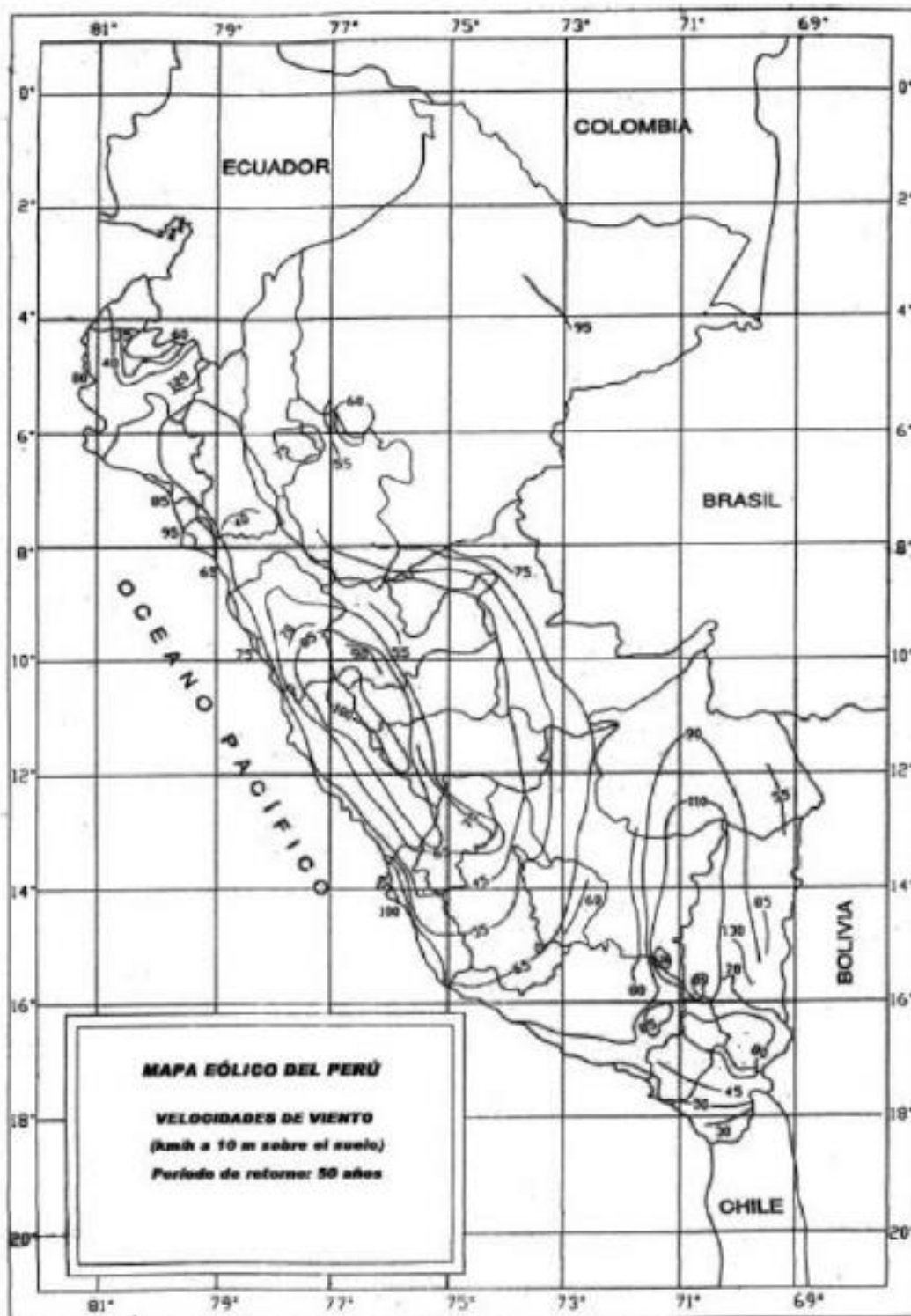
V_h : Velocidad de diseño en la altura h (km/h)

V: Velocidad referencial de diseño hasta 10 m de altura (km/h)

h: Altura sobre el terreno (m)

Figura 17

Mapa Eólico del Perú



Nota. Adaptada de *Norma E.020 Cargas* (p. 29), por Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020, Sencico.

Como se puede observar en la figura 17, en la ciudad de Arequipa se asigna una velocidad del viento de entre 80 y 85 km/h, y como lo menciona la norma, se debe escoger el mayor valor de estos (85 km/h); cabe resaltar también que las coberturas metálicas no exceden los 10 m de altura, por lo que las mallas tensegríticas tampoco lo harán, tratando de igualar en condiciones a ambas estructuras. Por estas razones no se usará la fórmula brindada por la Norma, únicamente se usará la velocidad escogida del mapa eólico.

4.3.Carga exterior del Viento

La norma (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2020, pág. 20) nos dice que tanto la presión como la succión (cargas por el viento) se supondrán estáticas y perpendiculares a la superficie sobre la cual actúan. Esta carga según la norma se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P_h = 0.005CV_h^2 \quad (2)$$

Donde:

Ph: Presión o Succión del viento a una altura h (kgf/m²)

C: Factor de forma adimensional indicado en la Tabla

Vh: Velocidad de diseño a la altura h (km/h)

Tabla 1

Factor de Forma (C)

CONSTRUCCIÓN	BARLOVENTO	SOTAVENTO
Superficies verticales de edificios	+0.8	-0.6
Anuncios, muros aislados, elementos con una dimensión corta en la dirección del viento	+1.5	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica	+0.7	
Tanques de agua, chimeneas, y otros de sección cuadrada o rectangular	+2.0	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45°	±0.8	-0.5
Superficies inclinadas a 15° o menos	+0.3 -0.7	-0.6
Superficies inclinadas entre 15° y 60°	+0.7 -0.3	-0.6
Superficies inclinadas entre 60° y la vertical	+0.8	-0.6
Superficies verticales o inclinadas (planas o curvas) paralelas a la dirección del viento	-0.7	-0.7

Nota. El signo positivo indica presión y el negativo succión. Fuente: Norma E-0.20

Cargas.

La tabla 1 muestra los valores que puede tomar el factor de forma adimensional en el cálculo de la presión o succión (dependiendo de la dirección del viento y de los signos positivos o negativos), valor necesario para la ecuación 2; un aspecto muy importante a tener en cuenta para determinar bien este valor, es saber qué tipo de estructura se tiene y como actúa esta ante las cargas de viento, si actúa bajo barlovento o bajo sotavento.

Para la presente investigación, se considera a la cobertura convencional a comparar como una construcción con superficie inclinada a 15° o menos, la presión y succión se de forma alternada (análisis independientes) sin duplicar sus efectos; si bien las caras con las que trabaja la estructura frente al viento pueden ser a barlovento o sotavento, se usa -0.7 como valor final para el factor de forma, siendo el más crítico de todos, estandarizando así a toda la estructura y haciéndola a su vez mas práctica para analizar. Todo esto considerado para la cobertura metálica, es lo que se consideró en la tesis de Morón y Milón, 2019 para su desarrollo.

Con respecto a las mallas tensegríticas, estas se considerarán igual a las estructuras metálicas, ya que son superficies casi planas y sin inclinación (superficies inclinadas a 15° o menos), y los valores que tomaría sería de $+0.3$ y -0.7 para caras a barlovento, y -0.6 para sotavento; nuevamente se considerará el mismo criterio que se usa en la tesis citada, uniformizando todo para el valor de -0.7 ; de todas formas el tema de succión o presión independientemente se verá luego, debiendo resistir y haciendo el análisis para el estado de carga más crítico.

Cabe resaltar que, en este trabajo de tesis citado, también se menciona a las coberturas metálicas dentro del tipo 2 de estructuras, multiplicando por 1.2 el valor de la carga exterior de viento, por lo que independientemente de la clasificación de las mallas tensegríticas, también se multiplicará por 1.2 este valor para hacer a la comparación pareja.

4.4.Carga interior del Viento

En esta sección, la norma nos dice que debemos añadir cargas interiores a las cargas exteriores de viento, debido a la presencia de todos aquellos elementos de cierre que presente la estructura, incluyendo fijaciones y anclajes; este valor aumentado se tomará de acuerdo al factor de forma de la tabla 2.

Tabla 2

Factores de forma para determinar cargas adicionales en elementos de cierre (c)

ABERTURAS		
Uniforme en lados a barlovento y sotavento	Principales en lado a barlovento	Principales en lado a sotavento o en los costados
± 0.8	+0.8	-0.6

Nota. Fuente: Norma E-0.20 Cargas.

Estos valores de carga interior y las opciones que da la norma no son muy claras para poder considerarlas en las estructuras, por lo que en la tesis citada no se considera este valor para el análisis de las estructuras metálicas convencionales a lo largo de su desarrollo; además, a través de encuestas se demostró que este tipo de estructuras deben despreciar la carga interior del viento porque son cubiertas abiertas en su totalidad, por lo que el viento circula libremente entre esta sin presentar una carga adicional; además si se considerase esta fuerza extra, se duplicaría el efecto del viento actuando ambas en simultaneo, lo cual se expresa como no verídico. Nuevamente con el mismo argumento al de la carga exterior del viento, para las mallas tensegríticas tampoco se considerará esta fuerza para hacer a la comparación equilibrada.

CAPÍTULO V

5. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA SAP 2000 UTILIZADO EN LAS MALLAS TENSEGRÍTICAS

Para poder darle validez a este trabajo de investigación, es necesario demostrar que los resultados obtenidos por el programa ante determinado sistema sean correctos y no proporcione datos falsos, de lo contrario todo lo expuesto en esta tesis estaría invalidado.

Como se sabe, todas las estructuras tensegríticas a modelar y a analizar están sujetas únicamente a fuerzas axiales, las cuales se resumen en tensión y compresión; pero cabe resaltar que no son fuerzas combinadas, sino que son fuerzas que únicamente presentan o tensión o compresión, es decir que un elemento de estas mallas no puede presentar compresión en un análisis y luego tensión en otro análisis diferente, ni siquiera dos de estos elementos iguales pueden presentar compresión uno y tensión otro, todos los compresores funcionan a fuerzas de compresión y todos los cables a fuerzas de tensión. Con esto mencionado es fácil validar un programa de análisis estructural, ya que no requiere de más fuerzas como momentos, torsiones, cortantes, etc. Por esta razón para poder confiar en el programa SAP2000 se resolverán manualmente algunos ejercicios con sistemas de fuerzas axiales, y luego se resolverán computacionalmente; los resultados deberán ser los mismos o similares para poder afirmar que el programa a utilizar es confiable y seguro.

Hay que tener en consideración que en este capítulo solo se validarán ejercicios con fuerzas axiales, propias de las mallas tensegríticas, y no otro tipo de fuerzas como las que hay en las coberturas metálicas convencionales, ya que estas se seleccionarán directamente de la bibliografía citada y no se analizarán en el programa SAP2000, obteniendo así externamente los resultados de las velocidades de viento que alcanzan las estructuras metálicas.

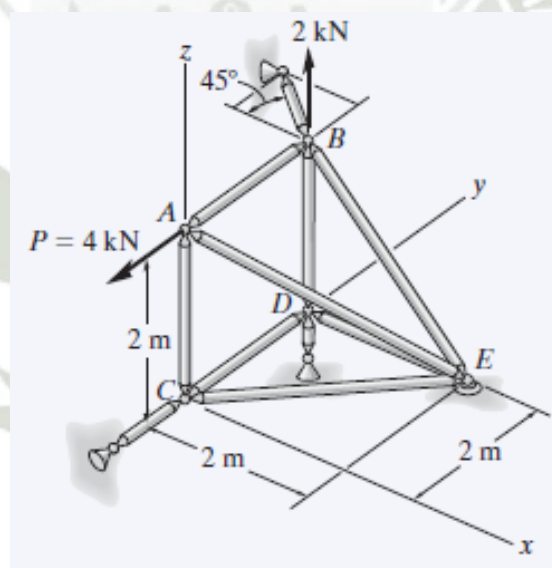
Se desarrollarán 3 ejercicios para una buena confiabilidad; todos estos son ejercicios expuestos en el libro de “Ingeniería Mecánica Estática” de Russell Charles Hibbeler. Uno de ellos será una armadura en 3 dimensiones, el segundo será una estructura con cables, y la tercera será una estructura combinada con cables y barras, un sistema muy similar a una malla tensegrítica.

5.1. Primer ejercicio validado

Para empezar con el primer ejercicio se verá una representación gráfica del sistema en la figura 18.

Figura 18

1er Ejercicio para Validación



Nota. Adaptada de *Ingeniería Mecánica Estática* (p. 291), por Russell C. Hibbeler, 2010, Prentice Hall.

Este ejercicio se desarrollará inicialmente con el método de matrices o rigideces; para empezar, se colocan todos los nudos con sus respectivas ubicaciones (tabla 3), en este caso se tienen 8 puntos: A, B, C, D, E, F, G y H.

Tabla 3

Ubicación en coordenadas de cada punto (Ejercicio 1).

Nudo	A	B	C	D	E	F	G	H
Coordenadas xx	0	0	0	0	2	0	-1	0
Coordenadas yy	0	2	0	2	2	-1	3	2
Coordenadas zz	2	2	0	0	0	0	2	-0.5

Luego se procede a colocar o nombrar los respectivos grados de libertad (tabla 4), los cuales inician por los 12 nudos no restringidos y se finaliza con los restringidos (Nudos E, F, G y H).

Tabla 4

Grados de libertad para cada nudo (1er ejercicio).

Nudo	A	B	C	D	E	F	G	H
Gdl Desp x-x	1	4	7	10	13	16	19	22
Gdl Desp y-y	2	5	8	11	14	17	20	23
Gdl Desp z-z	3	6	9	12	15	18	21	24

Después se definen las propiedades geométricas de cada elemento y sus propiedades mecánicas (tabla 5).

Tabla 5

Propiedades geométricas y mecánicas de cada elemento (Ejercicio 1).

Elemento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
cx	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	0.6	0.7	1.0	0.0	0.7	0.0
cy	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.6	0.7	0.0	1.0	-0.7	0.0
cz	0.0	1.0	1.0	0.0	0.7	-0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
EA/L	74.6	74.6	74.6	74.6	52.8	43.1	52.8	74.6	149.2	105.5	298.4

Se procede a colocar y determinar los grados de libertad que le corresponden a cada uno de los elementos al inicio y al final (tabla 6).

Tabla 6

Determinación de grados de libertad a cada elemento, nudo inicial y final,

Elemento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
GDL xj	1	7	10	7	13	1	7	10	16	19	22
GDL yj	2	8	11	8	14	2	8	11	17	20	23
GDL zj	3	9	12	9	15	3	9	12	18	21	24
GDL xk	4	1	4	10	4	13	13	13	7	4	10
GDL yk	5	2	5	11	5	14	14	14	8	5	11
GDL zk	6	3	6	12	6	15	15	15	9	6	12

Luego de tener todos estos datos, se puede armar las matrices de rigidez globales de cada uno de los elementos, al ser 11 elementos no se mostrará la matriz de cada una, solo se mostrará la de una, sobreentendiendo que todas las demás tienen la misma forma y el mismo procedimiento al obedecer la teoría que presenta una matriz, la cual tiene la siguiente configuración:

	xj	yj	zj	xk	yk	zk	
$k = EA/L$	Cx.Cx	Cx.Cy	Cx.Cz	- Cx.Cx	- Cx.Cy	- Cx.Cz	xj
	Cx.Cy	Cy.Cy	Cy.Cz	- Cx.Cy	- Cy.Cy	- Cy.Cz	yj
	Cx.Cz	Cy.Cz	Cz.Cz	- Cx.Cz	- Cy.Cz	- Cz.Cz	zj
	- Cx.Cx	- Cx.Cy	- Cx.Cz	Cx.Cx	Cx.Cy	Cx.Cz	kx
	- Cx.Cy	- Cy.Cy	- Cy.Cz	Cx.Cy	Cy.Cy	Cy.Cz	ky
	- Cx.Cz	- Cy.Cz	- Cz.Cz	Cx.Cz	Cy.Cz	Cz.Cz	kz

Así pues, la única matriz de rigidez que se mostrará será la del elemento número 5, que va del nudo E al B, como se muestra a continuación:

	2	3	4	5	6	7	
$K =$	26.375	0	-26.375	-26.375	0	26.375	2
	0	0	0	0	0	0	3
	-26.375	0	26.375	26.375	0	-26.375	4
	-26.375	0	26.375	26.375	0	-26.375	5
	0	0	0	0	0	0	6
	26.375	0	-26.375	-26.375	0	26.375	7

Cuando se suman las matrices de los 11 elementos, sumando el valor que le corresponde a cada posición de la matriz, se obtiene la matriz de rigidez general de toda la estructura, que por lo general tiene una dimensión de 24×24 al existir 24 grados de libertad en todo el sistema; esta se muestra a continuación:



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
14.357	14.357	-14.357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-14.357	-14.357	14.357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14.357	88.957	-14.357	0	-74.600	0	0	0	0	0	0	0	-14.357	-14.357	14.357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
-14.357	-14.357	88.957	0	0	0	0	0	-74.600	0	0	0	14.357	14.357	-14.357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
0	0	0	79.125	-52.750	-26.375	0	0	0	0	0	0	-26.375	0	26.375	0	0	0	-52.750	52.750	0	0	0	0	4
0	-74.600	0	-52.750	127.350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52.750	-52.750	0	0	0	0	5
0	0	0	-26.375	0	100.975	0	0	0	0	0	-74.600	26.375	0	-26.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
0	0	0	0	0	0	26.375	26.375	0	0	0	0	-26.375	-26.375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
0	0	0	0	0	0	26.375	250.175	0	0	-74.600	0	-26.375	-26.375	0	0	-149.200	0	0	0	0	0	0	0	8
0	0	-74.600	0	0	0	0	0	0.746	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	74.600	0	0	-74.600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
0	0	0	0	0	0	0	-74.600	0	0	74.600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
0	0	0	0	0	-74.600	0	0	0	0	0	373.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-298.400	12
-14.357	-14.357	14.357	-26.375	0	26.375	-26.375	-26.375	0	-74.600	0	0	141.707	40.732	-40.732	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
-14.357	-14.357	14.357	0	0	0	-26.375	-26.375	0	0	0	0	40.732	40.732	-14.357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
14.357	14.357	-14.357	26.375	0	-26.375	0	0	0	0	0	0	-40.732	-14.357	40.732	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
0	0	0	0	0	0	0	-149.200	0	0	0	0	0	0	0	0	149.200	0	0	0	0	0	0	0	17
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
0	0	0	-52.750	52.750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	52.750	-52.750	0	0	0	0	19
0	0	0	52.750	-52.750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-52.750	52.750	0	0	0	0	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-298.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	298.400	24

Finalmente, para acabar con este ejercicio, se termina de usar la teoría de matrices donde se inicia con la Ley de Hooke (Ecuación 3):

$$[F] = [K]x[u] \quad (3)$$

La matriz de fuerzas y la matriz de desplazamientos serían respectivamente:

	0	1		U1	1
	-4	2		U2	2
	0	3		U3	3
	0	4		U4	4
	0	5		U5	5
	2	6		U6	6
	0	7		U7	7
	0	8		U8	8
	0	9		U9	9
	0	10		U10	10
	0	11		U11	11
F=	0	12	U=	U12	12
R13	13		0	13	
R14	14		0	14	
R15	15		0	15	
R16	16		0	16	
R17	17		0	17	
R18	18		0	18	
R19	19		0	19	
R20	20		0	20	
R21	21		0	21	
R22	22		0	22	
R23	23		0	23	
R24	24		0	24	

Realizando las últimas operaciones podemos determinar rápidamente las reacciones y los desplazamientos, de los cuales solo se mostrarán las fuerzas en los elementos (tabla 7), y los desplazamientos de los nudos A, B y D (tabla 8), al ser los nudos sin restringir.

0	1	0.3146	1
-4	2	-0.3146	2
0	3	0	3
0	4	-0.1852	4
0	5	-0.2610	5
2	6	-0.0335	6
0	7	0	7
0	8	0	8
0	9	0	9
0	10	0	10
0	11	0	11
F=	0	U=	-0.0067
4	12	0	12
0	13	0	13
0	14	0	14
-4	15	0	15
0	16	0	16
0	17	0	17
0	18	0	18
-4	19	0	19
4	20	0	20
0	21	0	21
0	22	0	22
0	23	0	23
2	24	0	24

Tabla 7

Fuerzas Internas de los elementos del ejercicio 1 tras el análisis matricial.

Elemento	Fuerza Interna (Kn)	F. Axial
1	4	Tensión
2	0	Nula
3	2	Compresión
4	0	Nula
5	5.659	Tensión
6	0	Nula
7	0	Nula
8	0	Nula
9	0	Nula
10	5.659	Tensión
11	2	Compresión

Tabla 8

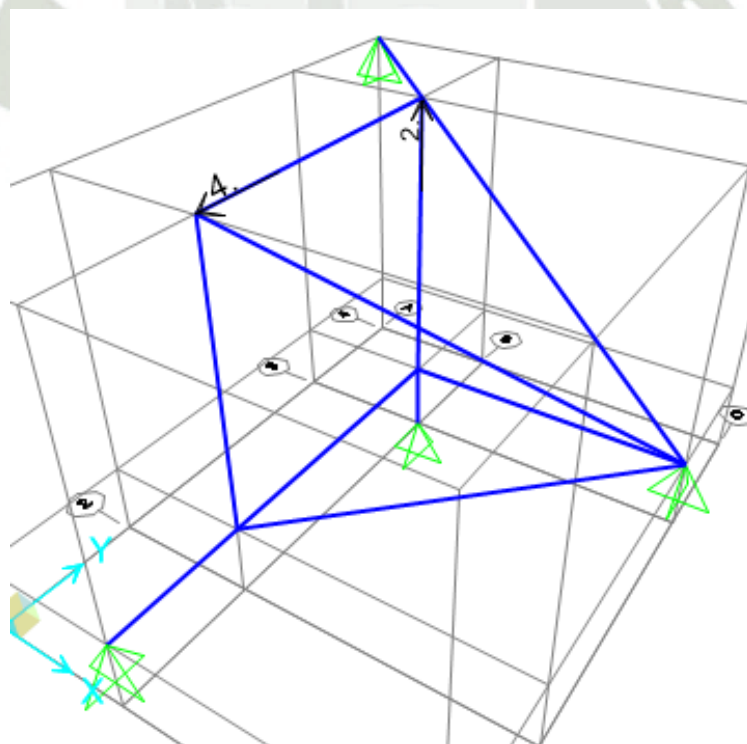
Desplazamientos en los nudos A, B y D del ejercicio 1, tras el análisis matricial.

Punto	Desplazamiento(m)	EJE
A	0.3146	x
	-0.3146	y
	0	z
B	-0.1852	x
	-0.2610	y
	-0.0335	z
D	0	x
	0	y
	-0.0067	z

Ahora se realizará el mismo ejercicio, pero en el programa SAP2000, empezando primero por modelar la estructura con sus dimensiones y elementos (figura 19).

Figura 19

Ejercicio 1 modelado en SAP2000

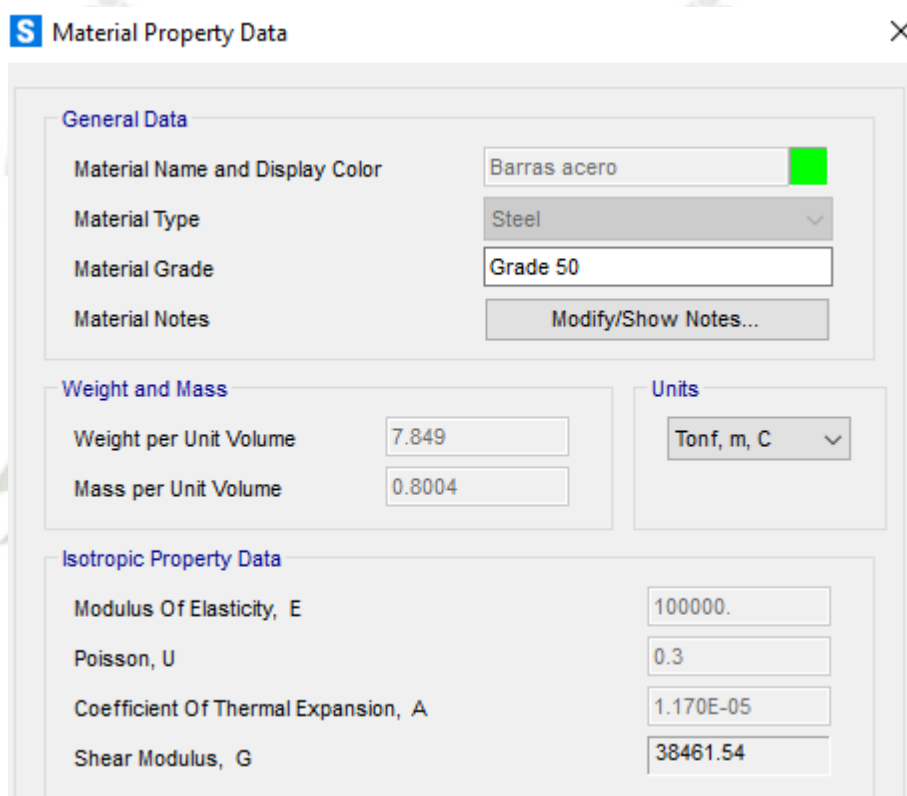


Nota. Sistema modelado mediante el software SAP 2000, luego de introducir previamente la grilla. Elaboración propia.

Se usa un módulo de Elasticidad de 100000 Tonf/m² y un área de 0.001492 m² para cada una de las barras de los elementos, estos valores son los usados en el análisis matricial, por lo que para el programa deben ser colocados también; todos estos datos se pueden observar en las figuras 20 y 21.

Figura 20

Inserción del material para los compresores (ejercicio 1)

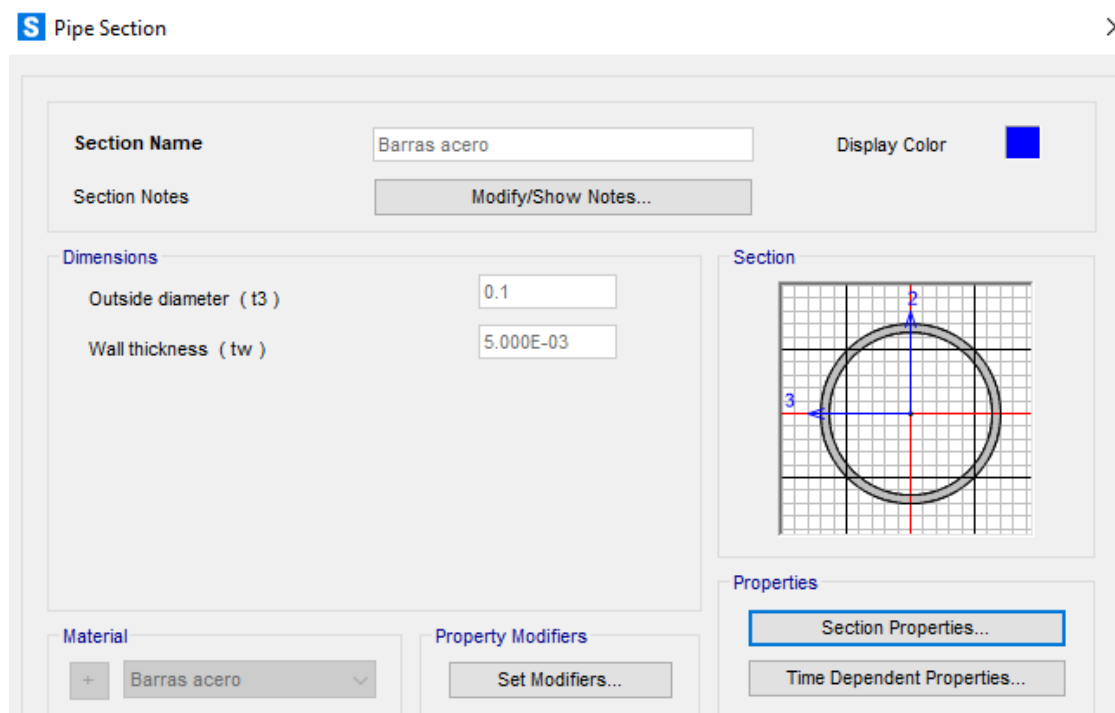


The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box in SAP. It is divided into three main sections: General Data, Weight and Mass, and Isotropic Property Data. The 'General Data' section includes fields for Material Name and Display Color (set to 'Barras acero' with a green color swatch), Material Type (set to 'Steel'), Material Grade (set to 'Grade 50'), and a button for 'Modify/Show Notes...'. The 'Weight and Mass' section has input fields for 'Weight per Unit Volume' (7.849) and 'Mass per Unit Volume' (0.8004), along with a 'Units' dropdown menu set to 'Tonf, m, C'. The 'Isotropic Property Data' section contains input fields for 'Modulus Of Elasticity, E' (100000), 'Poisson, U' (0.3), 'Coefficient Of Thermal Expansion, A' (1.170E-05), and 'Shear Modulus, G' (38461.54).

Nota. Introducción del material para usar en los compresores mediante el software SAP 2000. Elaboración propia.

Figura 21

Definición de la sección de los compresores (ejercicio 1)



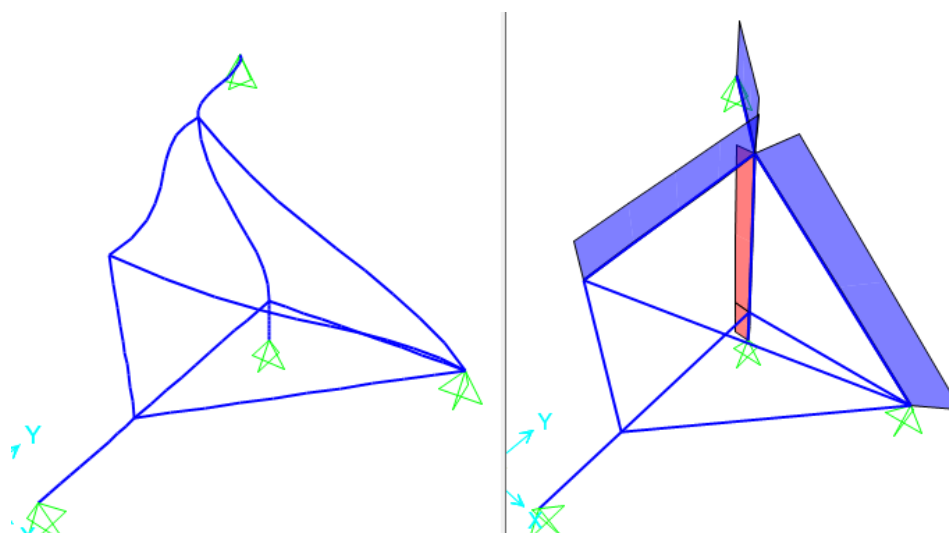
Nota. Introducción de dimensiones de las barras mediante el software SAP 2000.

Elaboración propia.

Así pues, luego se procede a correr el programa, obteniendo los mismos resultados a los obtenidos manualmente, estos valores se pueden observar en las figuras 23, 24 y 25.

Figura 22

Deformada y Fuerzas internas del Ejercicio 1



Nota. Deformada del sistema luego de aplicarle fuerzas (izquierda), y fuerzas internas de cada elemento (derecha), mediante el software SAP 2000. Elaboración propia.

Figura 23

Resultados de fuerzas internas del Ejercicio 1

S Element Forces - Frames

File View Edit Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted

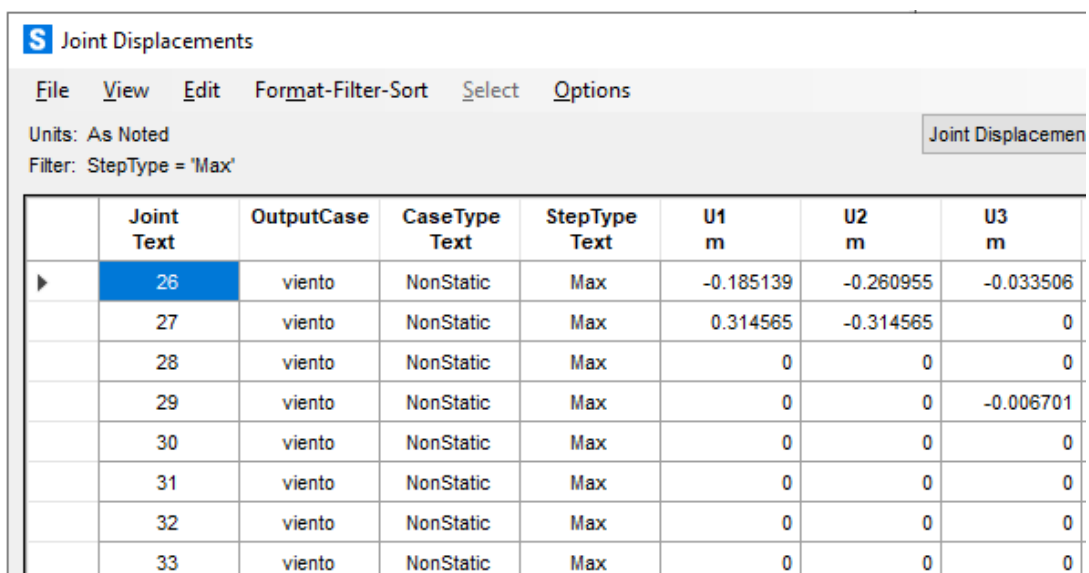
Filter: Station = 0 AND StepType = 'Max'

	Frame Text	Station m	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	P Tonf	V2 Tonf
▶	36	0	viento	NonStatic	Max	4	0
	37	0	viento	NonStatic	Max	0	0
	38	0	viento	NonStatic	Max	0	0
	39	0	viento	NonStatic	Max	-2	0
	40	0	viento	NonStatic	Max	5.6569	0
	41	0	viento	NonStatic	Max	0	0
	42	0	viento	NonStatic	Max	0	0
	43	0	viento	NonStatic	Max	0	0
	44	0	viento	NonStatic	Max	-2	0
	45	0	viento	NonStatic	Max	5.6569	0
	46	0	viento	NonStatic	Max	0	0

Nota. Valores de 4, -2 y 5.657 tonf para las fuerzas internas. Elaboración propia

Figura 24

Resultados de Desplazamientos del Ejercicio 1

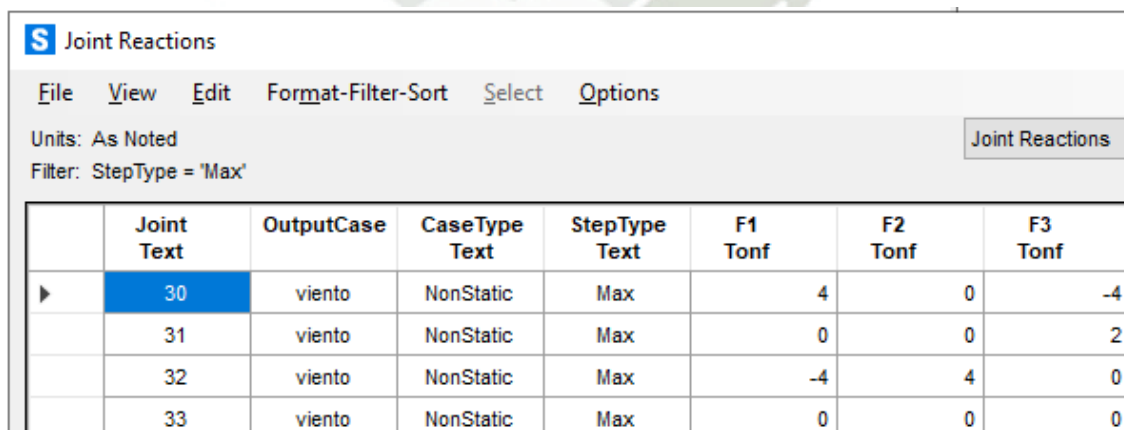


	Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	U1 m	U2 m	U3 m
▶	26	viento	NonStatic	Max	-0.185139	-0.260955	-0.033506
	27	viento	NonStatic	Max	0.314565	-0.314565	0
	28	viento	NonStatic	Max	0	0	0
	29	viento	NonStatic	Max	0	0	-0.006701
	30	viento	NonStatic	Max	0	0	0
	31	viento	NonStatic	Max	0	0	0
	32	viento	NonStatic	Max	0	0	0
	33	viento	NonStatic	Max	0	0	0

Nota. Valores de -0.1851 y 0.3146 m para los desplazamientos en “x”; valores de -0.2610 y -0.3146 m para los desplazamientos en “y”; y valores de -0.0335 y -0.0067 m para los desplazamientos en “z”; mediante el software SAP 2000. Elaboración propia.

Figura 25

Resultados de Reacciones del Ejercicio 1



	Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	F1 Tonf	F2 Tonf	F3 Tonf
▶	30	viento	NonStatic	Max	4	0	-4
	31	viento	NonStatic	Max	0	0	2
	32	viento	NonStatic	Max	-4	4	0
	33	viento	NonStatic	Max	0	0	0

Nota. Valores de 4 y -4 tonf para las reacciones, mediante el software SAP 2000.

Elaboración propia.

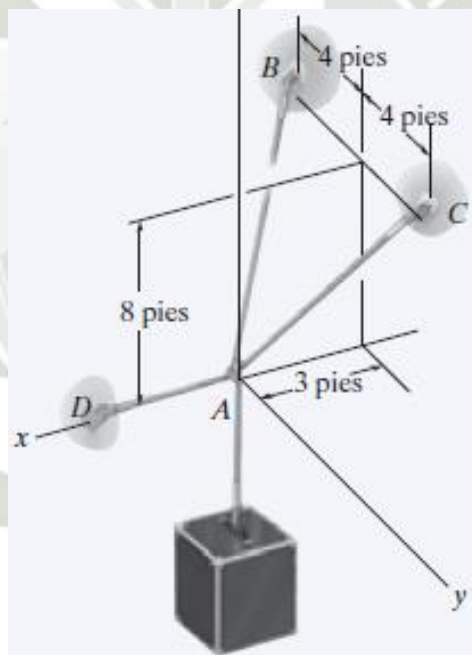
Como se pudo observar, los resultados tras los análisis computacionales y manuales son totalmente iguales, verificando exitosamente así al programa.

5.2. Segundo ejercicio validado

Para este segundo ejercicio de validación, se tomará nuevamente un problema propuesto del mismo libro de R. C. Hibbeler, el cual es un sistema de puro cable que se puede observar detalladamente en la figura 26.

Figura 26

2do Ejercicio para Validación



Nota. Adaptada de *Ingeniería Mecánica Estática* (p. 106), por Russell C. Hibbeler, 2010, Prentice Hall.

Este sistema de cables se desarrollará nuevamente con el sistema matricial, sabiendo que todas las fuerzas axiales serán de tensión.

Como en el primer ejercicio, primero se procede a determinar los nudos con sus coordenadas y sus grados de libertad, tal cual como se ve en la tabla 9 y 10.

Tabla 9

Ubicación en coordenadas de cada punto (Ejercicio 2).

Nudo	A	B	C	D
Coordenadas xx	0	-3	-3	3
Coordenadas yy	0	-4	4	0
Coordenadas zz	0	8	8	0

Tabla 10

Grados de libertad para cada nudo (2do ejercicio).

Nudo	A	B	C	D
Gdl Desp x-x	1	4	7	10
Gdl Desp y-y	2	5	8	11
Gdl Desp z-z	3	6	9	12

Como se puede observar en la tabla 10 primero se inicia nombrando a los grados de libertad no restringidos y se termina con los restringidos.

Sus propiedades geométricas y físicas nos permiten tener los datos de la tabla 11.

Tabla 11

Propiedades geométricas y mecánicas de cada elemento (Ejercicio 2).

Elemento	1	2	3
cx	0.3180	0.3180	-1
cy	-0.4240	0.4240	0
cz	-0.8480	-0.8480	0
EA/L	10.6000	10.6000	33.3333

Con todos estos datos se puede formar la matriz de rigidez de cada elemento; como ejemplo solo se mostrará la matriz del elemento 2:

	4	5	6	1	2	3	
K=	0	0	0	-1.0719	-1.4292	2.8584	4
	0	0	0	-1.4292	-1.9056	3.8112	5
	0	0	0	2.8584	3.8112	-7.6225	6
	0	0	0	1.0719	1.4292	-2.8584	1
	0	0	0	1.4292	1.9056	-3.8112	2
	0	0	0	-2.8584	-3.8112	7.6225	3

Cabe resaltar que se está tomando un valor de 100000 Tonf/m² para el módulo de elasticidad y un valor de 0.001 m² para el área de los cables.

La matriz general de rigidez del sistema es:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
K _{general} =	35.477	0	-5.717	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	3.811	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	-5.717	0	15.245	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	-1.072	-1.429	2.858	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	-1.429	-1.906	3.811	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	2.858	3.811	-7.622	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	-1.072	1.429	2.858	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
	1.429	-1.906	-3.811	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	2.858	-3.811	-7.622	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	-33.333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12

Los valores respectivos de las fuerzas y los desplazamientos son:

F=	0	1	U=	U1	1
	0	2		U2	2
	-40	3		U3	3
	R4	4		0	4
	R5	5		0	5
	R6	6		0	6
	R7	7		0	7
	R8	8		0	8
	R9	9		0	9
	R10	10		0	10
	R11	11		0	11
	R12	12		0	12

Tras las respectivas operaciones matriciales que se vio antes, usando la Ecuación 3, se logra obtener las fuerzas y desplazamientos en cada punto, tanto en matrices como en las tablas 12 y 13, donde se detallan los valores importantes.

0	1	-0.4500	1
0	2	0	2
-40	3	-2.7926	3
-7.5	4	0	4
-10	5	0	5
20	6	0	6
-7.5	7	0	7
10	8	0	8
20	9	0	9
15	10	0	10
0	11	0	11
0	12	0	12

Tabla 12

Fuerzas Internas de los elementos del ejercicio 2 tras el análisis matricial.

Elemento	Fuerza Interna (Kn)	F. Axial
1	23.585	Tensión
2	23.585	Tensión
3	15.000	Tensión

Tabla 13

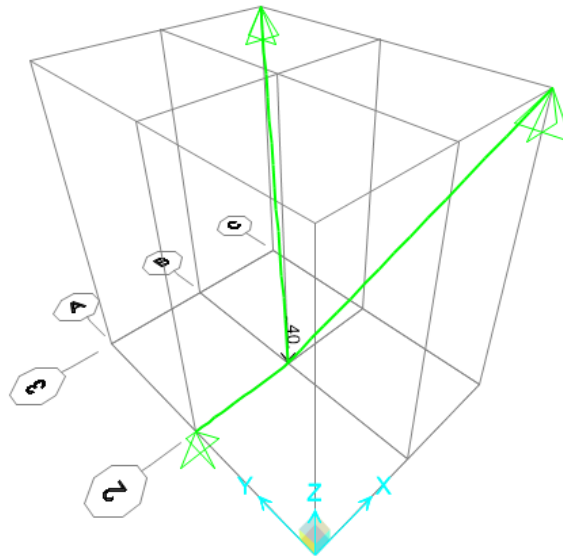
Desplazamiento en los nudos A del ejercicio 2, tras el análisis matricial.

Punto	Desplazamiento(m)	EJE
A	-0.4500	x
	0.0000	y
	-2.7926	z

Ahora se desarrollará el sistema a través del programa SAP2000; donde primero se modela el ejercicio con las características establecidas, tal como se aprecia en la figura 27.

Figura 27

Ejercicio 2 modelado en SAP 2000

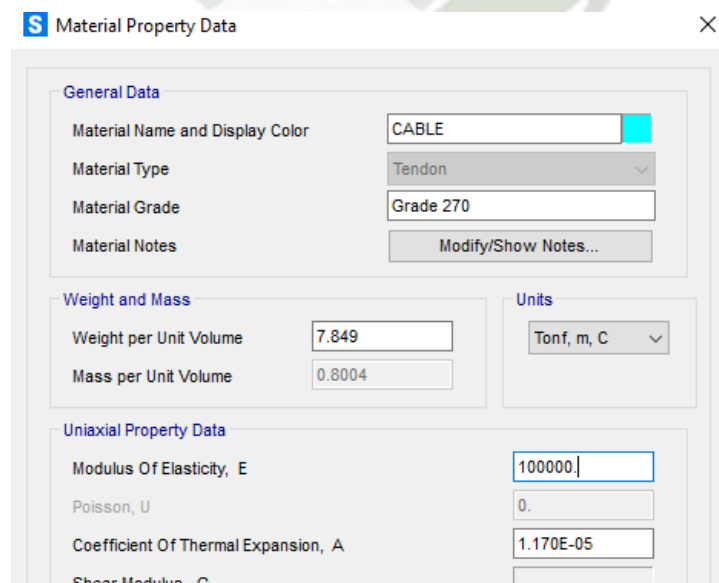


Nota. Sistema modelado mediante el software SAP 2000, luego de introducir previamente la grilla. Elaboración propia.

Se añaden las respectivas características de los elementos de cables (figura 28 y 29).

Figura 28

Inserción del material para los cables (ejercicio 2)

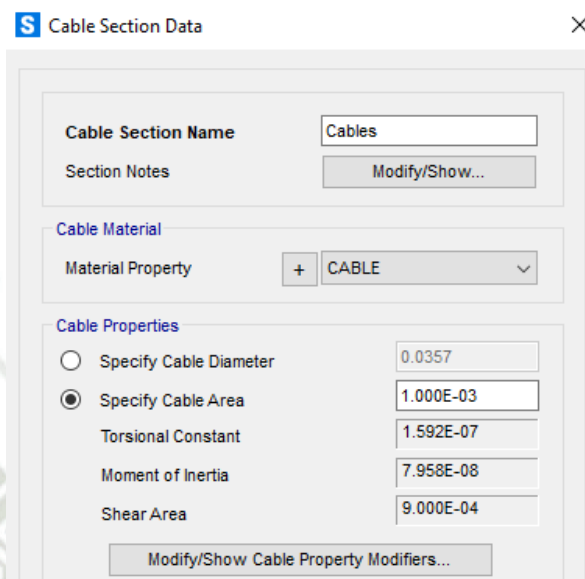


Nota. Introducción del material para usar en los cables mediante el software SAP 2000.

Elaboración propia.

Figura 29

Definición de la sección de los cables (ejercicio 2)

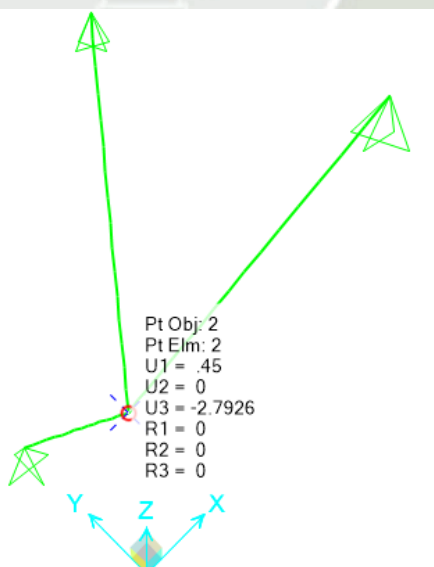


Nota. Introducción de dimensiones de los cables mediante el software SAP 2000.

Elaboración propia.

Figura 30

Deformada del Ejercicio 2



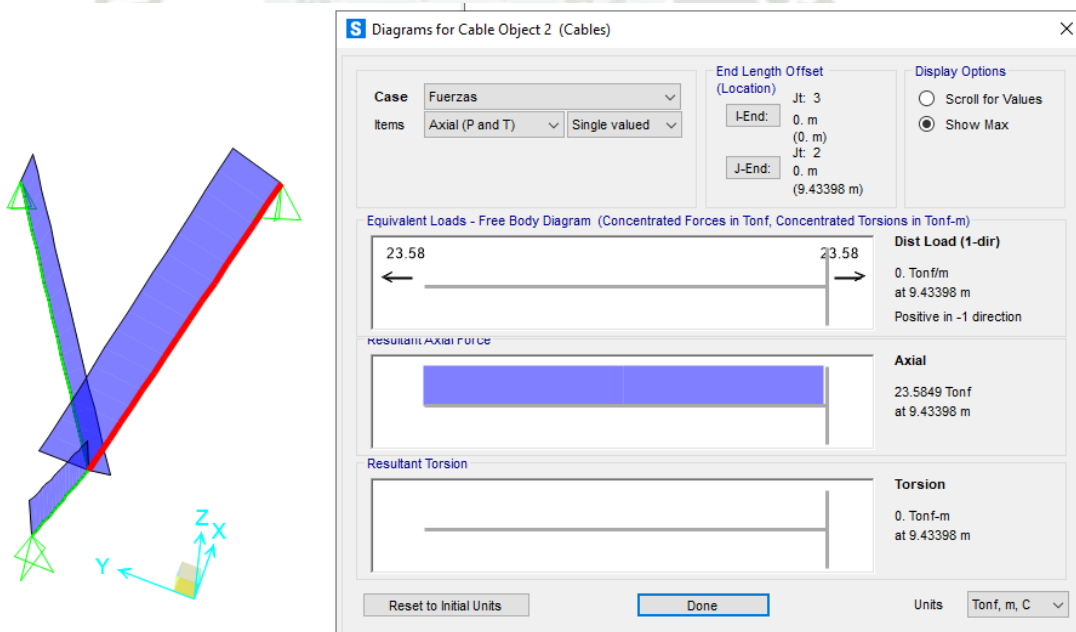
Nota. Deformada del sistema luego de aplicarle fuerzas, mediante el software SAP2000; valores de 0.45 y -2.7926 m para los desplazamientos en “x” y “z”. Elaboración propia.

Una vez modelado todo el sistema, con las características de los elementos, se procede a correr el programa, obteniendo los resultados de la figura 30.

Como se puede observar en la figura 30, se obtienen los mismos desplazamientos que se obtuvieron manualmente en el punto A; hay que tener en cuenta que en el programa SAP2000, tanto el eje “y” positivo como el eje “x” positivo están considerados al sentido contrario con respecto a los que se tomó para el cálculo manual, por lo que en uno se aprecia un valor de 0.45 m y en el otro -0.45 m para el desplazamiento en “x”, sin embargo, los resultados interpretan lo mismo. Ahora, en las figuras 31 y 32 se mostrarán los resultados de las fuerzas internas de los elementos.

Figura 31

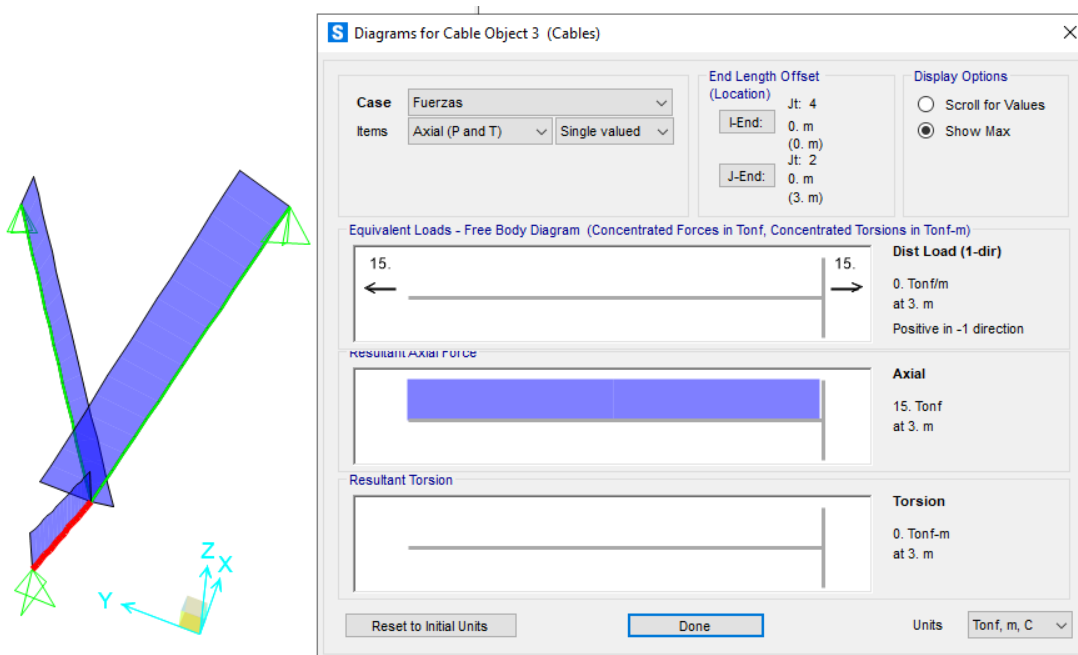
Resultados de Fuerzas Internas del cable 1 del Ejercicio 2



Nota. Se consigue un valor de 23.5849 tonf (tracción) para el cable 1, mediante el software SAP2000. Elaboración propia.

Figura 32

Resultados de Fuerzas Internas del cable 2 del Ejercicio 2

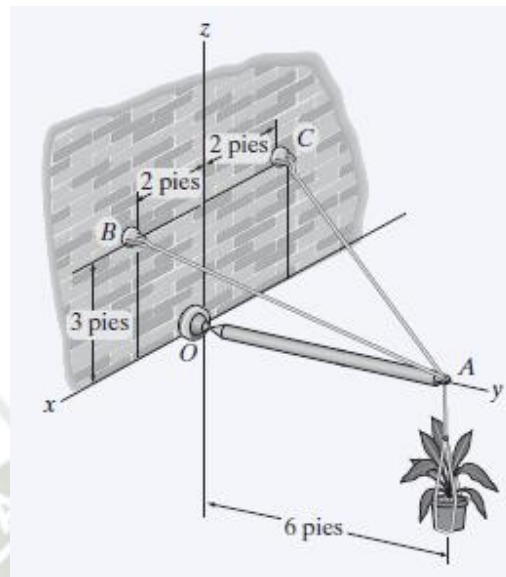


Nota. Se consigue un valor de 15 tonf (tracción) para el cable 2, mediante el software SAP2000. Elaboración propia.

Nuevamente como se puede observar en las figuras 31 y 32, las fuerzas internas en los cables son idénticamente iguales a los hallados manualmente, siendo fuerzas de 23.585 Tonf y de 15 Tonf para los cables, lógicamente todos a tracción.

5.3. Tercer ejercicio validado

Para finalizar con este capítulo, se analizará un último sistema combinado con cables y barras, 2 cables y una barra para ser específicos; nuevamente este ejercicio se extrae del mismo libro de donde se extraen los demás. Así pues, en la figura 33, se puede ver dicha estructura.

Figura 33*3er Ejercicio para Validación*

Nota. Adaptada de *Ingeniería Mecánica Estática* (p. 249), por Russell C. Hibbeler, 2010, Prentice Hall.

Como se puede ver, este ejercicio es un gran modelo para ejemplificar las fuerzas que ocurren en los módulos tensegríticos y en todas las mallas tensegríticas que se desarrollan en la investigación, ya que es un sistema combinado por 2 cables (fuerzas a tracción) y una barra (fuerza a compresión), separando cada fuerza axial por cada elemento. Para este caso no se usará el método matricial para el cálculo manual porque no está hecho para analizar estos tipos de sistemas, donde cada elemento solo puede tener un tipo de fuerza (tracción o compresión) y no dos, como las armaduras, las cuales presentan barras a tracción y compresión si se requiere; así pues se usará un simple método vectorial con el principio del equilibrio estático, con la limitación de solo poder hallar las fuerzas internas mas no los desplazamientos, sin embargo al demostrar que las fuerzas en ambos métodos (manual y computacional) son iguales, se podrá afirmar que con las características mecánicas en los elementos, se podría lograr los mismos resultados de desplazamientos también.

Empezando con el cálculo manual procedemos a determinar los vectores de fuerza de cada cable (cable de A a B y el cable de A a C):

$$\mathbf{F}_{AB} = F_{AB} \left(\frac{\mathbf{r}_{AB}}{r_{AB}} \right) = F_{AB} \left(\frac{(2\mathbf{i} - 6\mathbf{j} + 3\mathbf{k}) \text{ pies}}{\sqrt{(2 \text{ pies})^2 + (-6 \text{ pies})^2 + (3 \text{ pies})^2}} \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{AB} = \frac{2}{7}F_{AB}\mathbf{i} - \frac{6}{7}F_{AB}\mathbf{j} + \frac{3}{7}F_{AB}\mathbf{k} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{AC} = F_{AC} \left(\frac{\mathbf{r}_{AC}}{r_{AC}} \right) = F_{AC} \left(\frac{(-2\mathbf{i} - 6\mathbf{j} + 3\mathbf{k}) \text{ pies}}{\sqrt{(-2 \text{ pies})^2 + (-6 \text{ pies})^2 + (3 \text{ pies})^2}} \right) \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{AC} = -\frac{2}{7}F_{AC}\mathbf{i} - \frac{6}{7}F_{AC}\mathbf{j} + \frac{3}{7}F_{AC}\mathbf{k} \quad (7)$$

Donde:

\mathbf{r} = Vector de posición

r = Longitud de vector de posición

Siguiendo con lo habitual, toca encontrar la fuerza vectorial de la barra AO, sin embargo, se puede eliminar dicha reacción y dicha fuerza tomando momentos con respecto al punto O (Ecuación 8), con lo cual si igualamos los momentos a 0 tendríamos rápida y sencillamente las fuerzas en los tensores:

$$\sum \mathbf{M}_O = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_A \times (\mathbf{F}_{AB} + \mathbf{F}_{AC} + \mathbf{W}) = 0 \quad (9)$$

$$(6\mathbf{j}) \times \left[\left(\frac{2}{7}F_{AB}\mathbf{i} - \frac{6}{7}F_{AB}\mathbf{j} + \frac{3}{7}F_{AB}\mathbf{k} \right) + \left(-\frac{2}{7}F_{AC}\mathbf{i} - \frac{6}{7}F_{AC}\mathbf{j} + \frac{3}{7}F_{AC}\mathbf{k} \right) + (-75\mathbf{k}) \right] = \mathbf{0} \quad (10)$$

$$\left(\frac{18}{7}F_{AB} + \frac{18}{7}F_{AC} - 450 \right) \mathbf{i} + \left(-\frac{12}{7}F_{AB} + \frac{12}{7}F_{AC} \right) \mathbf{k} = \mathbf{0} \quad (11)$$

$$\sum M_x = 0 \quad \frac{18}{7}F_{AB} + \frac{18}{7}F_{AC} - 450 = 0 \quad (12)$$

$$\sum M_z = 0 \quad -\frac{12}{7}F_{AB} + \frac{12}{7}F_{AC} = 0 \quad (13)$$

Resolviendo este sistema de 2 ecuaciones (Ecuación 12 y Ecuación 13) obtenemos:

$$F_{AB} = F_{AC} = 87.5 \text{ lb (tensión)} \quad (14)$$

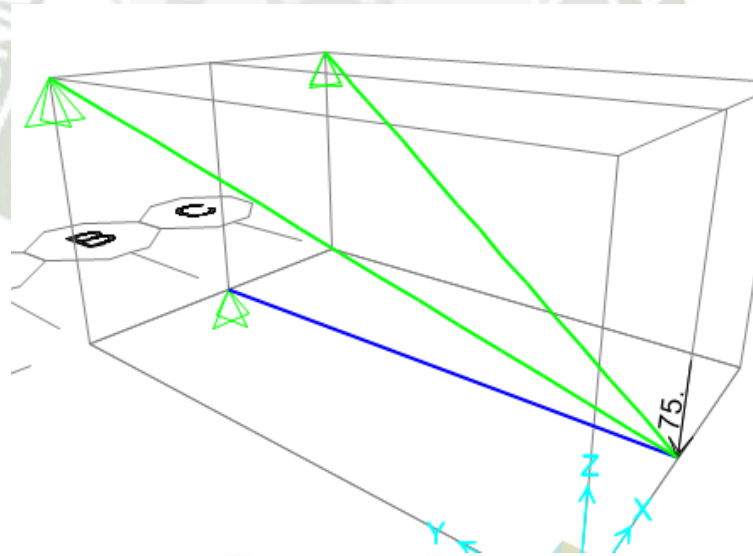
Haciendo equilibrio de fuerzas en el nudo A, obtenemos la fuerza de la barra AO:

$$F_{AO} = 150 \text{ lb (compresión)} \quad (15)$$

Finalmente, para hallar los resultados en el programa SAP2000, se procede primero a modelarlo (figura 34).

Figura 34

Ejercicio 3 modelado en SAP2000



Nota. Sistema modelado mediante el software SAP 2000, luego de introducir previamente la grilla. Elaboración propia.

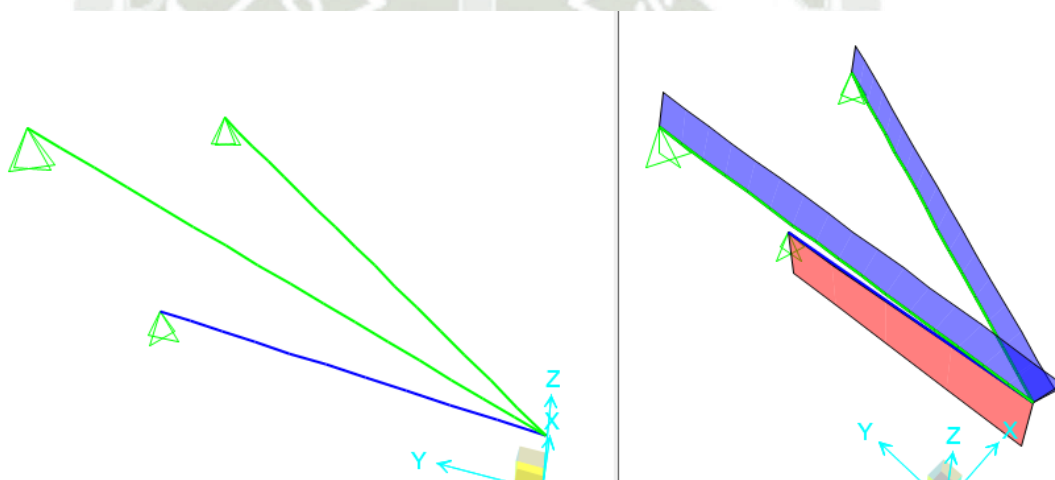
En la figura 34 se puede observar cómo los elementos de color verde son los cables y el elemento de color azul es la barra. Estos colores al ser genéricos en el programa, son los que se utilizarán también durante todo este documento.

Como no se verificarán los desplazamientos, más si las fuerzas, el área y las propiedades mecánicas de los elementos son innecesarios, pudiéndoles colocar así los valores genéricos que nos brinda el programa.

Para poder obtener los resultados, se define la fuerza gravitacional de 75 lb en el punto A y se corre el programa, obteniendo los resultados que se muestran en las figuras 35, 36 y 37.

Figura 35

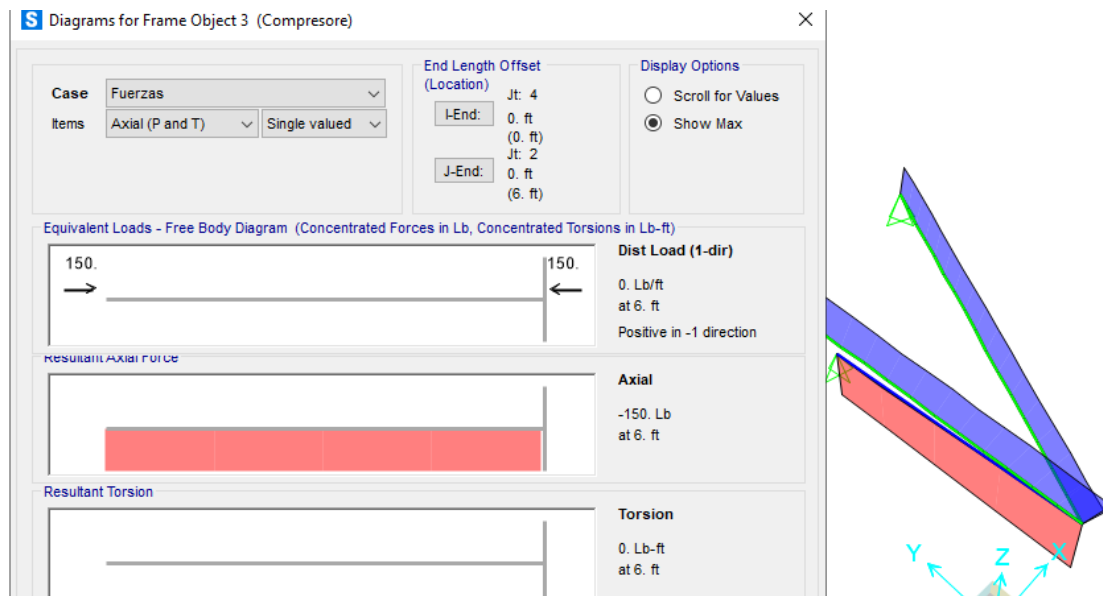
Deformada y Fuerzas Internas del Ejercicio 3



Nota. Deformada del sistema luego de aplicarle fuerzas (izquierda), y fuerzas internas de cada elemento (derecha), mediante el software SAP 2000. Elaboración propia.

Figura 36

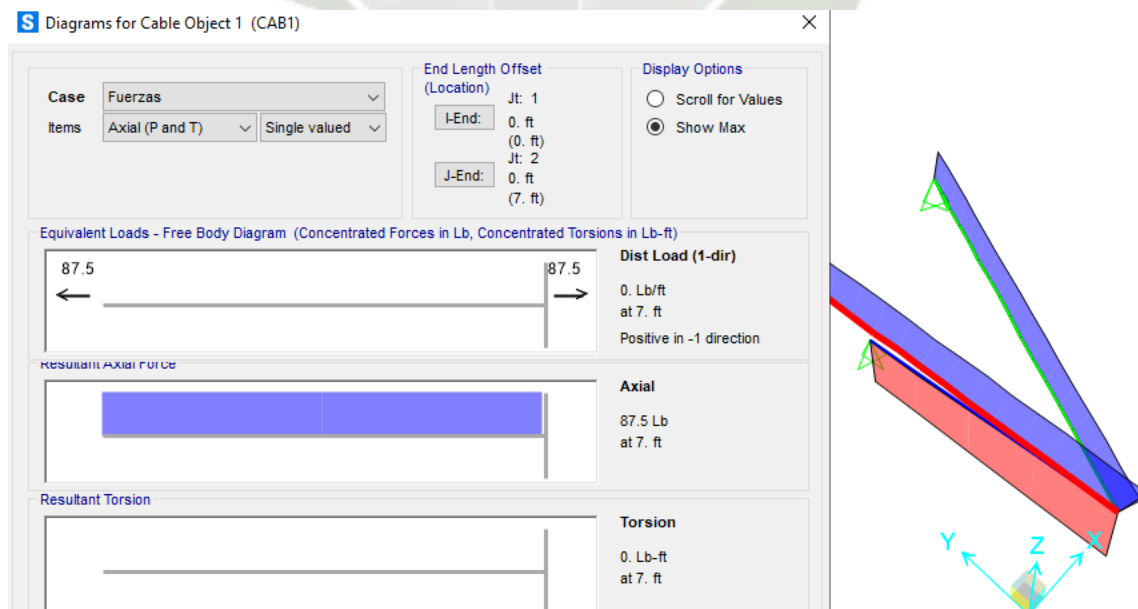
Fuerzas Internas del compresor del Ejercicio 3



Nota. Se consigue un valor de -150 lb (compresión) para el compresor, mediante el software SAP2000. Elaboración propia.

Figura 37

Fuerzas internas de los Cables del Ejercicio 3



Nota. Se consigue un valor de 87.5 lb (tracción) para ambos cables, mediante el software SAP2000. Elaboración propia.

Como se puede observar en las figuras 36 y 37, los valores de las fuerzas internas de los elementos tras el cálculo computacional son los mismos a los del cálculo vectorial, por lo que gracias a este ejercicio y a los dos anteriores, se puede afirmar que el programa si es confiable para analizar todas las estructuras que se tengan en los capítulos posteriores, los cuales se basan en sistemas con fuerzas de compresión y tracción, tal cual se basaron los 3 ejercicios desarrollados en este apartado.



CAPÍTULO VI

6. MALLAS TENSEGRÍTICAS COMPUESTAS POR PEQUEÑOS MÓDULOS TENSEGRÍTICOS

En este apartado se mostrará la formación de todas las mallas tensegríticas generadas por pequeños módulos de tensegridad, los cuales inicialmente ya son tensegríticos, sin embargo, al momento de juntar varios de estos, la tensegridad se puede ir perdiendo, es por eso que es necesario tener clara la teoría de cómo se unen adecuadamente todas estas figuras y como se logra una malla tensegrítica pura, conocimientos que se describieron en los capítulos previos.

6.1. Descripción de los modelos en formación

Para la presente investigación, los módulos que se usarán serán 9, sin embargo, durante la formación de las mallas tensegríticas, debido a las diversas formas de unión que existen, no solo se llega a tener 9 mallas, sino que se le logran en total 21 mallas tensegríticas derivadas de los 9 módulos tensegríticos. Todos estos módulos se mostrarán en la tabla 14 y se detallarán cuantas mallas se pueden formar a partir de cada uno.

Tabla 14

Cantidad total de Mallas Tensegrítica posibles a partir de Módulos tensegríticos.

MÓDULO TENSEGRÍTICO	Nº DE MALLAS TENSEGRÍTICAS POSIBLES
Simplex	3
Cuádruplex	3
Quíntuplex	2
Séxtuplex	3
Quastrut-S	2
Quastrut-Z	2
Medio Cuboctaedro	2
Octaedro Expandido	2
Tetraedro Truncado	2
TOTAL	21

6.2. Aspectos generales y consideraciones tomadas para la formación de mallas

Como ya se vio en el capítulo 2, específicamente en el apartado 2.3 del Marco Teórico, existe un método establecido para conseguir mallas tensegríticas a partir de determinados módulos tensegríticos, únicamente se deben unir varios de estos cuidando siempre el tipo de conexión que tengan (unilateral, bilateral, conexión arista-arista), y tratando de que la tensegridad sea siempre pura (elementos compresores sin ningún tipo de unión).

De todos los módulos que se usaron en la presente investigación, no todos cumplen con estos 3 tipos de uniones, sino que incluso generan nuevos tipos de conexiones modificando estos 3 tipos iniciales; a pesar de eso, las tensegridades que se generan son buenas y puras.

Cada una de las mallas que se generan a partir de la unión de módulos se diseñan a partir de un área similar, para no crear así mallas muy diferentes, la única función de este procedimiento es crear un buen tipo de unión entre cada módulo y así poder obtener una malla tensegrítica funcional; posteriormente, cuando ya se tengan todas las mallas, tanto estas como las generadas por la Manipulación Rot-Umbela, se procederá a determinar un área específica para todas, para poder escoger adecuadamente a la malla representativa de cada grupo.

6.3. Procedimiento para la formación de Mallas tensegríticas en base a módulos tensegríticos

Como ya se mencionó, son 9 los módulos que se usarán para crear 21 mallas tensegríticas, cada una de ellas se verán a continuación. Cabe resaltar que el procedimiento de cada una no se explicará a detalle porque la idea general es simple: unir varios de estos módulos; la única dificultad para este procedimiento es ver la correcta unión tridimensional

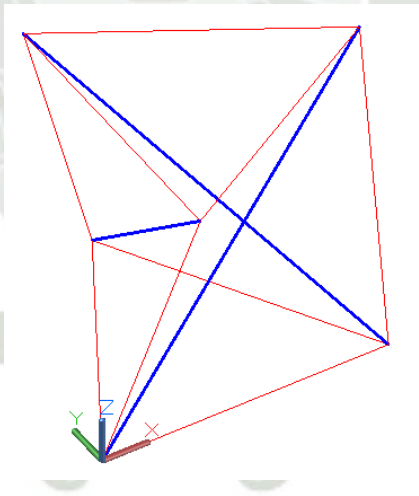
de todos los módulos y tener mucho cuidado con perder la tensegridad pura, tratando además que se pueda conseguir un patrón bien establecido para poder juntar rápida y mecánicamente todos los módulos, evitando así en un futuro una construcción complicada si es que se quisiera construir alguna de estas mallas.

6.3.1. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Simplex”

Anteriormente ya se ha logrado ver imágenes de este módulo tensegrítico que es uno de los más conocidos en este tema de la Tensegridad, siendo el ejemplar de todo este tema; aun así, se mostrará nuevamente este módulo, pero diseñado manualmente en un programa CAD.

Figura 38

Módulo “Simplex”



Nota. Módulo Tensegrítico “Simplex” modelado mediante el programa AutoCad.

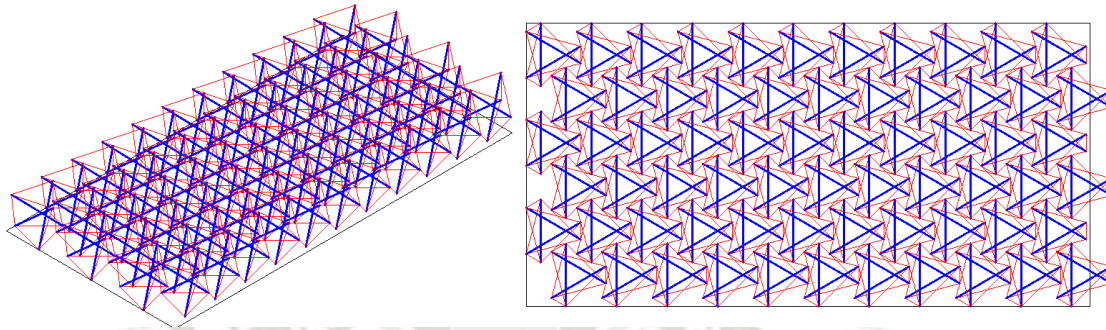
Elaboración propia.

Para este módulo, se logran obtener 3 mallas distintas, las cuales difieren en la forma en la que se unen los módulos; en este caso, se optó por hacer las 3 uniones posibles y se logró tener una tensegridad pura con todas, por lo que se analizarán posteriormente las 3

mallas generadas. Estas mallas se mostrarán en las figuras 39, 40 y 41, por medio de dos vistas, una vista isométrica y una vista en planta.

Figura 39

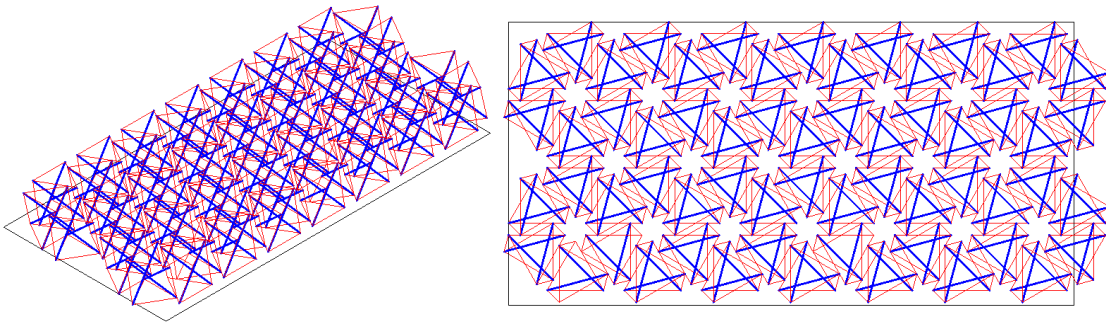
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Simplex", mediante la Unión Unilateral



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda) y en vista en planta (imagen derecha). Elaboración propia.

Figura 40

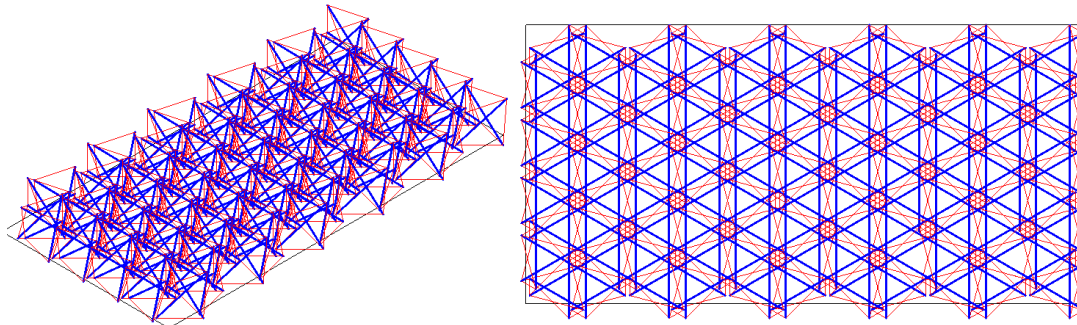
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Simplex", mediante la Unión Bilateral



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda) y en vista en planta (imagen derecha). Elaboración propia.

Figura 41

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Simplex", mediante la Conexión Arista-Arista



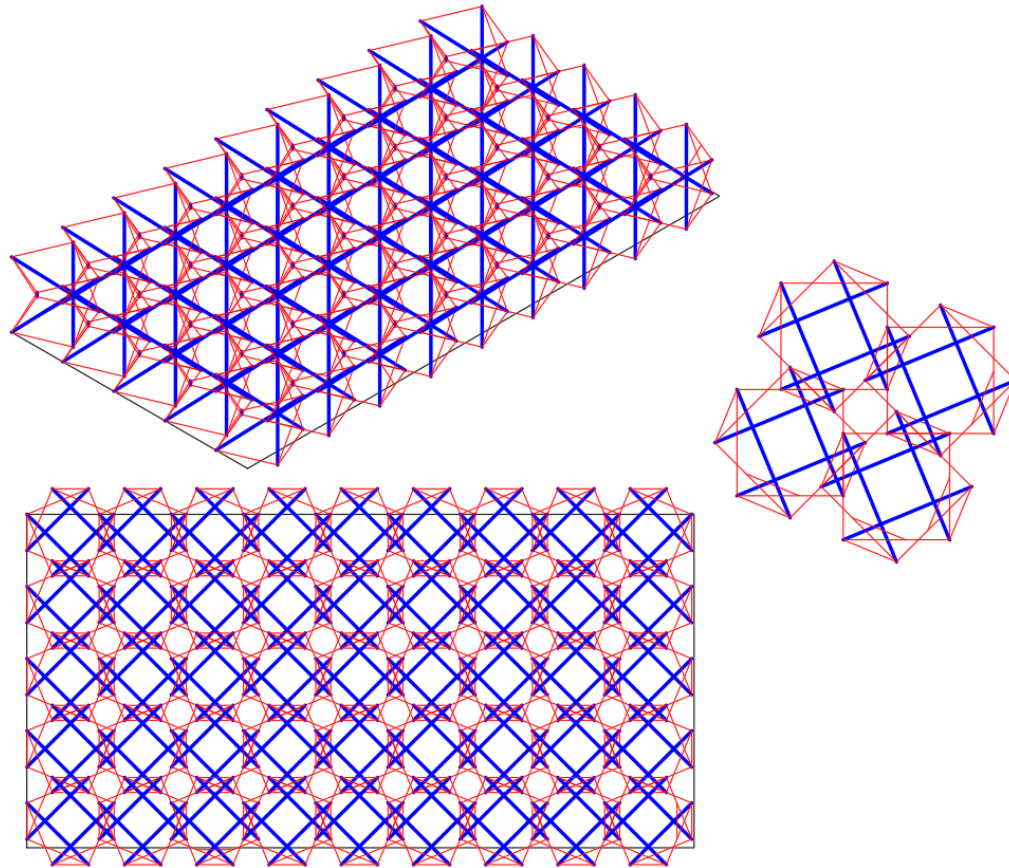
Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda) y en vista en planta (imagen derecha). Elaboración propia.

6.3.2. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Cuádruplex”

Para la formación de la malla tensegrítica a base de “cuádruplex” se usaron las 3 uniones conocidas (unilateral, bilateral y conexión arista-arista), de las cuales solo una conservaba el principio de tensegridad pura, la conexión arista-arista; a pesar de esto, este tipo de unión permite 3 distintas formas de conectar los módulos, cambiando el ángulo y el lado de los módulos donde se conectan, obteniendo así 3 mallas diferentes; para este caso se analizarán las 3 para poder saber cuál es la mejor conexión y sacar conclusiones luego de cómo deben juntarse los módulos para obtener la mejor resistencia posible. En las figuras 42, 43 y 44 se mostrarán las 3 formas de mallas que se obtuvieron (una vista isométrica y una vista en planta de toda la malla, además, una vista en planta del tipo de unión).

Figura 42

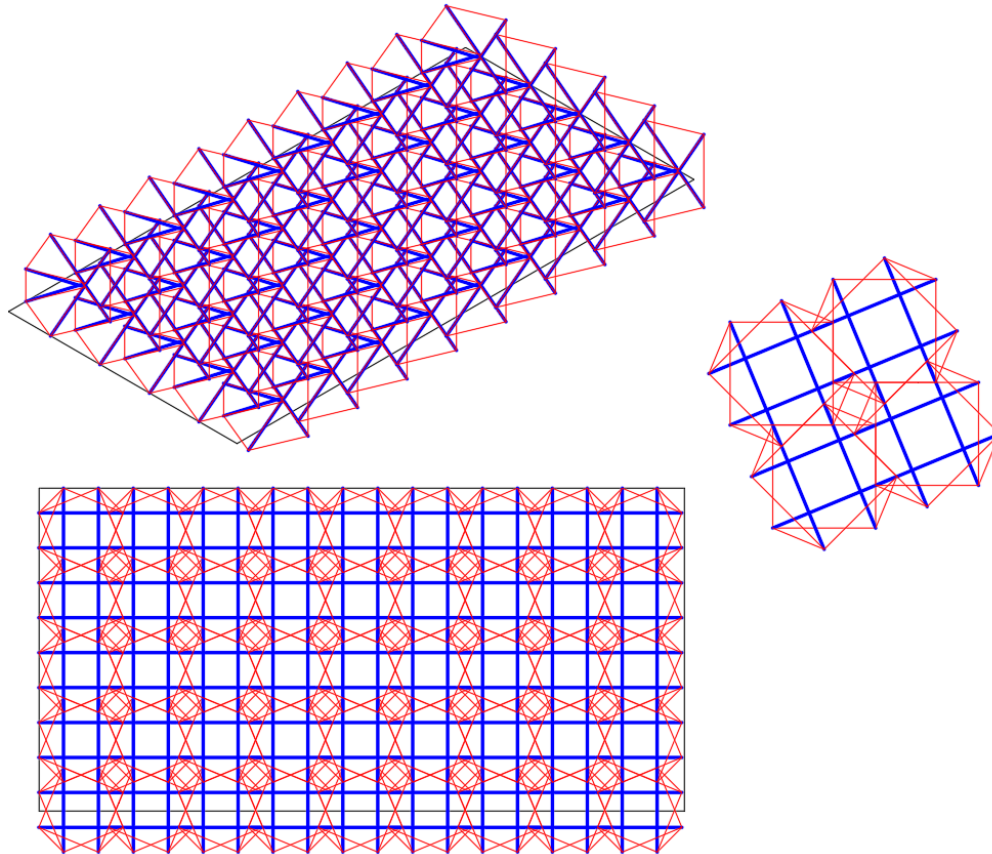
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Cuádruplex", mediante la Conexión Arista-Arista 1



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen de arriba) y en vista en planta (imagen de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imagen derecha). Elaboración propia.

Figura 43

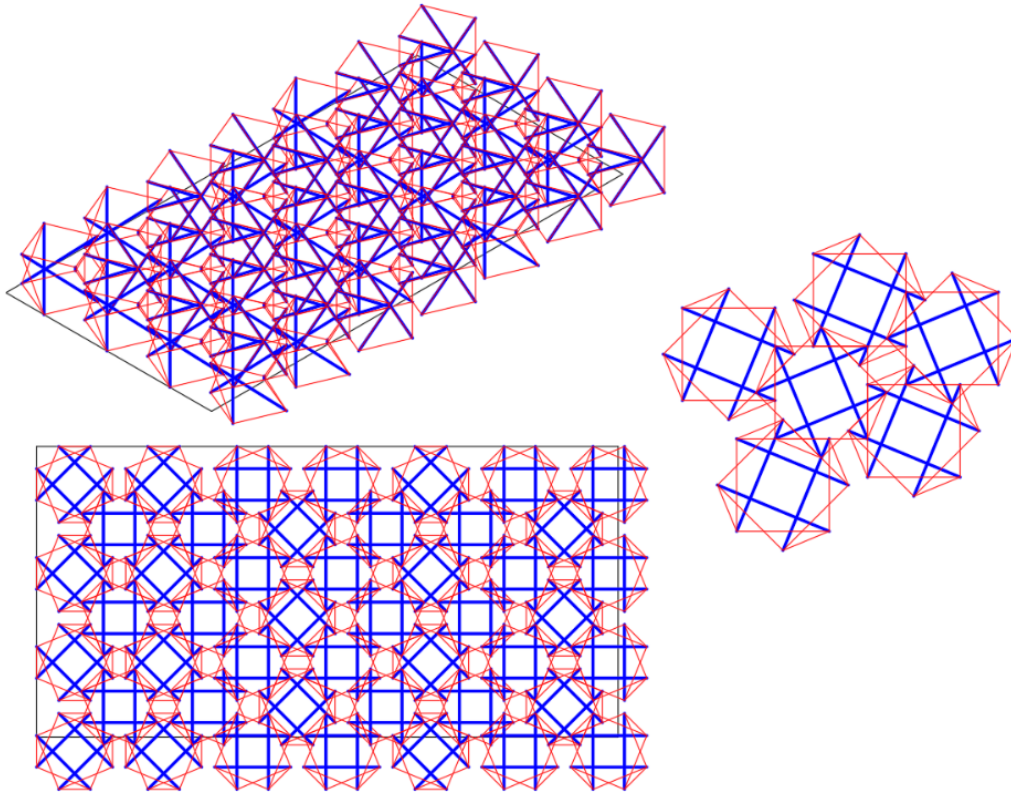
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Cuádruplex", mediante la Conexión Arista-Arista 2



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen de arriba) y en vista en planta (imagen de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imagen derecha). Elaboración propia.

Figura 44

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Cuádruplex", mediante la Conexión Arista-Arista 3



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen de arriba) y en vista en planta (imagen de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imagen derecha). Elaboración propia.

6.3.3. Formación de Mallas tensegríticas en base a "Quíntuplex"

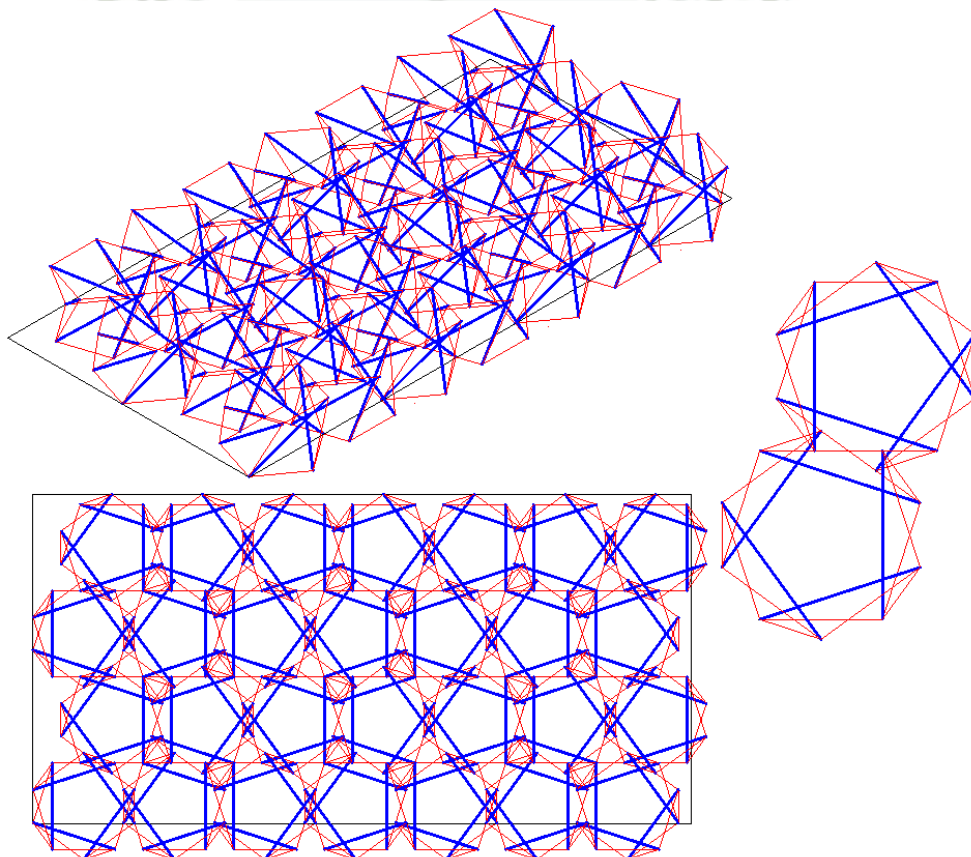
Para el caso de los quíntuplex, la unión de los módulos es similar al de los "cuádruplex", los tipos de unión unilateral y bilateral no pudieron realizarse con normalidad debido a que genera una tensegridad falsa e impura, únicamente funciona la conexión arista-arista; sin embargo, nuevamente la geometría de este módulo permite hacer 3 distintas formas de unión, variando el sentido del giro de los módulos y uniéndolos desde diferentes lados; es interesante ver este módulo, porque con prácticamente 5 lados en sus capas superior

e inferior, las uniones arista-arista resultan impares, mientras que en un cuádruplex, las uniones resultan pares, y tiene sentido porque la base de un cuádruplex es el cuadrado y de un quíntuplex un pentágono (de ahí el nombre de ambos).

A continuación, se verán las 3 mallas posibles con la conexión del tipo arista-arista (figuras 45 y 46), cada una con 3 vistas diferentes, una vista isométrica y otra en planta de toda la malla, y una vista en planta de la unión de únicamente dos módulos, para entender mejor en que se diferencian de las demás uniones.

Figura 45

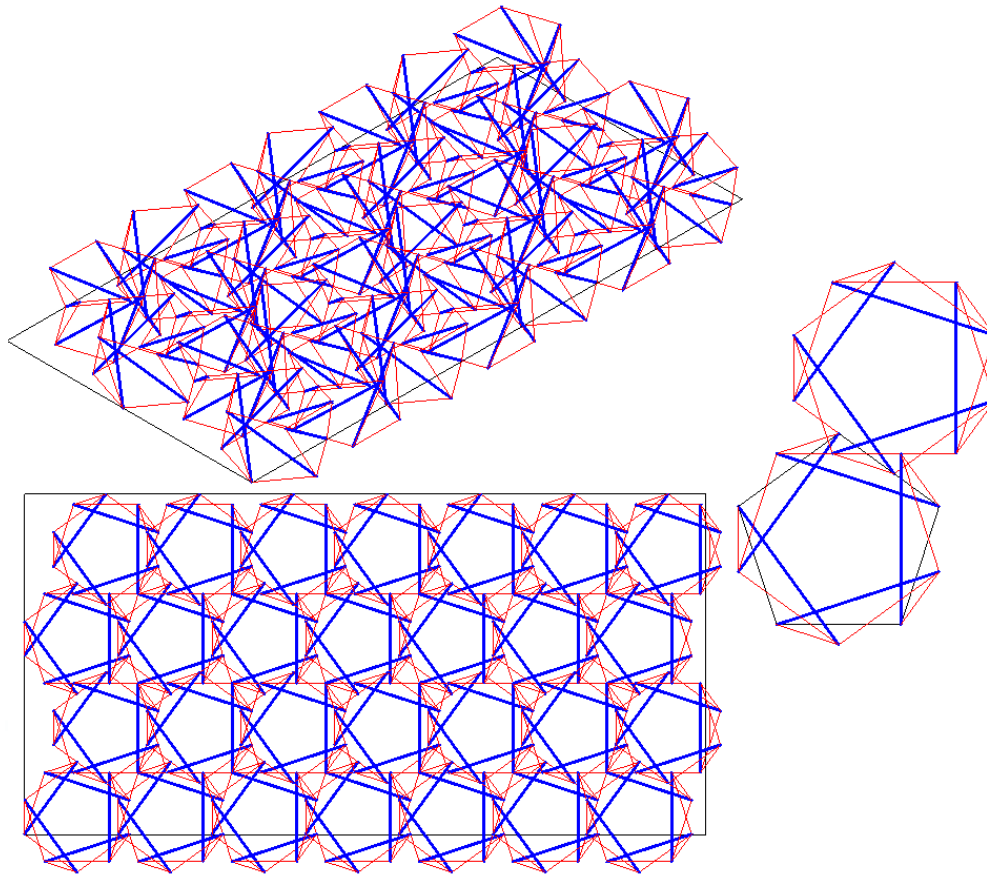
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quíntuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 1



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen de arriba) y en vista en planta (imagen de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imagen derecha). Elaboración propia.

Figura 46

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quíntuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 2

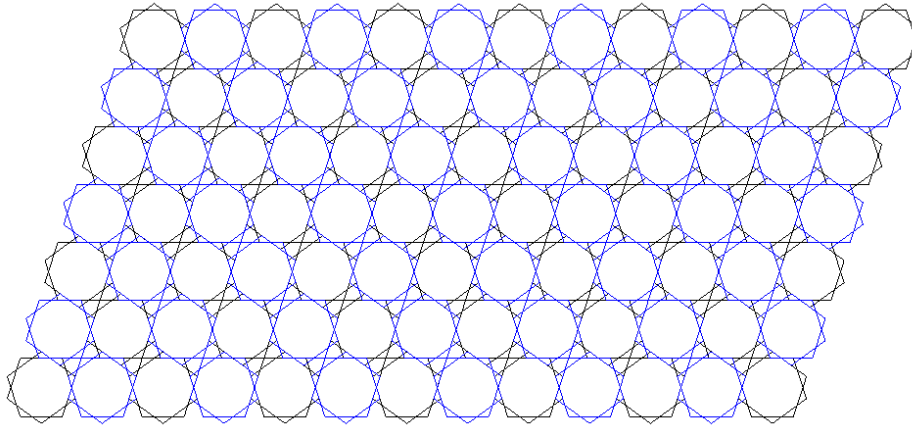


Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen de arriba) y en vista en planta (imagen de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imagen derecha). Elaboración propia.

La tercera malla obtenida no se modelará ni analizará debido a que la geometría final de toda la estructura no logra adoptar de ninguna manera una forma rectangular, necesaria para poder colocarla en infraestructuras de este tipo usadas en el presente trabajo (configuraciones rectangulares); esto se puede apreciar en la figura 47, donde la malla no logra una forma rectangular perfecta.

Figura 47

Geometría complicada de Malla tensegrítica formada por Módulos "Quíntuplex", mediante la Conexión Arista-Arista 3



Nota. Intento de malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista en planta. Elaboración propia.

6.3.4. Formación de Mallas tensegríticas en base a "Séxtuplex"

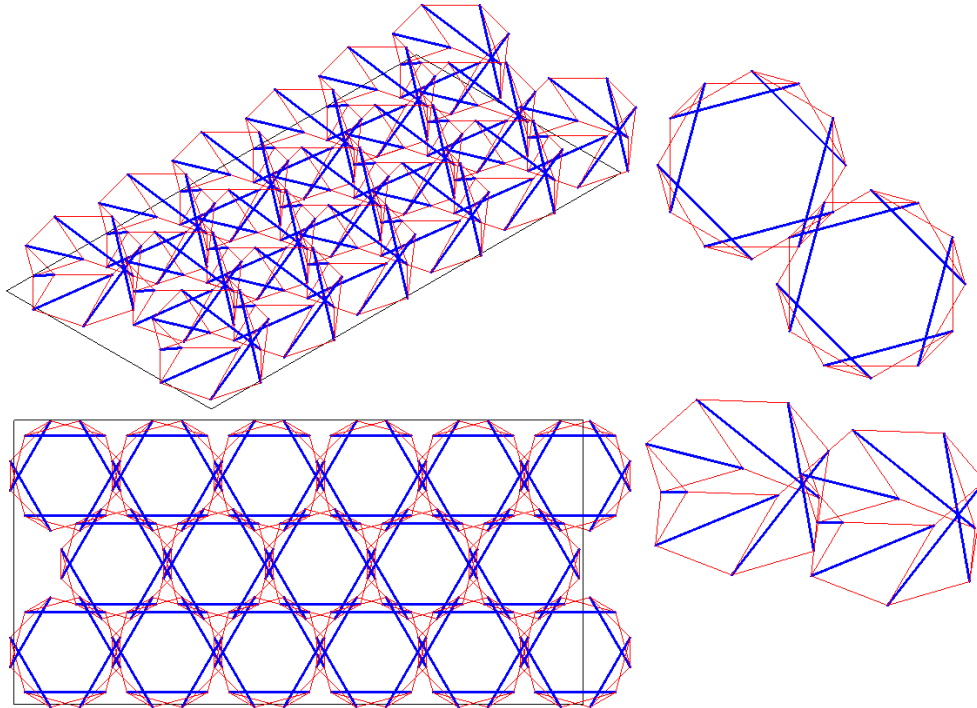
El módulo "Séxtuplex" se puede considerar como parte de la familia de los simplex, cuádruplex y quántuplex, y no solo por el nombre, sino porque todos presentan un patrón similar en cuanto a sus elementos, aumentando únicamente una barra y 3 tensores (una en cada capa, superior, inferior e intermedia) por cada módulo nuevo.

Al igual que los quántuplex y cuádruplex, la unión de los séxtuplex solo presenta un único tipo de unión posible: la conexión arista-arista; sin embargo, nuevamente debido a la geometría tridimensional que tiene, la alternancia de lados en las uniones (capa superior y capa inferior) también permite 3 distintas conexiones y a su vez 3 mallas tensegríticas. Cabe resaltar que estas mallas generadas al presentar 6 barras por módulo, hace que sean más grandes que las demás y su vez se necesite de menos módulos para cubrir un área rectangular.

Figura 48

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Séxtuplex", mediante la Conexión Arista-Arista

1

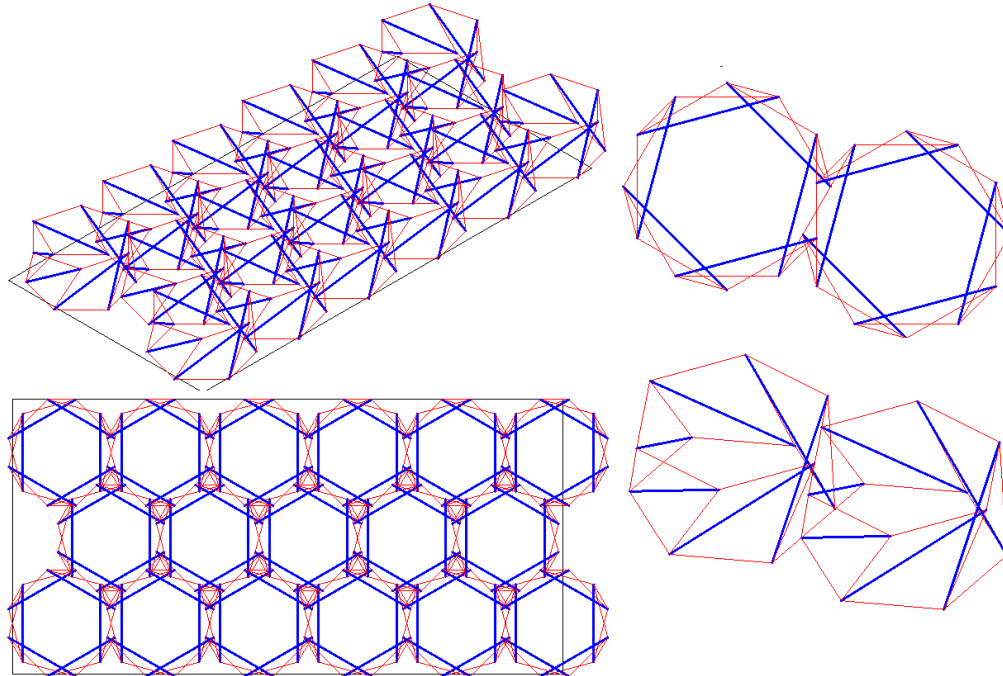


Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

Figura 49

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Séxtuplex", mediante la Conexión Arista-Arista

2

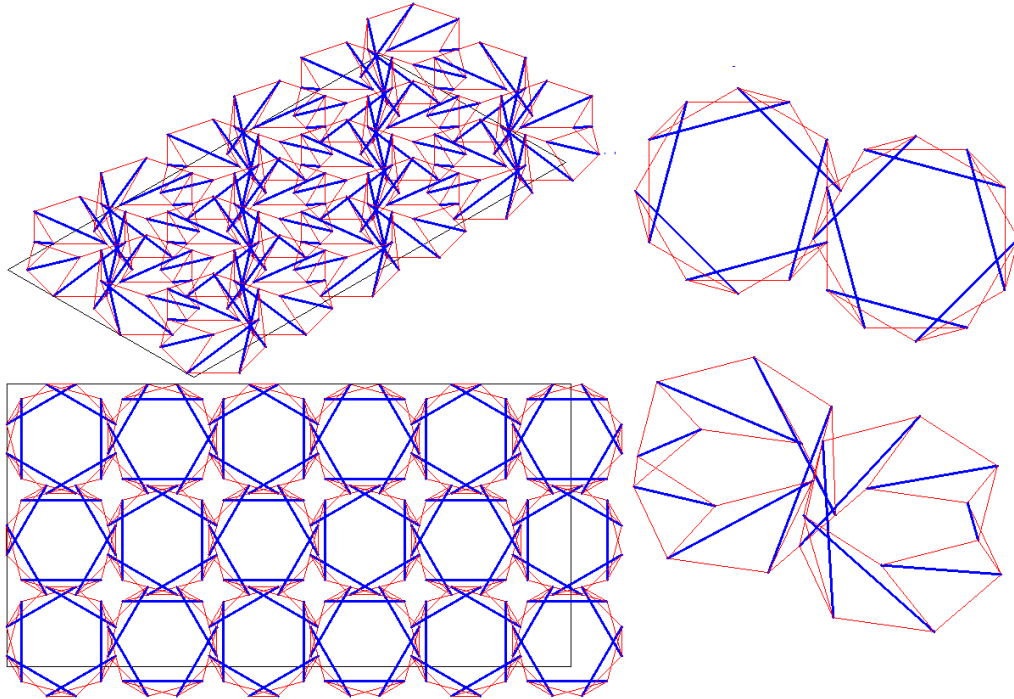


Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

Figura 50

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Séxtuplex", mediante la Conexión Arista-Arista

3



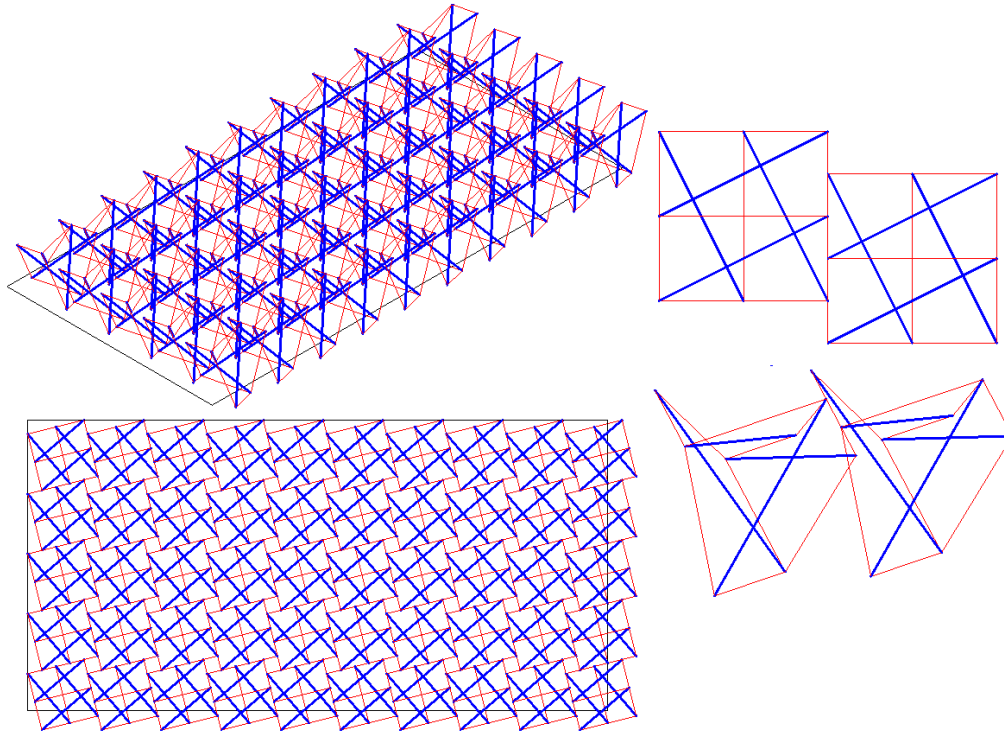
Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

6.3.5. Formación de Mallas tensegríticas en base a "Quastrut-S"

Las mallas resultantes de la unión de módulos "Quastrut-s" son 2, sin embargo, ninguna tiene uniones conocidas hasta el momento, por el contrario, tienen un nuevo tipo de unión que se podría considerar como una conexión arista-arista pero a medias, donde solo se hace la unión en una de las capas, o bien superior o bien en la inferior; esto sucede por la geometría de los módulos, que al tener formas cuadradas se dificulta la unión entre todos. En las figuras 51 y 52, se observan las dos posibles formas de coberturas que se lograron.

Figura 51

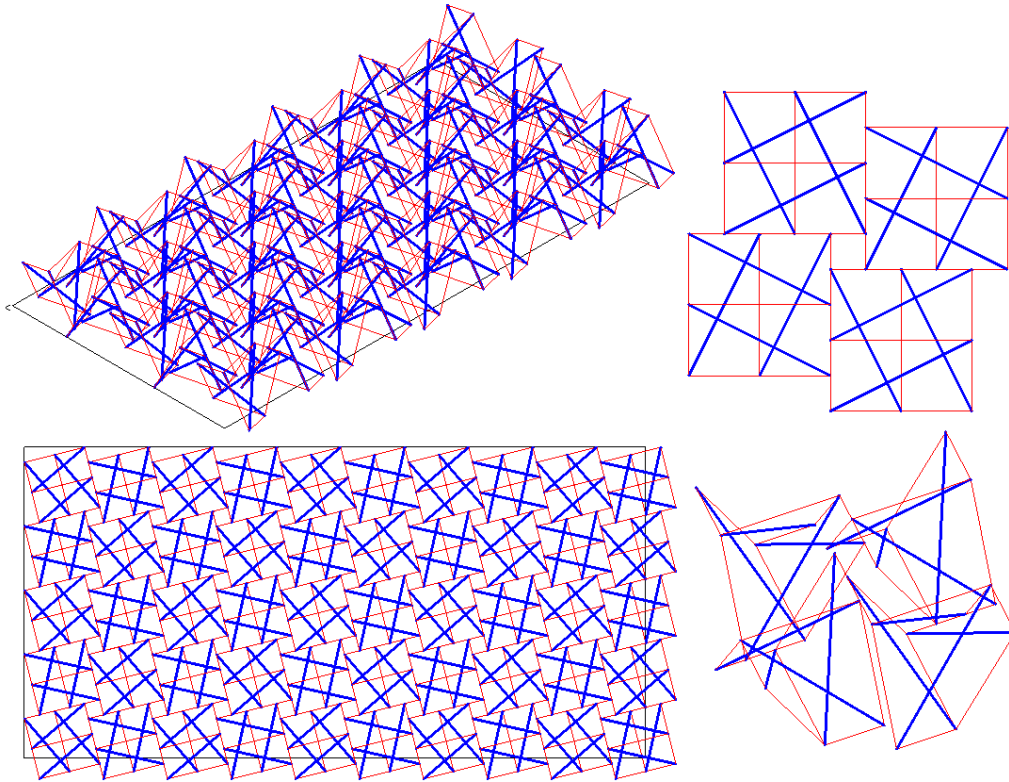
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-S", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 1



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

Figura 52

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-S", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 2



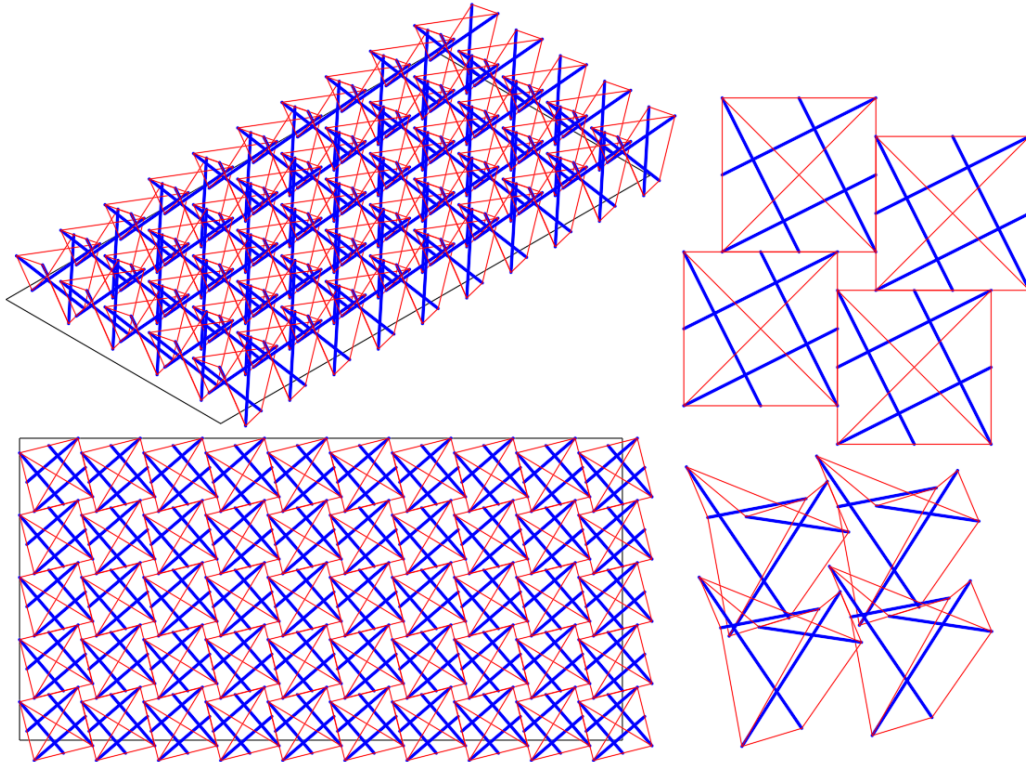
Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

6.3.6. Formación de Mallas tensegríticas en base a "Quastrut-Z"

Los módulos "Quastrut-Z" son casi iguales a los Quastrut-S, únicamente diferenciados por la forma en Z o S que tienen las capas superior e inferior. De igual forma a las mallas anteriores, se pueden obtener solo dos mallas tensegríticas; la unión que se da es la misma, una unión rara de la conexión arista-arista a medias, donde la unión solo se da en una capa (superior o inferior). Ambas coberturas obtenidas se muestran en las figuras 53 y 54.

Figura 53

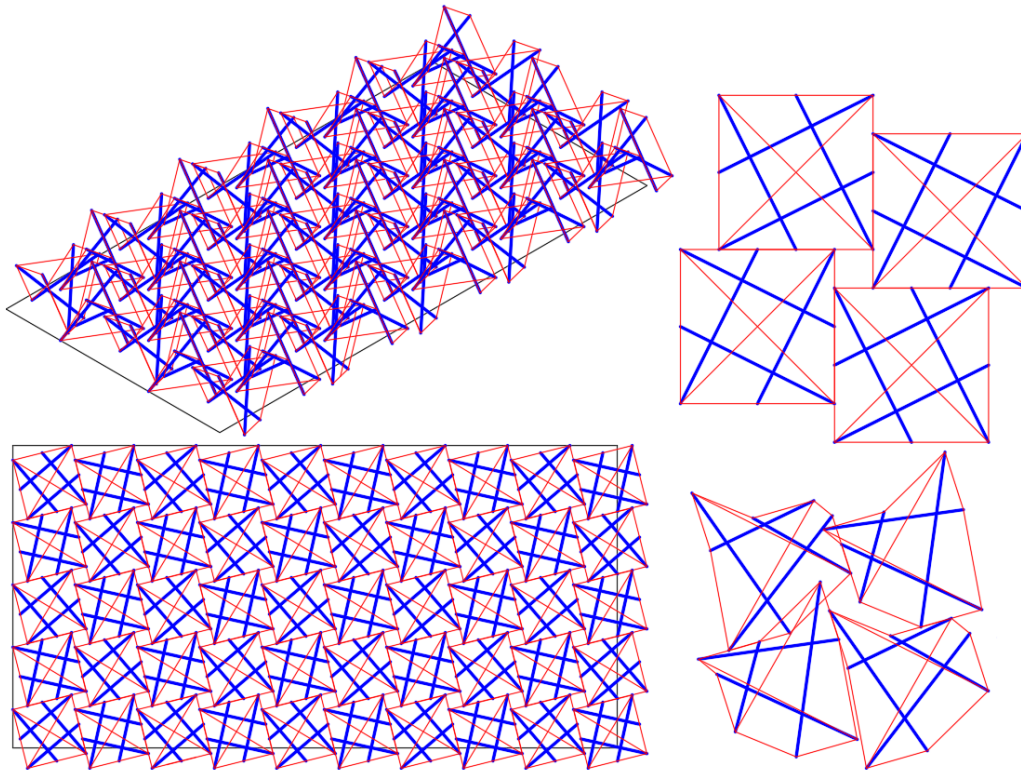
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-Z", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 1



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

Figura 54

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Quastrut-Z", mediante la Conexión Arista-Arista a medias 2



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

6.3.7. Formación de Mallas tensegríticas en base a “Medio Cuboctaedro”

Uniendo los módulos “Medio Cuboctaedro”, se obtiene también una nueva unión, muy similar a lo ocurrido con los módulos Quastrut; sin embargo, en este caso la unión de estos módulos solo se da en las capas inferiores, mientras que en las mallas anteriores se daban en ambas capas.

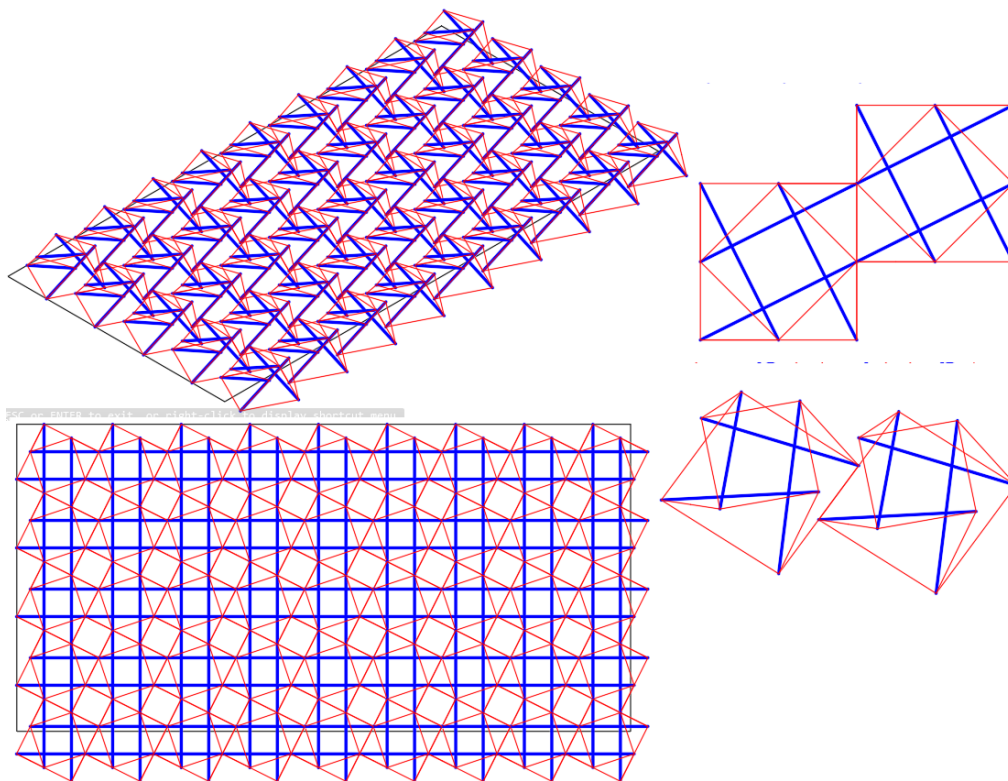
Nuevamente, debido a la forma cuadrada de los módulos, se logran conseguir solo 2 mallas tensegríticas; cabe resaltar que, al solo haber conexión en las capas inferiores, estas

mallas se hacen menos resistentes que las demás por obvias razones; mientras una estructura tenga menos conexiones entre sus elementos, será menos resistente, debido a que las fuerzas se transmiten entre menos puntos de sus elementos; aun así, se analizarán las 2 mallas obtenidas para sacar conclusiones finales.

Las mallas resultantes se mostrarán en las figuras 55 y 56, siguiendo el mismo formato de imagen usado en las últimas mallas.

Figura 55

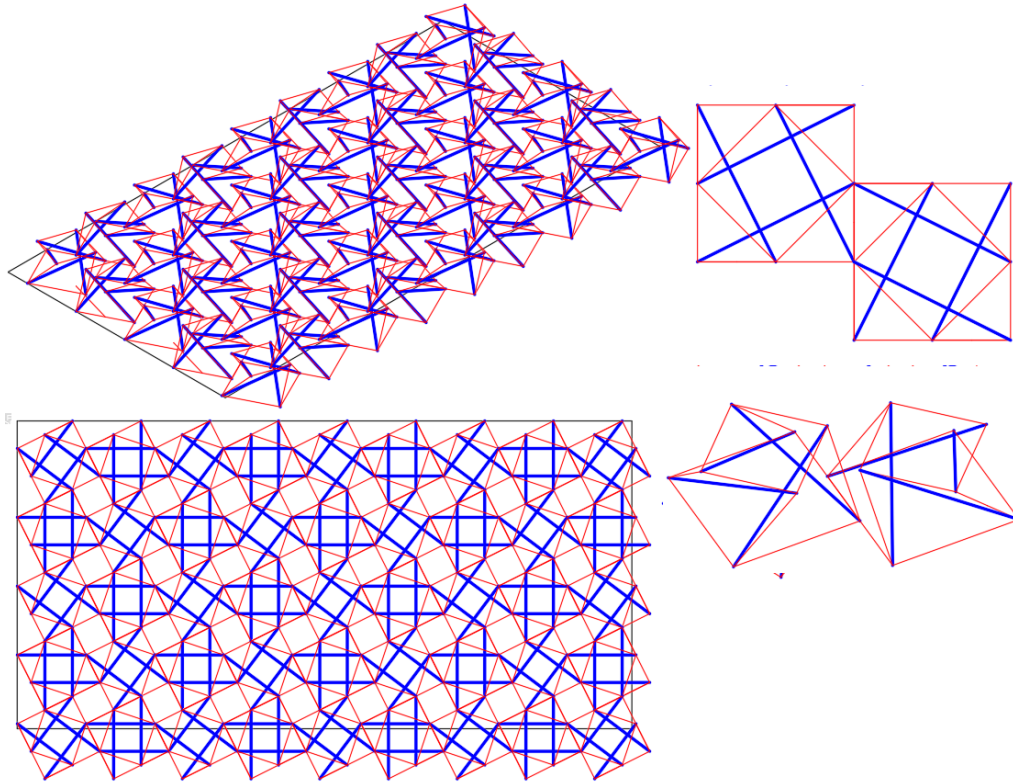
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Medio Cuboctaedro", mediante la Conexión Arista-Arista en una sola capa 1



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

Figura 56

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Medio Cuboctaedro", mediante la Conexión Arista-Arista en una sola capa 2



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

6.3.8. Formación de Mallas tensegríticas en base a "Octaedro Expandido"

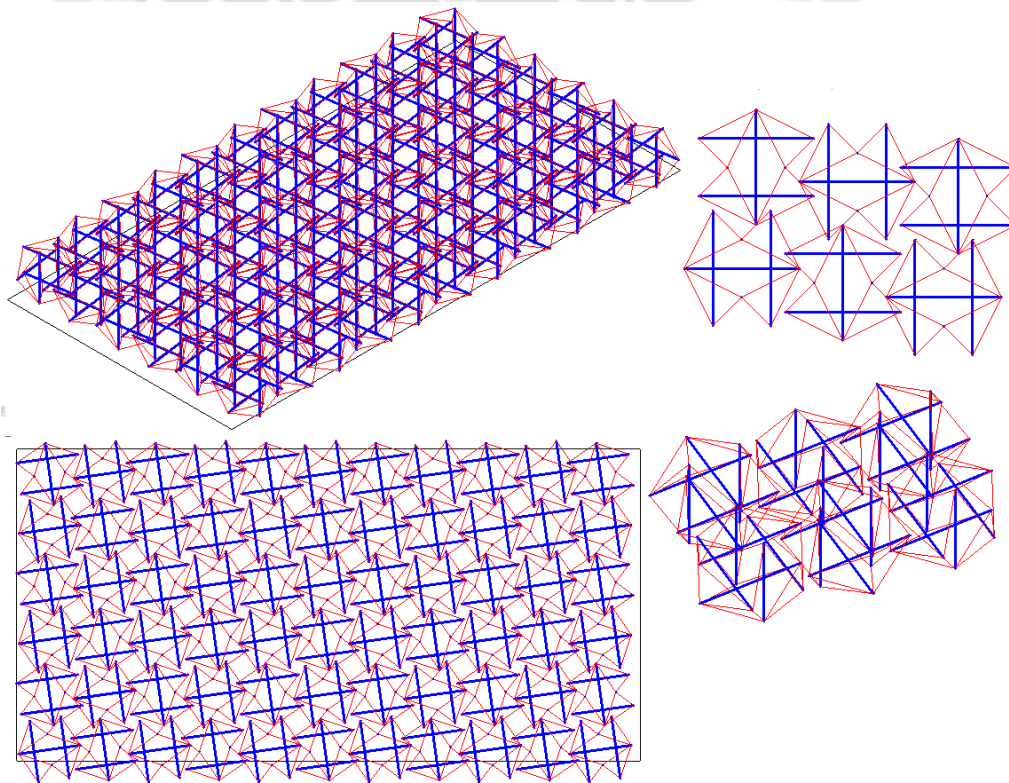
La conexión de los módulos "Octaedro expandido" se dio únicamente a través de la unión unilateral, obteniendo así 2 mallas tensegríticas; estas mallas se logran gracias a una ligera variación en la orientación de los módulos al momento de juntarlos, tal cual como sucede en aquellas mallas donde solo se logra un solo tipo de unión.

Las dos mallas con este módulo son casi iguales, solo varían por una pequeña orientación al unir los módulos; a pesar de eso se analizarán ambas para saber que tanto afecta esta orientación.

En las figuras 57 y 58 se pueden apreciar cada una de estas mallas generadas, visto desde 4 perspectivas diferentes.

Figura 57

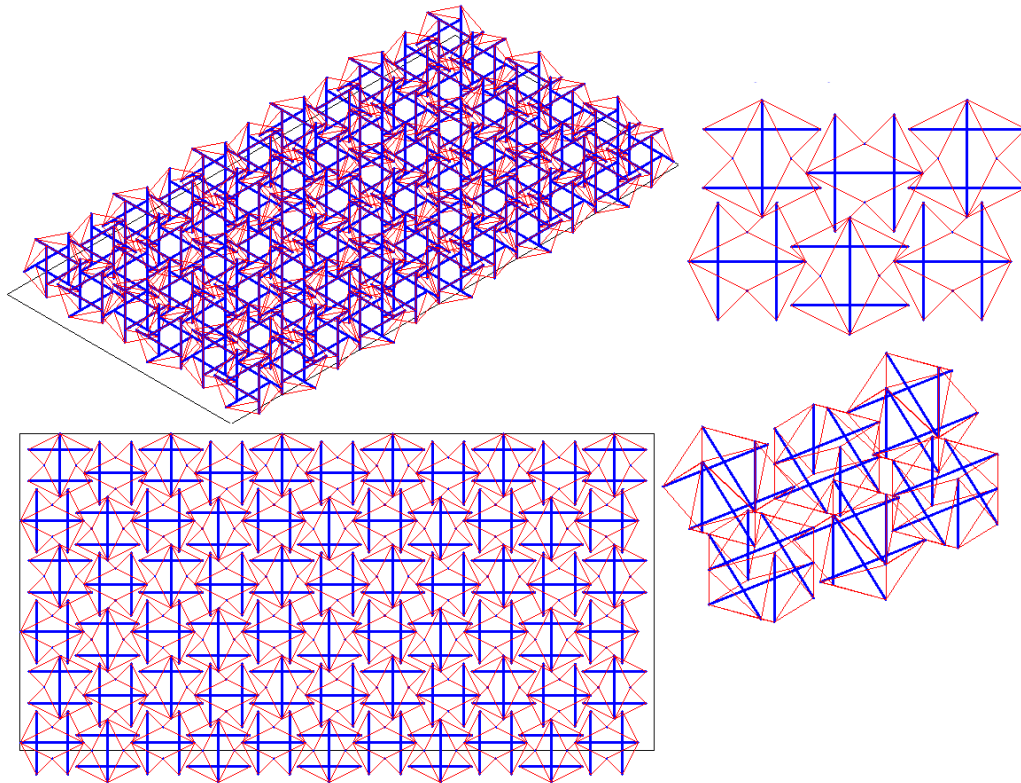
Malla Tensegrítica formada por Módulos "Octaedro Expandido", mediante la Unión Unilateral 1



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

Figura 58

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Octaedro Expandido", mediante la Unión Unilateral 2



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

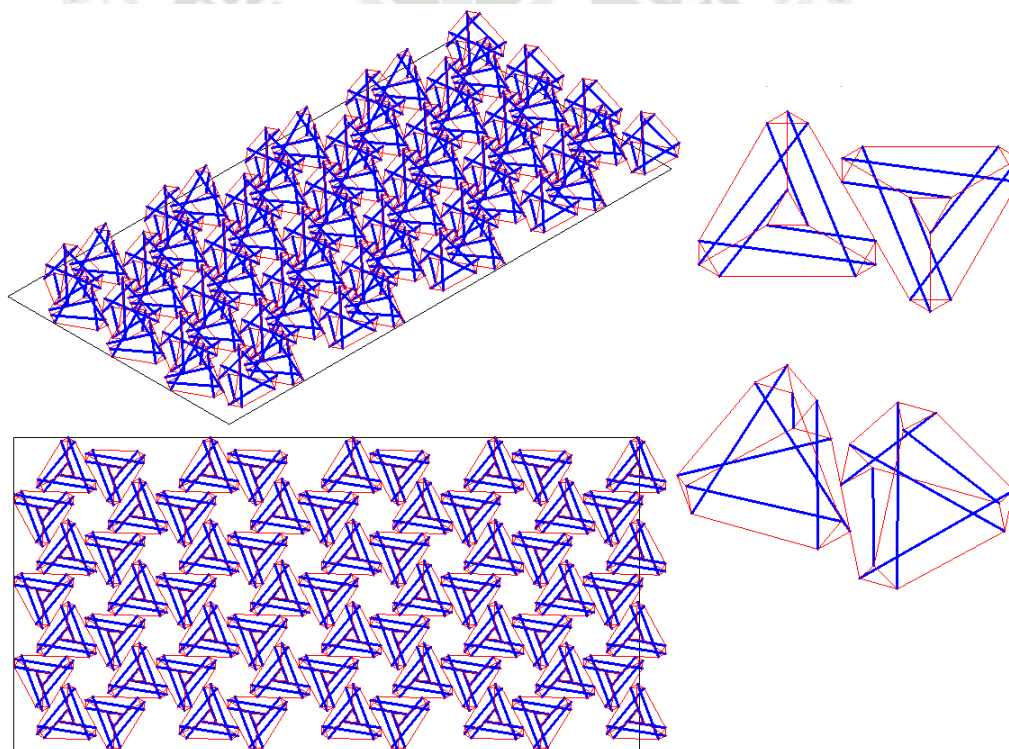
6.3.9. Formación de Mallas tensegríticas en base a "Tetraedro Truncado"

El módulo "Tetraedro Truncado" permite formar 2 mallas tensegríticas, sin embargo, este módulo al tener una geometría tridimensional complicada, hace que las capas superior e inferior de las mallas resultantes no sean uniformes; el tipo de unión que se da es el mismo al del módulo "medio cuboctaedro", donde solo hay conexión arista-arista en la capa inferior (capa superior sin conexión), y como se mencionó antes, esta unión no le da una gran resistencia a la malla, sin embargo igual se analizará para obtener conclusiones.

Una de las mallas obtenidas se genera juntando módulos normales con módulos iguales pero girados cierto ángulo simétricamente, y la otra se logró haciendo lo mismo, pero cambiando el sentido del giro. Como se puede ver en las figuras 59 y 60, la única forma que existe de juntar estos módulos es a través de un patrón geométrico en forma de “flores” o círculos, donde los módulos se juntan alrededor de un mismo punto, logrando una forma de flor compuesta por 6 de estos módulos.

Figura 59

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Tetraedro Truncado", mediante la Conexión Arista-Arista en una sola capa 1.

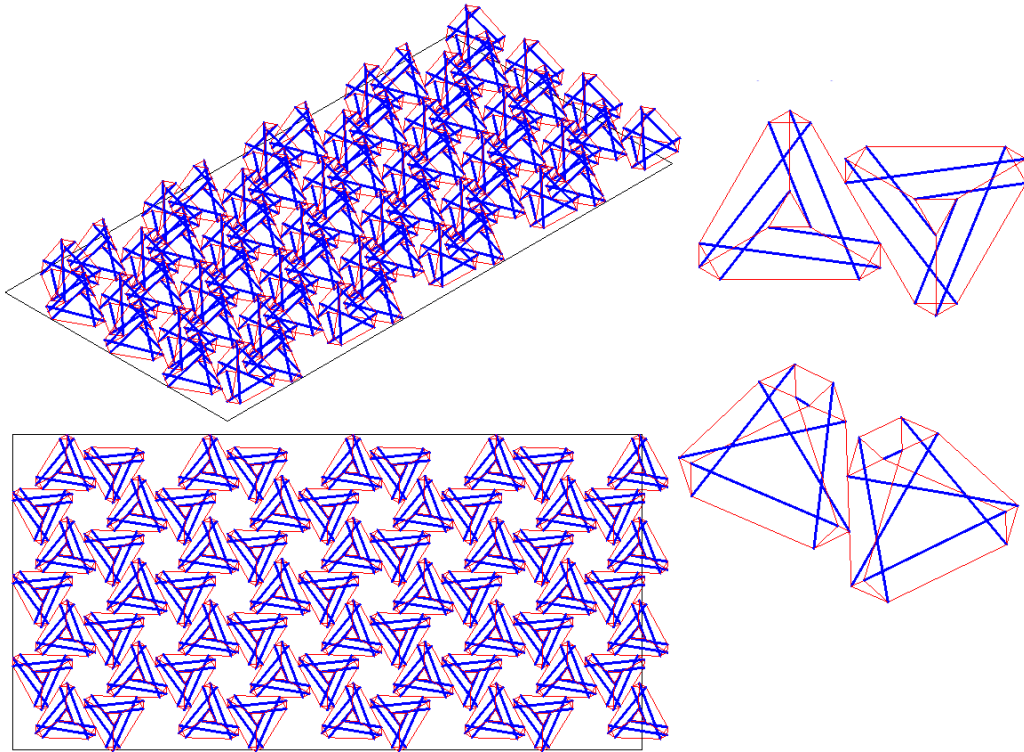


Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

Figura 60

Malla Tensegrítica formada por Módulos "Tetraedro Truncado", mediante la Conexión

Arista-Arista en una sola capa 2



Nota. Malla tensegrítica modelada mediante el programa AutoCad, en vista isométrica (imagen izquierda de arriba) y en vista en planta (imagen izquierda de abajo); tipo de unión de los módulos tensegríticos (imágenes de derecha). Elaboración propia.

CAPÍTULO VII

7. MALLAS TENSEGRÍTICAS COMPUESTAS POR MANIPULACIONES ROT-UMBELA

En este capítulo se mostrará paso a paso cómo es que se logran formar las distintas mallas tensegríticas en base a la teoría de la manipulación Rot-Umbela; como ya se sabe, para lograr las mallas finales se empiezan con MDC (mallas de doble capa) existentes y con el uso de este concepto se llega a tener finalmente MTDC (mallas tensegríticas de doble capa).

7.1. Descripción de los modelos en formación

Para la presente tesis, se tomarán 5 mallas de doble capa existentes, sin embargo, debido a las distintas formas y las distintas variantes con las que se pueden crear, se logran tener 14 mallas tensegríticas finales; estas variantes van desde la inserción de nuevos tensores hasta la adición de más compresores en una misma malla. De igual forma al capítulo anterior, en la tabla 15 se mostrará que MDC se usaron y cuántas MTDC se consiguen al final con cada una de ellas.

Tabla 15

Cantidad total de Mallas Tensegrítica posibles a partir de la Manipulación R-U.

MALLA DE DOBLE CAPA	N° DE MALLAS TENSEGRÍTICAS POSIBLES
Space Deck	6
Malla Plana con Separadores V44	1
Malla Bidireccional Cuadrada Compensada	4
Malla Bidireccional Cuadrada Diferencial	2
Malla Directa o Triangulada	1
TOTAL	14

7.2. Aspectos generales y consideraciones tomadas para la formación de mallas

La teoría sobre la manipulación Rot-Umbela ya se detalló en el marco teórico del capítulo 2, por lo que no se detallará nuevamente en este apartado, sin embargo, en el siguiente apartado si se mostrará como se forma paso a paso cada una de las mallas tensegríticas en base a este principio físico.

Las 5 MDC que se consideran en el presente trabajo de investigación, se toman después de una exhaustiva revisión de documentos, analizando a detalle cuales de estas pueden ser transformadas a mallas tensegríticas y cuáles son las más usadas y reconocidas a nivel global; por lo general, todas estas son estructuras metálicas ya existentes, “armaduras” para ser más específicos.

Estas 14 mallas finales se forman estableciendo primero un área dada, con el mismo objetivo que con las mallas tensegríticas a base de módulos: crear mallas similares en cuanto a características, para hacer justa la comparación de todas las mallas.

Durante este proceso, las distintas mallas de doble capa sufren distintas modificaciones, y no todas siguen el mismo procedimiento, algunas tienen formas geométricas cuadradas o triangulares cuando se abren los nudos de la capa superior, algunas tienen una adición de tensores en toda la malla, otras tienen una sustracción de compresores y tensores en los bordes de la malla, etc.; por lo que cada malla es diferente a las demás, refiriéndonos a su formación.

Cabe resaltar que todas las mallas que se usan en la presente investigación, tienen básicamente 2 tipos de elementos, que a su vez se reparten en 3 grupos; los 3 grupos se refieren a todos los elementos que hay en la capa superior, en la capa inferior y en el medio de ambas (capa intermedia), mientras que los 2 tipos de elementos son los tensores y compresores, o dicho de otra manera cables y barras respectivamente.

7.3. Procedimiento para la formación de Mallas tensegríticas en base a la Manipulación Rot-Umbela

Como ya se mencionó, de las 5 mallas de doble capa se crearán 14 mallas tensegríticas diferentes, cada una de estas se detallará a continuación, ilustrando con figuras algunos de estos pasos para su mejor entendimiento; el color de los elementos a lo largo de todo este capítulo es el mismo, siguiendo un mismo formato.

7.3.1. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Space Deck”

Antes de diseñar esta primera malla, primero se demostrará cómo es que la teoría de Rot-Umbela sirve para obtener mallas tensegríticas a partir de mallas convencionales; para ejemplificar esto se usará la malla “Space Deck” y tras los pasos de la manipulación ya vistos, se verá poco a poco como es que se llega finalmente a una malla tensegrítica existente compuesta por módulos “cuádruplex”.

Para entender como es esta MDC, se mostrará la imagen de una cobertura existente en la ciudad de Madrid en España (figura 61), la cual tiene una forma casi idéntica a la “Space Deck”.

Figura 61

Malla del centro de FP en la Celsa, Madrid

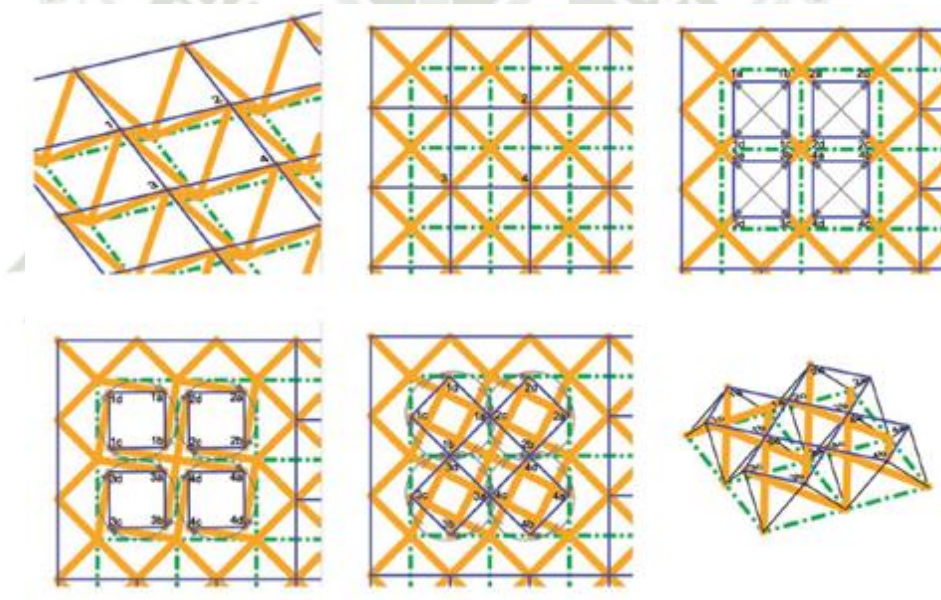


Nota. Adaptada de *Mallas Espaciales* (p. 7), por Luisa Basset Salom, s.f., Universidad Politécnica de Valencia.

Una vez conocida la geometría de esta malla, podemos empezar con la manipulación Rot-Umbela; la figura 62 muestra visualmente cómo es que funciona todo este proceso, el cual luego se detallará literalmente. Siguiendo con la explicación, hay que considerar que en la Space Deck, toda la capa superior e inferior estarán compuestas por únicamente tensores, mientras que toda la capa intermedia estará compuesta por compresores; esta consideración se aplicará casi en la totalidad de las mallas que se utilizan en la presente tesis.

Figura 62

Obtención de MTDC de "Cuádruplex" a partir de la malla Space Deck con Manipulaciones R-U.



Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 340), por Valentín Gómez-Jauregui, 2012, Informes de la Construcción.

Como se puede ver en la figura 62, la primera imagen se trata de la Space Deck vista de una toma isométrica, la segunda imagen muestra a la malla en una vista en planta; en la tercera imagen, es donde se inicia con el proceso de manipulación, donde se “abren” los nudos de la capa superior en cuadrados de cierto perímetro, y los elementos de color amarillo

(elementos diagonales que tocan puntos de la malla superior e inferior) se reubican en un nuevo nudo cada uno; otra forma de ver este primer paso es como si desde la vista en planta se colocaran cuadrados de cierto perímetro en los nudos de la capa superior, cortando así a todo elemento de color amarillo que llegue a dicho nudo, dándole así un nuevo punto de ubicación (todo esto visto desde la vista en planta); en la cuarta imagen, a los cuadrados nuevos generados se les hace un giro de 90° en sentido horario, arrastrando con ello a los nuevos puntos formados y los elementos reubicados; finalmente en la quinta imagen se da un giro adicional de 45° en el mismo sentido, volviendo a modificar la posición de los nuevos nudos y sus elementos conectados, quedando finalmente todo como en la sexta figura, donde solo se muestra un pedazo de toda la malla modificada.

Como se puede observar en la última imagen, la manipulación es la equivalencia a juntar 4 módulos tensegríticos “Cuádruplex”, con lo cual se puede afirmar que la manipulación Rot-Umbela si funciona para generar Tensegridad desde una cobertura básica inicial. Todo este proceso descrito de la manipulación Rot-Umbela, es el que se realizará para todas las MDC de este apartado.

Cabe resaltar que el resultado obtenido del ejemplo anterior no logró una tensegridad pura del todo, ya que muchas barras (elementos de color amarillo) logran tocarse aún en un mismo punto y eso hace que el nivel de tensegridad baje; lógicamente esto sucede porque el propósito del ejemplo anterior era únicamente demostrar cómo llegar de una MDC a una malla tensegrítica que ya existía.

Para tener mallas tensegríticas puras resultantes de la Space Deck, se harán 2 manipulaciones distintas.

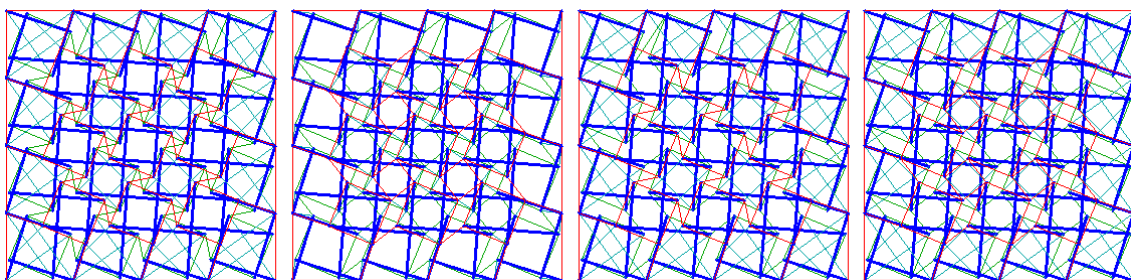
En la primera manipulación, a los cuadrados generados descritos anteriormente se les hará un giro de 112.5° y no de 145° , que equivale a la suma de 90° y la mitad de 45° , eso

se hará tanto para la capa superior, como para la inferior. Posteriormente para el tema de los cables, primero se colocarán los tensores en la capa intermedia, en todos los nudos donde se conecta un elemento compresor, de tal forma que haya equilibrio de fuerzas en el eje z (sentido de la gravedad), de lo contrario la malla sería inestable; luego se usa el mismo criterio de equilibrio de fuerzas para colocar tensores que conecten todos los nudos de las capas superior e inferior (plano horizontal). Cabe resaltar que en este último paso (colocación de tensores) se obtuvieron 4 tipos de mallas distintas, las cuales tienen diferente ubicación de tensores, tanto en las capas superior e inferior, como en la capa intermedia. En una de estas 4 mallas se usaron los cables que ya existían anteriormente (antes de la manipulación Rot-Umbela) reubicándolos en posiciones estratégicas, y en las otras 3 se colocaron más cables de los que había inicialmente.

Todas estas mallas generadas se analizarán para escoger a la mejor de todas; se pueden visualizar estas 4 mallas en la figura 63.

Figura 63

Tipos de geometrías de Mallas Tensegríticas formadas desde la Space Deck con Tensores iniciales



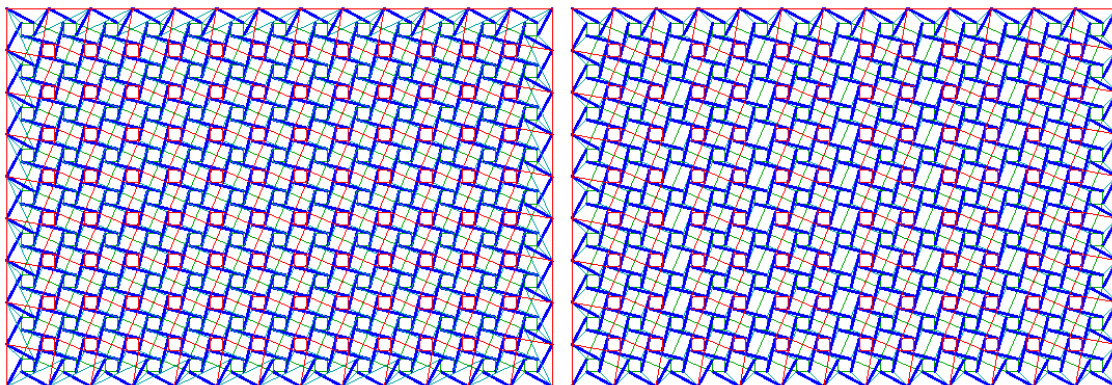
Nota. 4 tipos de mallas modeladas en AutoCad, partiendo de una malla convencional “Space Deck”, con los tensores iniciales, todas en vistas en planta. Elaboración propia.

Para la segunda manipulación Rot-Umbela de esta MDC se genera un cuadrado más pequeño en cada nudo, dándoles luego un giro de 90° , arrastrando con los vértices a todos los puntos de conexión con barras; esto se hizo tanto para la capa superior como para la inferior. Nuevamente para este paso se consiguieron 2 mallas diferentes, las cuales difieren al igual que antes, de la organización y ubicación de los tensores de la capa superior, inferior y de la capa intermedia.

Como resultado, en el programa de AutoCAD se pueden visualizar las mallas resultantes para esta manipulación (figura 64).

Figura 64

Tipos de geometrías de Mallas Tensegríticas formadas desde la Space Deck con Tensores adicionales



Nota. 2 tipos de mallas modeladas en AutoCad, partiendo de una malla convencional “Space Deck”, con tensores adicionales, ambas en vistas en planta. Elaboración propia.

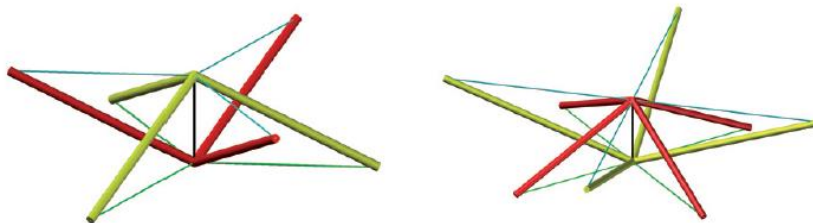
7.3.2. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla plana con separadores V44”

La segunda MDC existente está compuesta por “separadores V44”, que, si bien son módulos tensegríticos, no son puros del todo; estos básicamente son grupos de compresores

aislados unos de otros; existen también separadores V33 formados por grupos de 3 barras (de ahí la nomenclatura) al igual que los separadores V44, ambos se ven en la figura 65.

Figura 65

Módulos tensegríticos V33 y V44

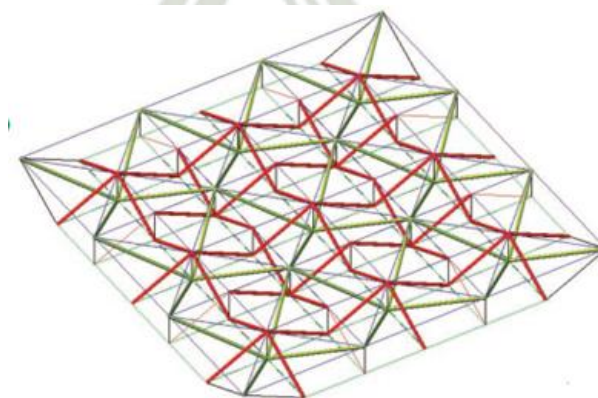


Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 336), por Valentín Gómez-Jauregui, 2012, Informes de la Construcción.

Por lógica se puede notar que la segunda imagen de la figura 65 es la del separador V44; así pues, la unión de estos módulos genera una malla tensegrítica con muchos elementos en compresión unidos (figura 66), la cual se considera como una malla “plana” según Snelson, quien fue quien propuso esta malla tensegrítica en la década de los 60.

Figura 66

Malla compuesta por Separadores V44

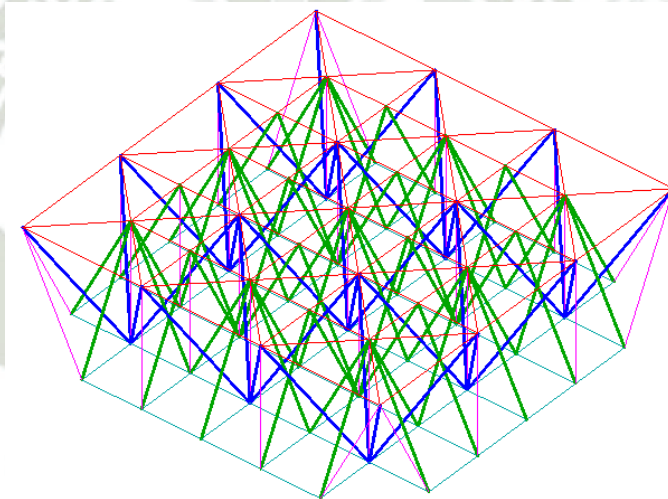


Nota. Adaptada de *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela* (p. 337), por Valentín Gómez-Jauregui, 2012, Informes de la Construcción.

La malla de la figura 66 se construyó en AutoCAD, y como no es del todo pura, se le manipulará tensegríticamente para demostrar que la Manipulación Rot-Umbela no solo sirve para mallas de doble capa convencionales, sino también para mallas que ya son tensegríticas, pero no en su totalidad. Como dato adicional, durante su montaje se pudo observar cómo es que se generó inicialmente esta malla, que se observa en la figura 67, partiendo con dos coberturas planas e iguales en forma de cuadrados, y con la colocación de tensores en los puntos de las cuadrículas se llega a esta malla de Snelson.

Figura 67

Malla compuesta por Separadores V44 replicada manualmente

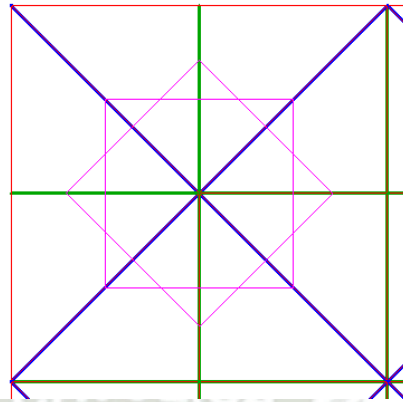


Nota. Malla tensegrítica compuesta por separadores V44, replicada y modelada en el programa AutoCad, a pequeña escala. Elaboración propia.

Trabajando ya con la malla de separadores V44, para la manipulación Rot-Umbela se colocaron cuadrados en cada nudo; para la capa superior se colocaron cuadrados girados en 45° , mientras que en la capa inferior se colocaron cuadrados en su forma natural (sin giro), tal cual se observa en la figura 68; con estos cuadrados se modificará la orientación de las barras tal como lo explica la teoría de la manipulación Rot-Umbela.

Figura 68

Vista en planta de la malla con Separadores V44 con la colocación de cuadrados.

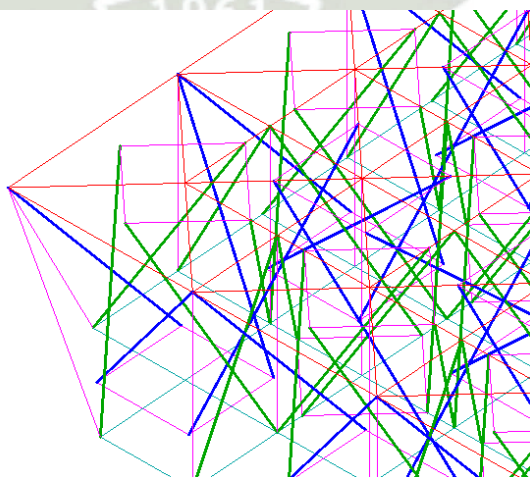


Nota. Parte de la malla compuesta por separadores V44, donde se ven los cuadrados ingresados en las capas superior e inferior (natural y girado 45°). Elaboración propia.

En ambos lados de la malla (cara superior e inferior) a los cuadrados ya establecidos se les hizo un giro de 90° en sentido horario, cambiando también la orientación de las barras que interceptaban a los cuadrados desde una vista en planta.

Figura 69

Giro de 90° en sentido horario para la malla con separadores V44.

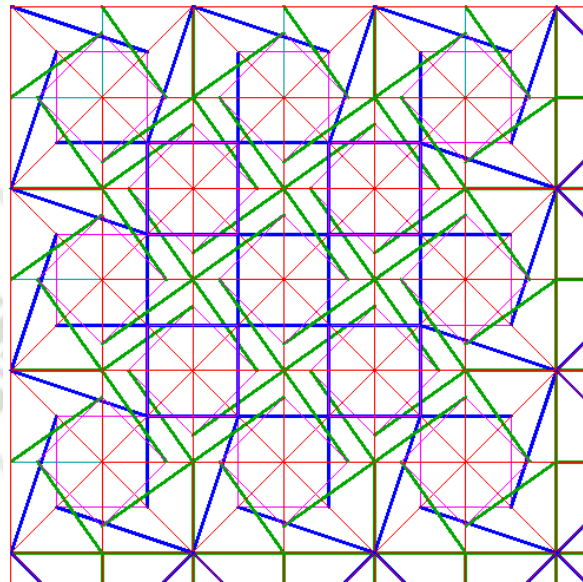


Nota. Sección amplificada en AutoCad de la malla tensegrítica compuesta por separadores V44, donde se da el giro en los puntos de unión. Elaboración propia.

Desde una vista en planta (figura 70), después de la manipulación Rot-Umbela se puede ver la forma que toma la malla.

Figura 70

Vista en planta de malla con separadores V44 tras los giros de 90° de los cuadrados.



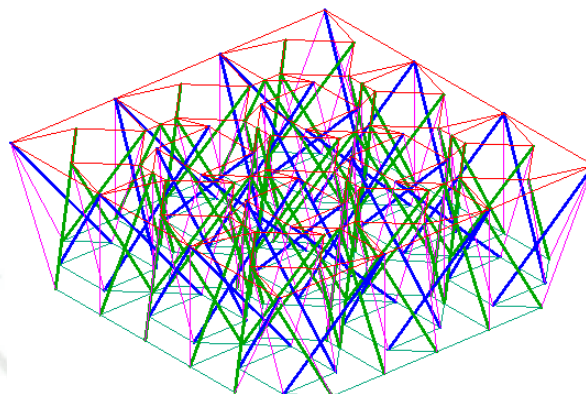
Nota. Vista en planta de la malla tensegrítica compuesta por separadores V44 tras los giros de 90° en los nudos de la capa superior, mediante AutoCad. Elaboración propia.

A pesar de ya estar realizada la manipulación, aún quedan grupos de barras conectadas en un mismo nudo, sin embargo, no se les hará una manipulación a estos puntos porque únicamente son grupos de dos barras, y una manipulación Rot-Umbela con dos barras es muy complicado de lograr, volviendo a la malla mucho más compleja.

Los tensores de las capas inferior y superior, que aún no se tocaron, se reubicaron en los nuevos nudos girados de los compresores, modificando así su configuración inicial; todo esto se hace con criterio para lograr que haya reacciones en todos los sentidos y se obtenga el equilibrio de fuerzas; también se agregaron tensores diagonales en medio de las capas. El resultado final se aprecia en la figura 71 y en la figura 72.

Figura 71

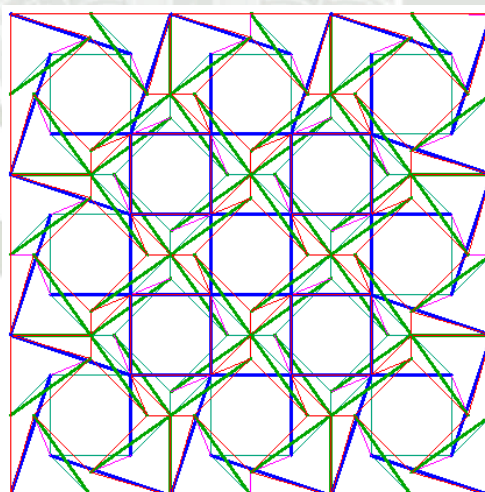
Vista Isométrica del resultado final de la malla tensegrítica con separadores V44.



Nota. Resultado final de toda la manipulación de la malla tensegrítica con separadores V44, mediante el programa AutoCad, en una vista isométrica. Elaboración propia.

Figura 72

Vista en planta del resultado final de la malla tensegrítica con separadores V44.



Nota. Resultado final de toda la manipulación de la malla tensegrítica con separadores V44, mediante el programa AutoCad, en una vista en planta. Elaboración propia.

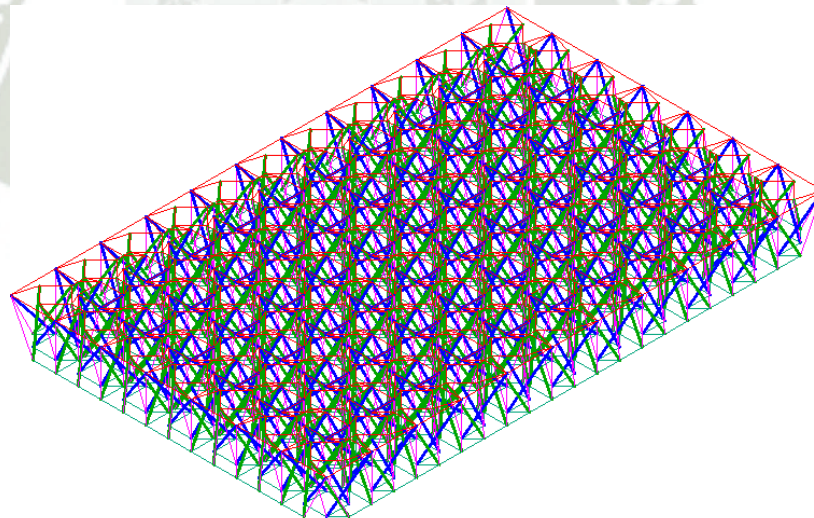
Por desgracia, la manipulación de esta malla en específico es un poco compleja y con muchos elementos; se optó por distintas ideas pero la mejor opción y la más simple

geométricamente es a la que se llegó; esta malla presenta varias parejas de barras juntas entre sí por un mismo punto, sin embargo, solo por esta ocasión se permitirán, con el fin de mostrar en este trabajo cómo es que reaccionan también mallas de este tipo de tensegridad, y cómo son comparadas con mallas que tienen una tensegridad pura; en caso esta malla sea la mejor de todas, no se considerará para la comparación final ya que no muestra a la tensegridad en su máxima expresión. Todas las demás mallas manipuladas en esta investigación tratarán de tener en lo posible una tensegridad pura.

Para esta MDC entonces, solo se obtuvo como resultado una única malla, la cual se muestra en la figura 73.

Figura 73

Vista Isométrica de la totalidad de la malla tensegrítica final con separadores V44.



Nota. Resultado final de la malla tensegrítica total con separadores V44, mediante el programa AutoCad, en una vista isométrica, a gran escala. Elaboración propia.

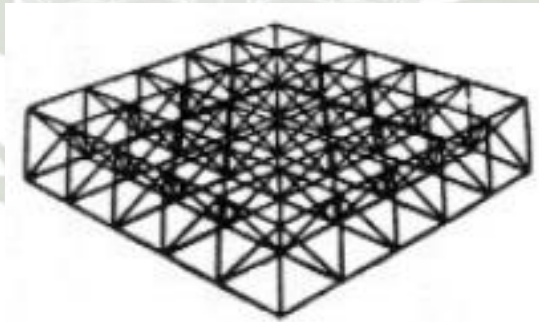
7.3.3. *Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla bidireccional cuadrada compensada”*

La tercera MDC utilizada en el presente trabajo se trata de una malla espacial plana, la cual se extrajo del trabajo de un alumno de la Universidad Politécnica de Valencia, en este trabajo se muestran varias de estas estructuras metálicas de diferentes formas y con diferentes conexiones; existen dos tipos de estas estructuras metálicas: las mallas bidireccionales cuadradas compensadas y las mallas bidireccionales cuadradas diferenciales. En este apartado primero se manipulará tensegríticamente la malla cuadrada compensada y en el siguiente la malla cuadrada diferencial.

La malla inicial que se tiene de la bibliografía (malla cuadrada compensada) es la mostrada en la figura 74.

Figura 74

MDC Malla Bidireccional cuadrada compensada 1.

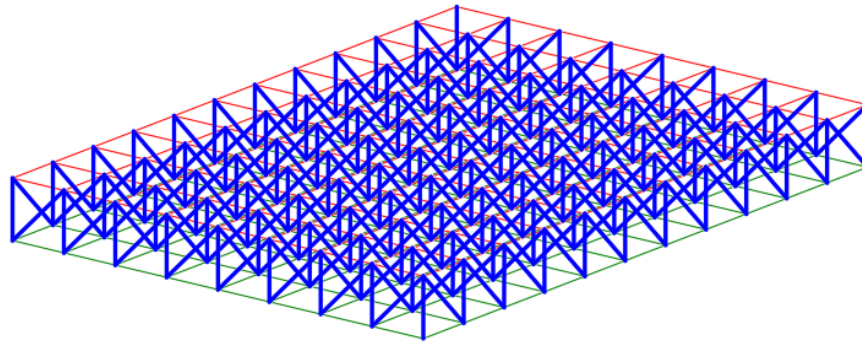


Nota. Adaptada de *Mallas Espaciales* (p. 5), por Luisa Basset Salom, s.f., Universidad Politécnica de Valencia.

Luego de replicarla en el programa AutoCAD, se puede apreciar su composición en la figura 75.

Figura 75

Malla Bidireccional cuadrada compensada replicada manualmente.

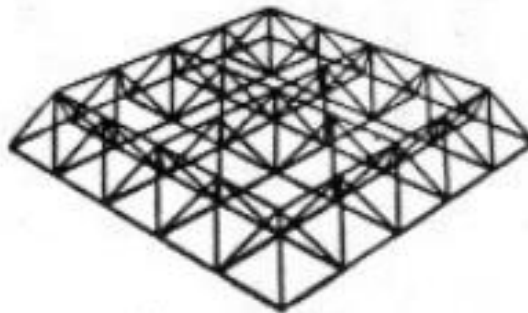


Nota. Malla Bidireccional cuadrada compensada replicada y modelada en el programa AutoCad. Elaboración propia.

De igual forma que este tipo de estructura, existe una muy similar en la misma bibliografía, la cual tiene algunos nudos eliminados de la capa superior, haciendo que la malla sea más simple que la anterior (figura 76).

Figura 76

MDC Malla Bidireccional cuadrada compensada 2.



Nota. Adaptada de *Mallas Espaciales* (p. 5), por Luisa Basset Salom, s.f., Universidad Politécnica de Valencia.

Esta malla no se replicará ni analizará para la presente investigación porque presenta nudos donde únicamente llegan dos barras diagonales, y al momento de hacer la manipulación Rot-Umbela surgen muchas complicaciones por saber cuál será el giro de

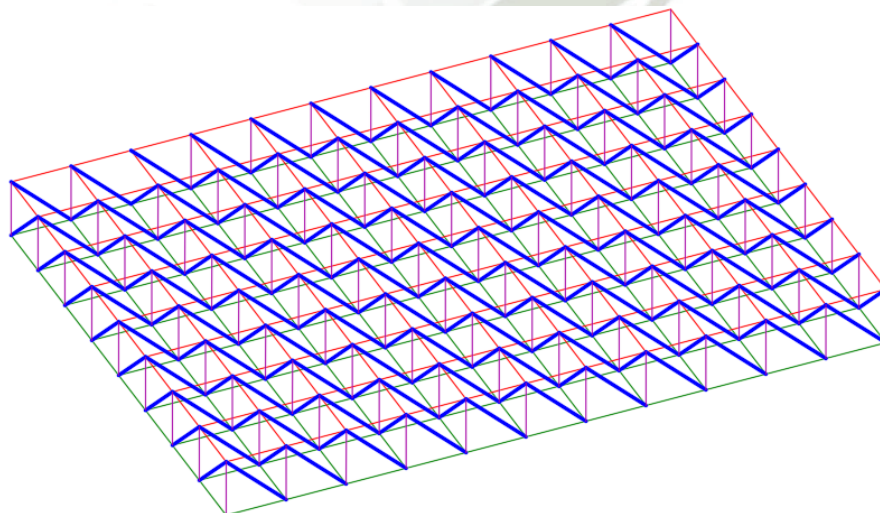
dichos nudos y cómo será su configuración final, tanto de las barras como de los tensores. Únicamente se analizará la primera de estas dos mallas compensadas citadas.

Con la primera malla ya replicada (figura 75), se empezará por escoger que elementos serán tensores y que otros serán compresores, ya que a diferencia de las dos primeras mallas que se hicieron en esta sección (Space Deck y Separadores V44), esta está hecha del mismo elemento, no está diferenciada como las anteriores, las cuales tenían la ventaja de saber que elementos conformaban cada capa, facilitando así la manipulación Rot-Umbela. Es por esta razón que para esta malla compensada y para las siguientes que se manipulen (diferencial y triangulada), el primer paso será identificar que elementos trabajaran a tracción y que otros trabajarán a compresión.

Luego de la elección de los elementos de la estructura, se obtiene como resultado a la malla visualizada en la figura 77.

Figura 77

Malla Bidireccional cuadrada compensada tras la selección de cada elemento.



Nota. Esta configuración de MDC se da tras la determinación de qué elementos serán compresores y que otros tensores, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

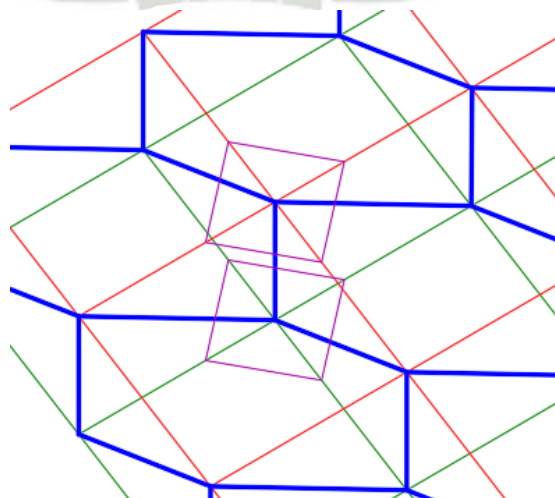
En la figura 77 se pueden apreciar 4 colores diferentes, los elementos de color rojo, verde y morado son tensores, y los elementos de color azul son compresores, mostrando así una capa superior e inferior compuestas por tensores, mientras que la capa intermedia está compuesta por ambos.

A pesar de ser esta la opción más óptima para los compresores y tensores en la capa intermedia, aparecen nudos con solo dos barras, y como se mencionó antes, hacer una manipulación Rot-Umbela en un nudo donde llegan únicamente dos compresores es muy complicado, por esta razón los tensores verticales de la capa intermedia, escogidos previamente, se reemplazarán por compresores, para que al momento de hacer el giro en los nudos, sean 3 barras las que estén conectadas y no solo 2, facilitando así este proceso.

Para la manipulación Rot-Umbela con estas 3 barras, se colocará nuevamente un cuadrado girado 45° tanto en la capa superior como inferior, justo alrededor de cada nudo, como se muestra en la figura 78, tal cual se viene haciendo en toda esta tesis.

Figura 78

Inserción de cuadrados en la Capa Superior e Inferior para la manipulación R-U (Malla bidireccional cuadrada compensada).

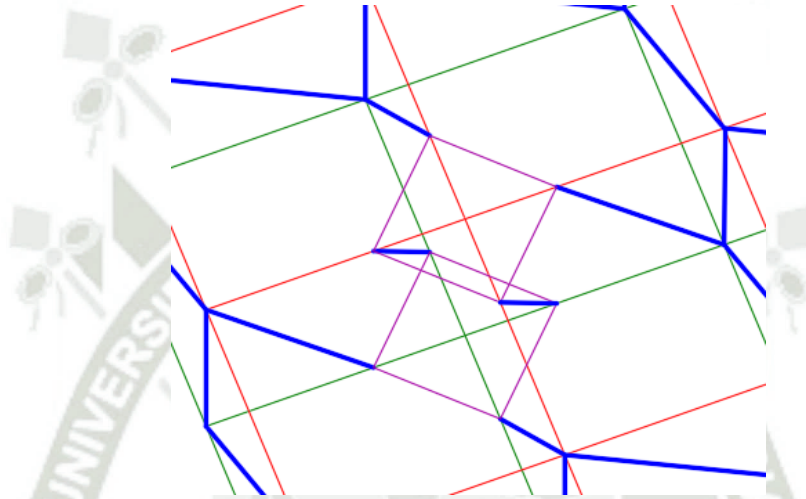


Nota. Vista isométrica de la inserción de los cuadrados para cortar y abrir los tensores y los nudos en la MDC, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

El siguiente paso es cortar las barras y reubicarlas en uno de los vértices del cuadrado, donde deberían llegar (visto desde una vista en planta), como en la figura 79.

Figura 79

Recorte de barras y Reubicación de vértices de la Malla bidireccional cuadrada compensada.



Nota. Vista isométrica de la reubicación de los vértices y de la reubicación de las barras en estos nuevos puntos de la malla, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

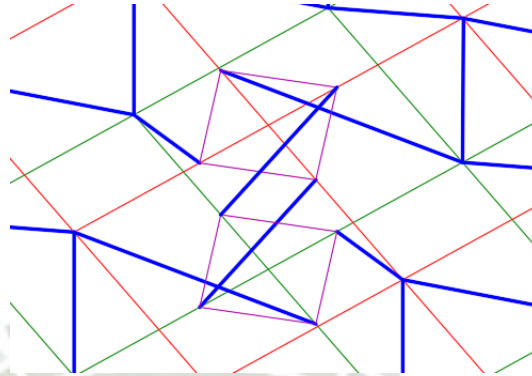
Como se puede ver en la figura 79, la barra que era vertical se duplicó, y se colocó cada una en los nudos restantes donde no había barras.

Posteriormente lo que se hace es girar 90° ambos cuadrados en sentido antihorario, y reubicar nuevamente las barras en el punto donde corresponden, como se muestra gráficamente en la figura 80.

Figura 80

Giro de 90° de cuadrados insertados en capas superior e inferior de la Malla

Bidireccional cuadrada compensada.

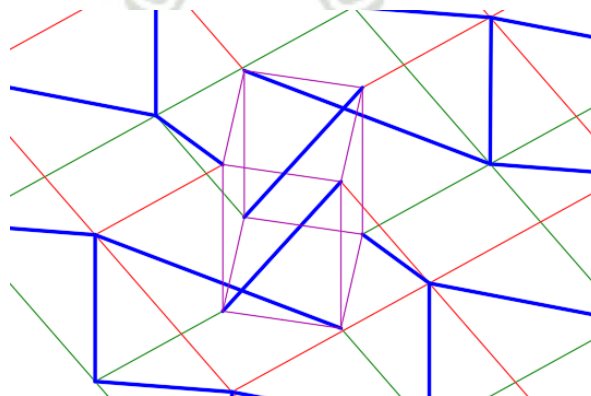


Nota. Vista isométrica de la reubicación de las barras en los puntos movidos, tras los giros de 90° de los cuadrados, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Finalmente, esto se hace en cada uno de los nudos de la malla y se termina con la colocación de tensores diagonales en el medio de las capas, para lograr el equilibrio de fuerzas en el eje “z”; esta colocación se hace con criterio, y al igual que los giros, se hace en cada uno de los nudos. Para este caso, los tensores diagonales de la capa intermedia serán verticales (color morado), al ser la mejor opción geoméricamente (figura 81).

Figura 81

Colocación de nuevos tensores verticales en la capa intermedia.



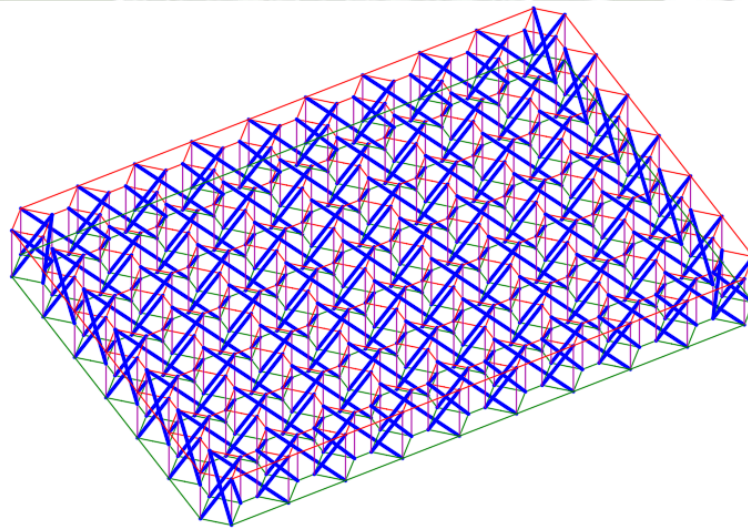
Nota. Vista isométrica de la inserción de nuevos tensores verticales en los puntos donde no hay tensores (capa intermedia), mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Cabe resaltar que, en algunas mallas, los bordes perimetrales de las capas superior e inferior presentan un inconveniente, únicamente llegan 2 barras a un mismo punto y no se logra equilibrar las fuerzas; por esta razón en dichos nudos se añaden más tensores, cambiando también el patrón geométrico de los compresores. Específicamente en el caso de esta malla compensada, los bordes de las capas superior e inferior son extremadamente complicados de modificar, por lo que se optó por la opción de quitar dichos bordes, reduciendo el área de las mallas y agregando unos cuantos tensores y compresores más en los bordes.

Con todas estas modificaciones y consideraciones en todos los nudos, el resultado final es el que se muestra en la figura 82.

Figura 82

Vista Isométrica del resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Bidireccional cuadrada compensada.



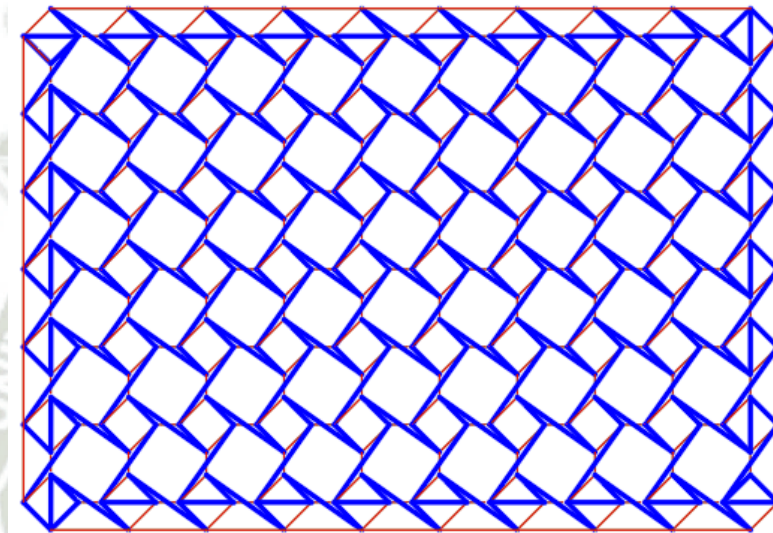
Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica global basada en la Malla Bidireccional cuadrada compensada, desde una vista isométrica, mediante el programa AutoCad.

Elaboración propia.

Observado desde una vista en planta, el resultado final de esta malla tensegrítica es visualmente muy simétrico, como se mencionó antes; esta simetría se puede apreciar en la figura 83.

Figura 83

Vista en planta del resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Bidireccional cuadrada compensada.



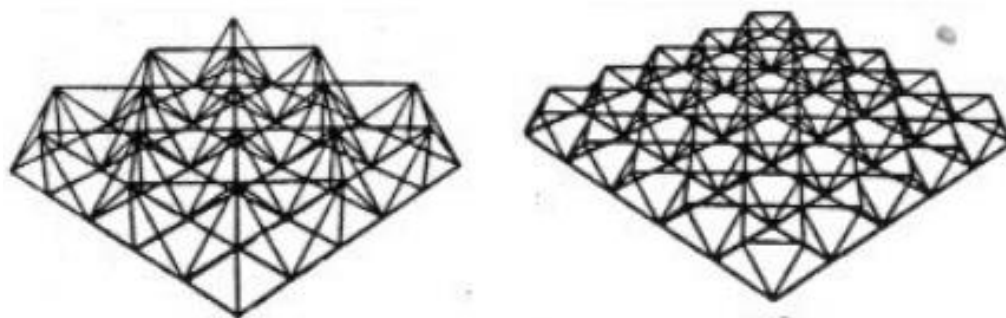
Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica global basada en la Malla Bidireccional cuadrada compensada, desde una vista en planta, mediante el programa AutoCad. Aquí se puede apreciar lo simétricas que son estas estructuras a pesar de tener muchos elementos. Elaboración propia.

7.3.4. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla bidireccional cuadrada diferencial”

Para esta cuarta MDC, se hará el mismo procedimiento como el que se hizo con la malla bidireccional cuadrada compensada; según la bibliografía existen dos tipos de esta malla (figura 84), variando la geometría de la capa superior y de la inferior.

Figura 84

MDC Mallas Bidireccionales cuadradas diferenciales.

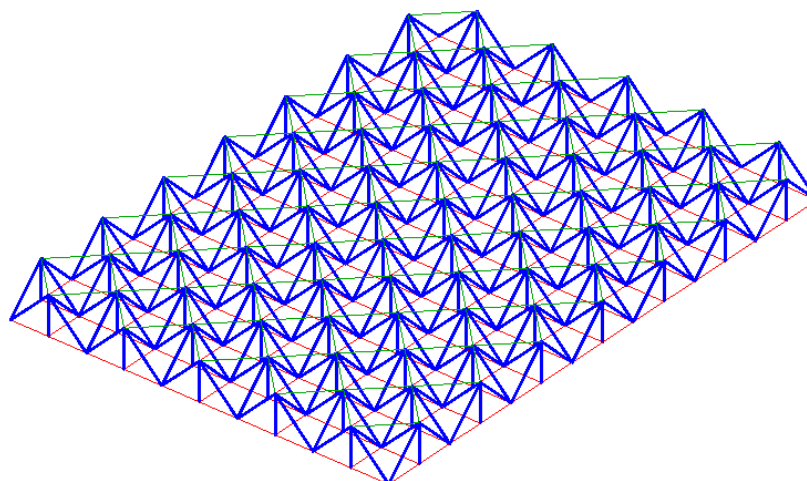


Nota. Adaptada de *Mallas Espaciales* (p. 5), por Luisa Basset Salom, s.f., Universidad Politécnica de Valencia.

La imagen de la izquierda de la figura 84 como su documento lo dice, es una malla con una capa cuadrada diagonal sobre una capa cuadrada pequeña, y replicándola en AutoCAD se obtiene la estructura de la figura 85.

Figura 85

Malla Bidireccional cuadrada Diferencial 1 replicada manualmente.

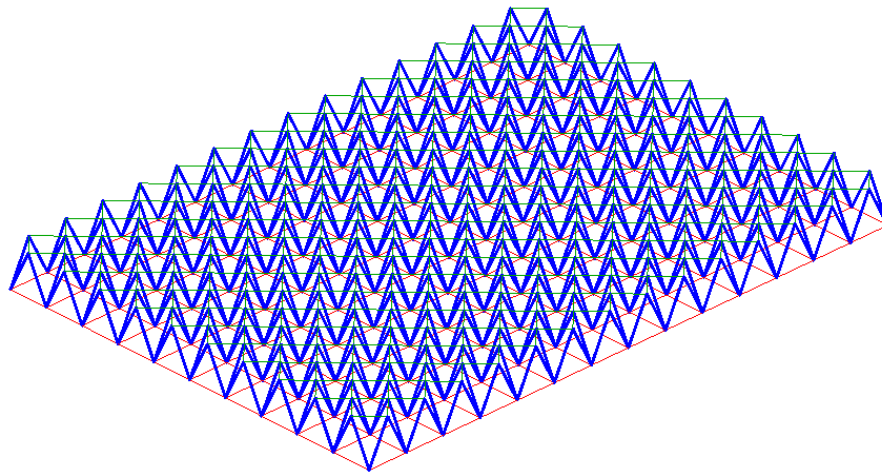


Nota. Primera Malla Bidireccional cuadrada compensada diferencial replicada y modelada en el programa AutoCad. Elaboración propia.

Por otro lado, la imagen de la derecha en la figura 84, según su documento, se trata de una malla cuadrada diagonal sobre una malla cuadrada grande (los cuadrados formados en la capa superior son más pequeños que los cuadrados de la capa inferior), y esta se puede ver reflejada en la figura 86, replicada en AutoCAD.

Figura 86

Malla Bidireccional cuadrada Diferencial 2 replicada manualmente.

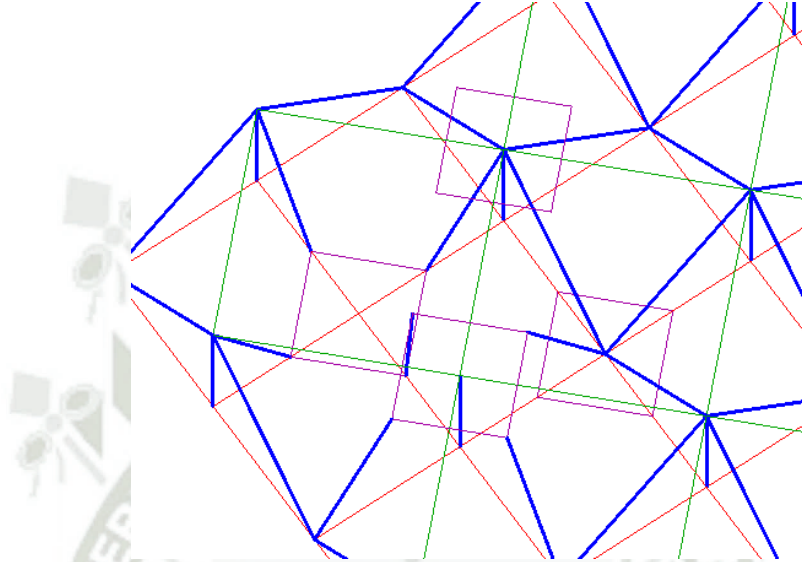


Nota. Segunda Malla Bidireccional cuadrada diferencial replicada y modelada en el programa AutoCad. Elaboración propia.

Una vez obtenidas ambas mallas replicadas, se empezará por tensegrizar la primera (con ambas capas con cuadrados del mismo tamaño), la cual tiene una capa con cuadrados diagonales y la otra con horizontales; se inició con el procedimiento habitual, empezando con la selección de elementos en compresores y tensores, luego se colocó un cuadrado en cada nudo de las capas superior e inferior y se le dio un giro de 45° en sentido horario (figura 87).

Figura 87

Colocación de cuadrados y giro de 45°, con la reubicación respectiva de barras y cables, en la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 1.

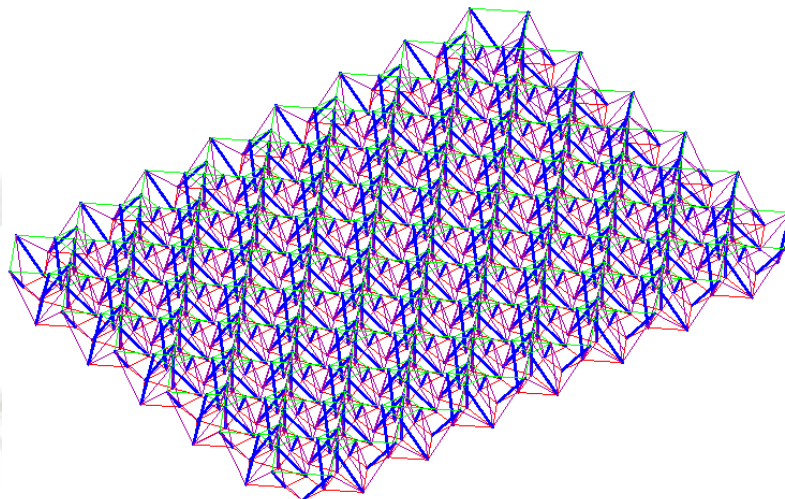


Nota. Primera Malla Bidireccional cuadrada diferenciada, tras la implementación de cuadrados en los nudos, y tras un giro de 45°, reubicando en los nuevos puntos los cables y las barras correspondientes; mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

El giro se hizo para todos los vértices y se colocaron después los tensores diagonales en la capa intermedia, asegurando el equilibrio en cada nudo; finalmente se obtiene como resultado a la malla tensegrítica de la figura 88 y 89.

Figura 88

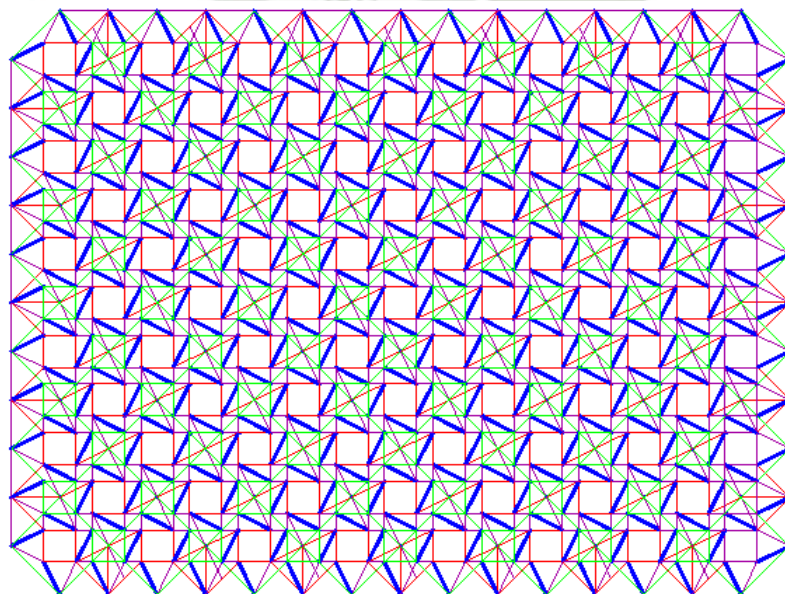
Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 1 (vista isométrica).



Nota. Forma final, tras la implementación de cuadrados, giros de 45° y colocación de tensores en la capa intermedia, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Figura 89

Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 1 (vista en planta).

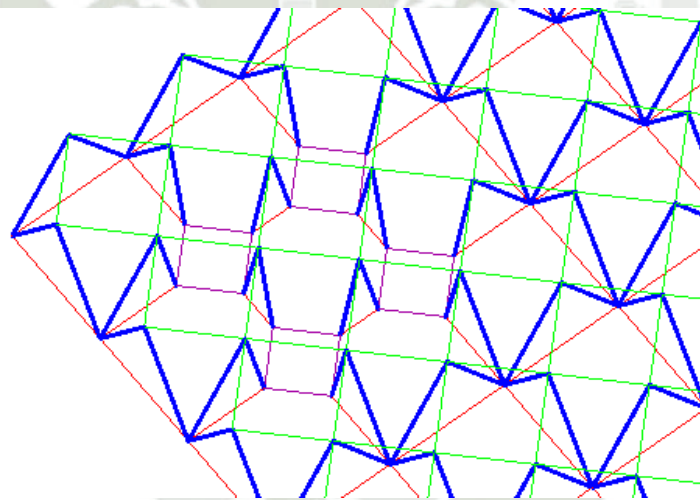


Nota. Forma final, tras la implementación de cuadrados, giros de 45° y colocación de tensores en la capa intermedia, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Para la segunda malla (la de la imagen derecha en la figura 84), que presenta cuadrados diagonales más pequeños en la capa superior en comparación con los cuadrados de la capa inferior, se comienza de la misma manera, definiendo bien los elementos compresores y tensores y posteriormente colocando un cuadrado en cada nudo, para posteriormente darles el giro de 45° como en la primera malla.

Figura 90

Colocación de cuadrados y giro de 45° , con la reubicación respectiva de barras y cables, en la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 2.



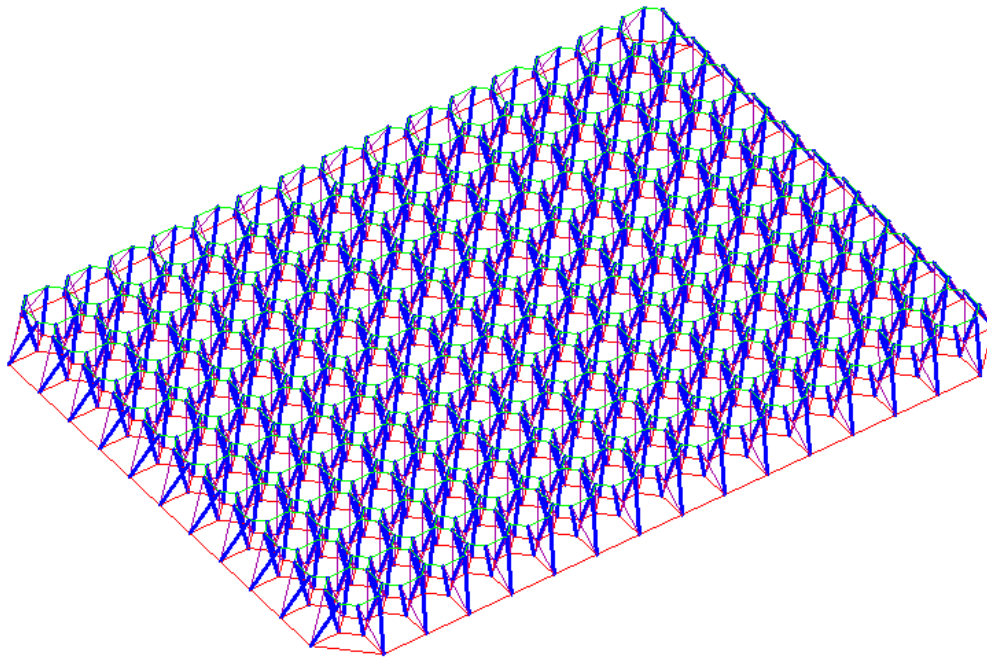
Nota. Segunda Malla Bidireccional cuadrada diferencial, tras la implementación de cuadrados en los nudos, y tras un giro de 45° , reubicando en los nuevos puntos los cables y las barras correspondientes; mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Cabe resaltar, que en este caso existen muchos puntos donde concurren únicamente 2 barras compresoras, tal cual se puede observar en la figura 90 (compresores de color azul); y como ya se sabe, hacer la manipulación Rot-Umbela es complicado, sin embargo, para esta malla se optará por separar ambas barras cierta distancia, de manera que estén separadas perpendicularmente a la dirección que apuntan en un plano x-y; haciendo esto en toda la malla y en todos los puntos, y colocando los elementos tensores respectivos en cada nudo

(buscando el equilibrio de fuerzas), se llega a la malla tensegrítica mostrada en la figura 91 y 92.

Figura 91

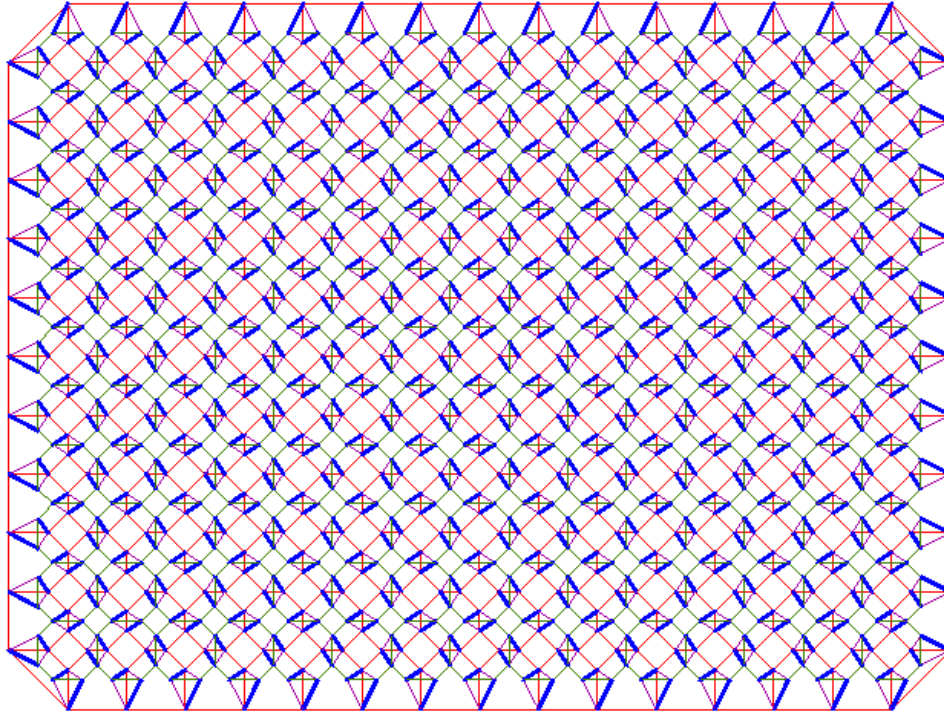
Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 2 (vista isométrica).



Nota. Forma final, tras la implementación de cuadrados, giros de 45° y colocación de tensores en la capa intermedia, mediante el programa AutoCad. Malla tensegrítica especial con manipulación R-U de únicamente 2 barras. Elaboración propia.

Figura 92

Configuración final de la malla tensegrítica bidireccional cuadrada diferenciada 2 (vista en planta).



Nota. Forma final, tras la implementación de cuadrados, giros de 45° y colocación de tensores en la capa intermedia, mediante el programa AutoCad. Malla tensegrítica especial con manipulación R-U de únicamente 2 barras. Elaboración propia.

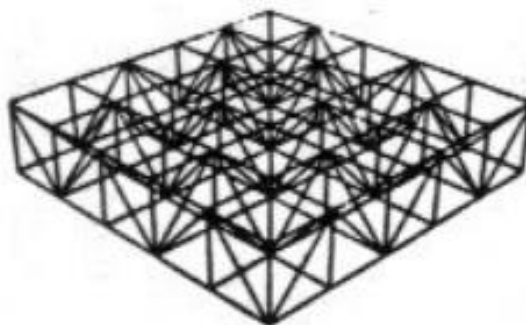
Como dato interesante, se puede observar que las mallas resultantes en este apartado tienen los bordes perimetrales diferentes en cuanto al patrón geométrico que siguen los elementos de la parte interna de la malla; en la sección anterior hubo una malla en la que se eliminaron estos bordes, y se logró visualmente una malla más simétrica.

7.3.5. Formación de Mallas tensegríticas desde una “Malla directa o triangulada”

Como quinta y última malla está la “malla directa o triangulada”, la cual viene de la misma fuente de información de donde se extraen las mallas anteriores. La forma que presenta esta malla se observa en la figura 93.

Figura 93

MDC Malla Directa o triangulada 1.

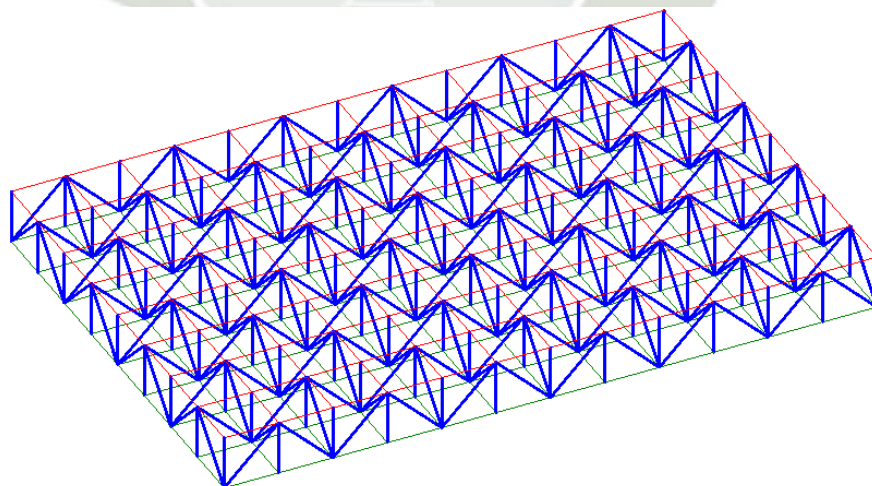


Nota. Adaptada de *Mallas Espaciales* (p. 4), por Luisa Basset Salom, s.f., Universidad Politécnica de Valencia.

Replicada y acondicionada al área dada en el programa de AutoCAD, la malla expuesta en la figura 93 se puede ver ahora como en la figura 94.

Figura 94

Malla Directa o Triangulada 1 replicada manualmente.



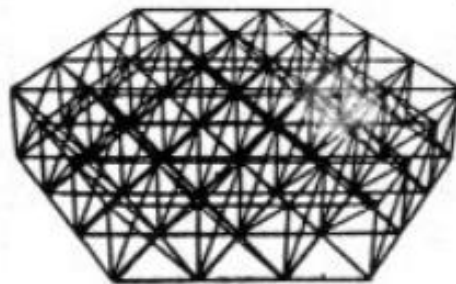
Nota. Primera Malla Directa o Triangulada replicada y modelada en el programa AutoCad.

Elaboración propia.

La figura 95 muestra una variación de esta última malla, donde la configuración de las capas paralelas (superior e inferior) es triangular y no cuadrada como la anterior, sin embargo, sigue el mismo patrón en los elementos.

Figura 95

MDC Malla Directa o triangulada 2.

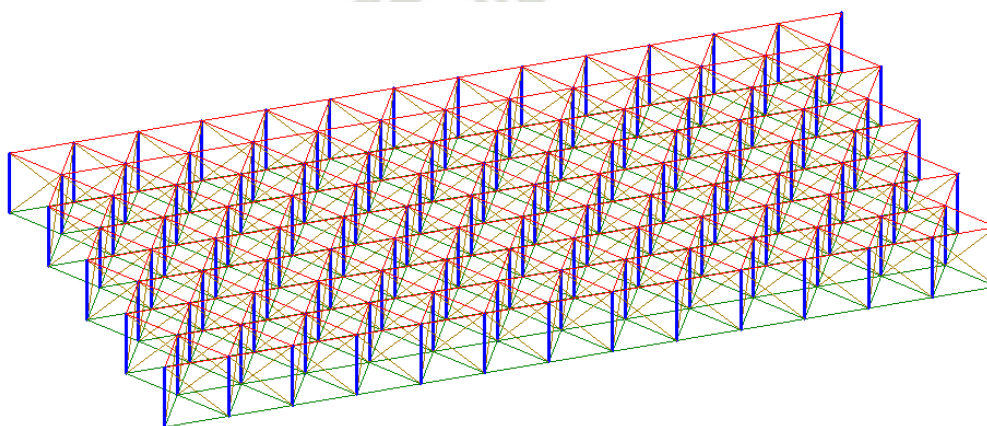


Nota. Adaptada de *Mallas Espaciales* (p. 4), por Luisa Basset Salom, s.f., Universidad Politécnica de Valencia.

La estructura de la figura 96 es la réplica de esta malla en AutoCAD, y a pesar de que la malla original sea hexagonal, la malla modelada manualmente adopta una forma rectangular porque es la que se necesita para poder usarla en la investigación.

Figura 96

Malla Directa o Triangulada 2 replicada manualmente.



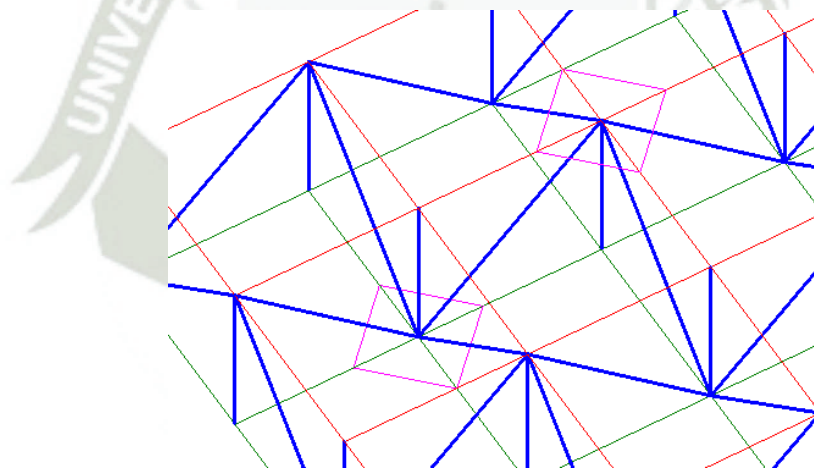
Nota. Segunda Malla Directa o Triangulada replicada y modelada en el programa AutoCad. Elaboración propia.

Los distintos colores que aparecen en cada uno de los elementos son los mismos que se usan durante todo el trabajo.

El paso a seguir para estas mallas es realizar la manipulación Rot-Umbela, (procedimiento realizado durante todo este capítulo); primero se trabajará con la estructura inicial de este apartado (figura 94), que tiene una configuración cuadrada en las mallas paralelas; para esta manipulación se colocaron cuadrados girados 45° alrededor de los nudos existentes, como se aprecia en la figura 97.

Figura 97

Inserción de cuadrados girados 45° , en los nudos de la malla tensegrítica directa o triangulada 1

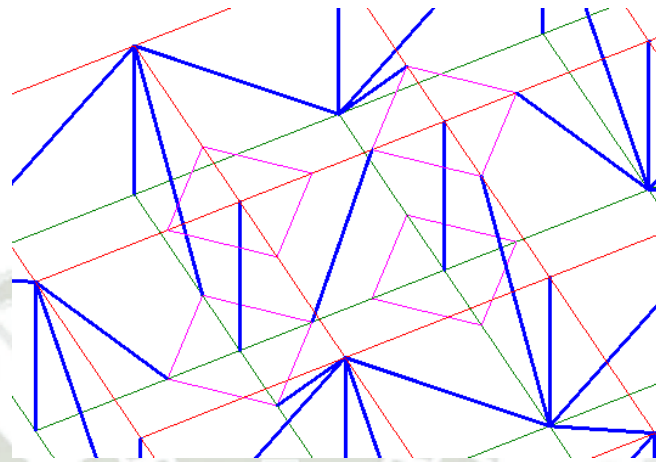


Nota. Primera Malla Directa o Triangulada, tras la implementación de cuadrados en los nudos, girados todos 45° ; mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Luego de la colocación de los cuadrados girados en cada nudo, se conectan las barras en aquellos puntos del cuadrado donde interceptarían aparentemente si se viera en una vista en planta (figura 98).

Figura 98

Recorte de barras y Reubicación de vértices de la Malla Directa o Triangulada 1.

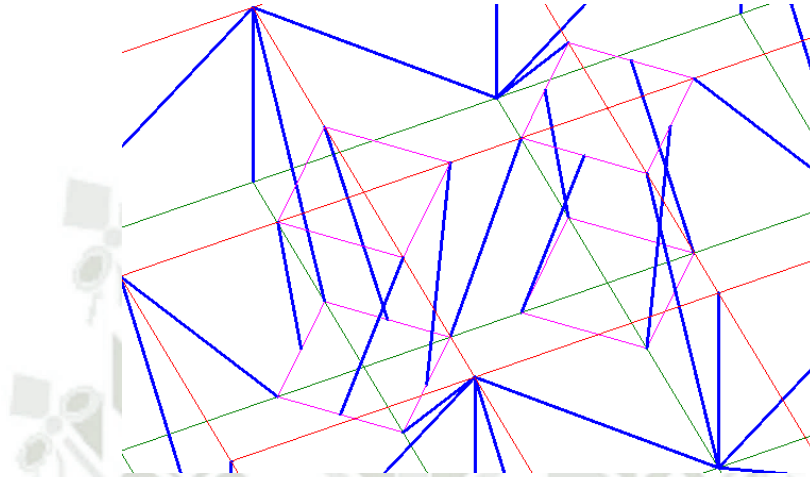


Nota. Vista isométrica de la reubicación de los vértices y de la reubicación de las barras en nuevos puntos de la malla, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 98, hay cuadrados que tienen vértices sin conectarse a compresores, lo que los hace nudos inservibles para la tensegridad, por esta razón se añadirán compresores al sistema conectándolos en aquellos nudos; al hacer esto, los nuevos compresores añadidos generan a su vez nudos con solo dos tensores, los cuales deberán ser equilibrados con más tensores posteriormente (figura 99).

Figura 99

Adición de nuevos compresores en Malla Directa o Triangulada 1, tras la implementación de cuadrados en los nudos.

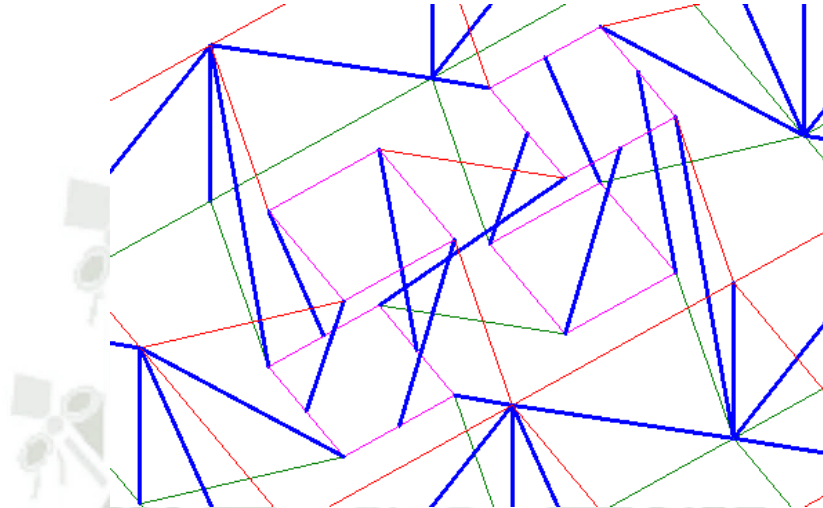


Nota. Vista isométrica de la colocación de nuevos compresores en la malla Directa o Triangulada 1 luego de la colocación de los cuadrados en los nudos; mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Siguiendo con el procedimiento habitual, se procede a girar 45° en sentido antihorario a los cuadrados formados previamente, y aquellos compresores que conectaban con esos nudos se reubicarán a sus nuevas posiciones; también es aquí donde se reubican los tensores y se eliminan algunos que no tienen funcionalidad (figura 100).

Figura 100

Giro de 45° de cuadrados en los nudos, con la reubicación de barras y cables, en la malla tensegrítica Directa o triangulada 1.

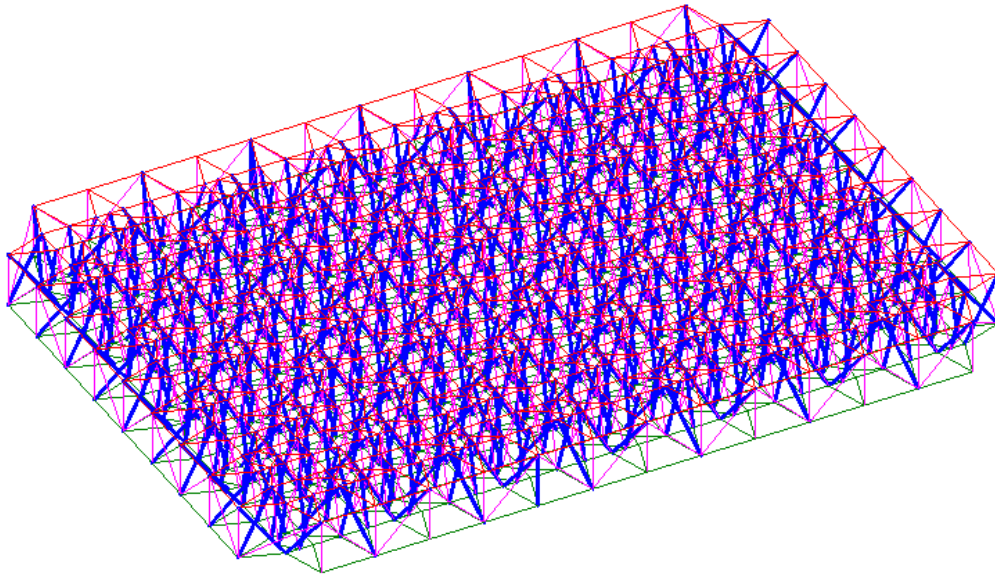


Nota. Vista isométrica de la reubicación de tensores y compresores en la malla Directa o Triangulada 1; mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Después se procede a revisar cada nudo existente para ver si tienen un adecuado equilibrio de fuerzas, y si no fuera así, se le añaden tensores para lograrlo; es indispensable que todo esto se haga siempre viendo y tratando de que los nuevos tensores sean simétricos en la malla y puedan seguir un patrón sin interponerse con los demás elementos de la cubierta. Cabe resaltar también que en este paso se procede a colocar los elementos tensores verticales o diagonales, que ven en la capa intermedia. El resultado final es el observado en la figura 101.

Figura 101

Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 (vista isométrica).

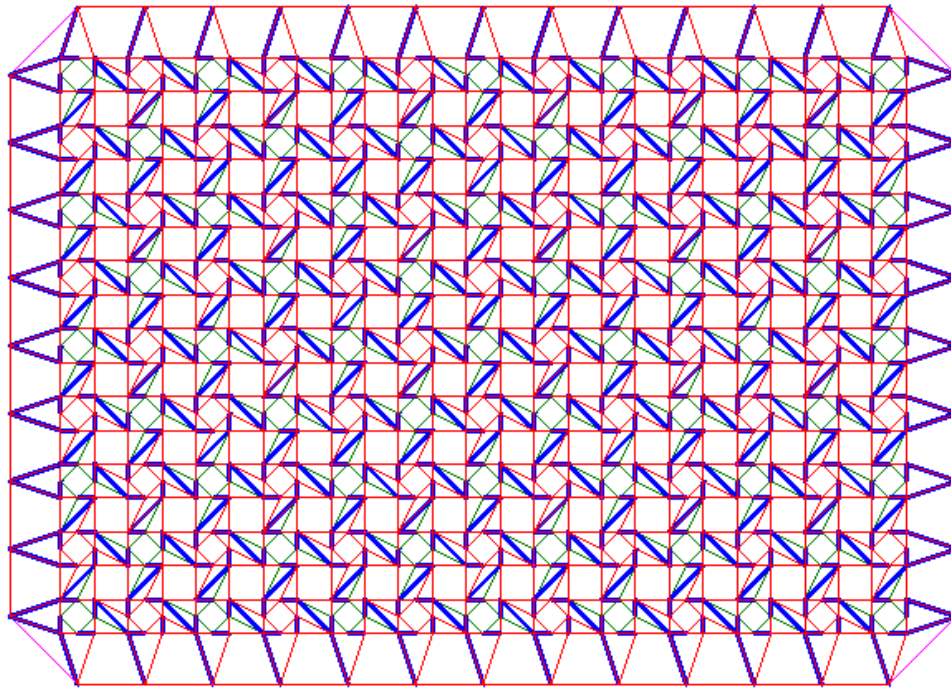


Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica global basada en la Malla Directa o Triangulada 1, desde una vista isométrica, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Esta malla resultante presenta muchos tensores en la capa intermedia, y en una vista isométrica se ve muy cargada de elementos y a la vez desordenada, sin embargo, es más ordenada y simétrica de lo que parece, como se puede ver en la figura 102 donde, se observa a la malla tensegrítica final en planta.

Figura 102

Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 (vista en planta).



Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica global basada en la Malla Directa o Triangulada 1, desde una vista isométrica, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

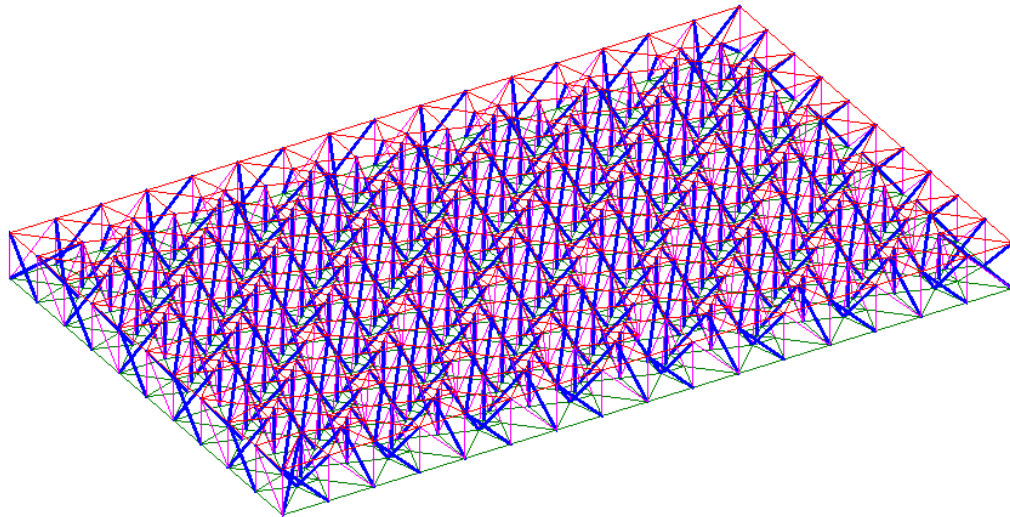
Se debe mencionar que en esta malla ocurre lo mismo que en muchas otras donde se da la manipulación Rot-Umbela, que, al querer equilibrar las fuerzas en los elementos de los bordes perimetrales, aparecen puntos con solo 2 barras conectadas; sin embargo, al no haber más soluciones, se analizará esta malla final únicamente para ver sus resultados estructurales y sacar conclusiones. Todas las mallas que tienen este problema en caso sean mejores que las mallas tensegríticas puras, no se considerarán para la comparación final.

Como sucedió con mallas anteriores que no solo adquirieron una única configuración, a esta malla directa o triangulada se le hicieron dos geometrías diferentes,

debido a que la primera estaba muy cargada de elementos; esta segunda configuración adicional es más limpia y se aprecia en a la figura 103.

Figura 103

Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 modificada (vista isométrica).

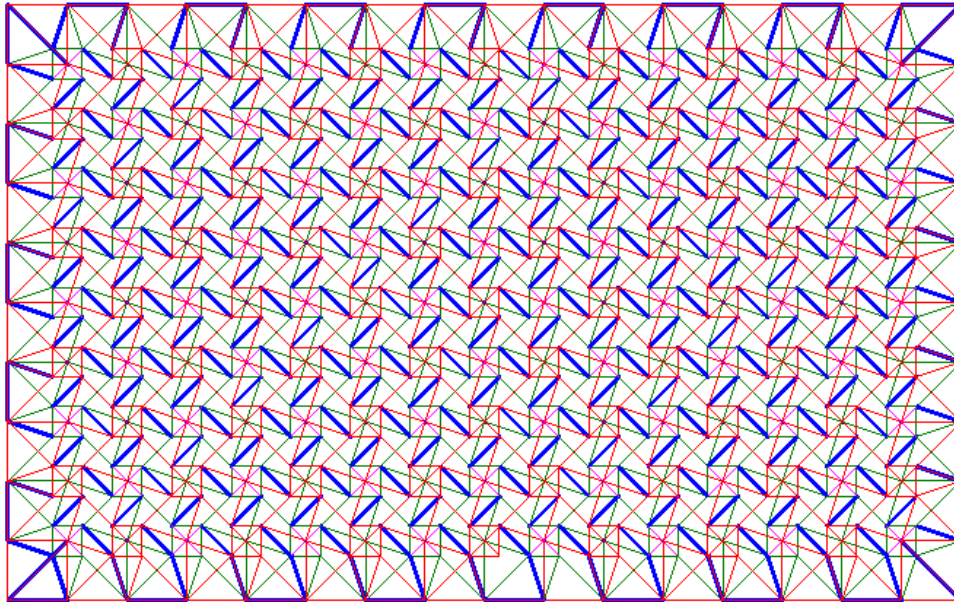


Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica global basada en la Malla Directa o Triangulada 1 pero modificada, desde una vista isométrica, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Al ser prácticamente una malla distinta a la anterior por toda la nueva configuración que tomó, se considerara como una nueva malla; desde una vista en planta se puede observar mejor su simetría (figura 104).

Figura 104

Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 1 modificada (vista en planta).



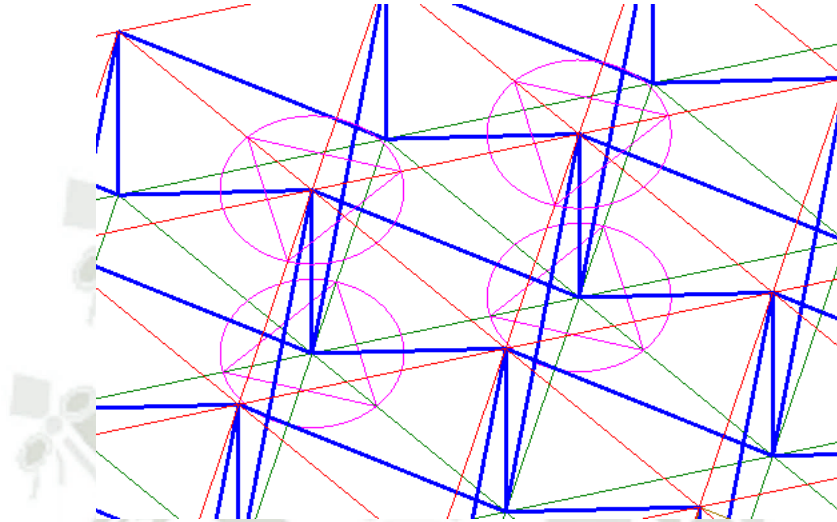
Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica global basada en la Malla Directa o Triangulada 1 pero modificada, desde una vista isométrica, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Lamentablemente ambas mallas presentan en los bordes, parejas de compresores unidos en un mismo punto, pero por esta ocasión se les analizarán con este inconveniente.

Terminando con este apartado, ahora se procede a manipular la segunda malla del apartado (figura 95) y a la vez última malla de este capítulo, la malla que en un inicio tenía forma de hexágono y las figuras geométricas que predominaban en las capas superior e inferior eran triángulos; así pues, siguiendo el procedimiento habitual, se establece bien que elementos serán tensores y que otros compresores, en este caso se tomó la decisión de considerar a todos los elementos de la capa intermedia como compresores, mientras que los tensores se ubicarán posteriormente.

Figura 105

Inserción de triángulos en los nudos para Manipulación R-U, en Malla Directa o Triangulada 2



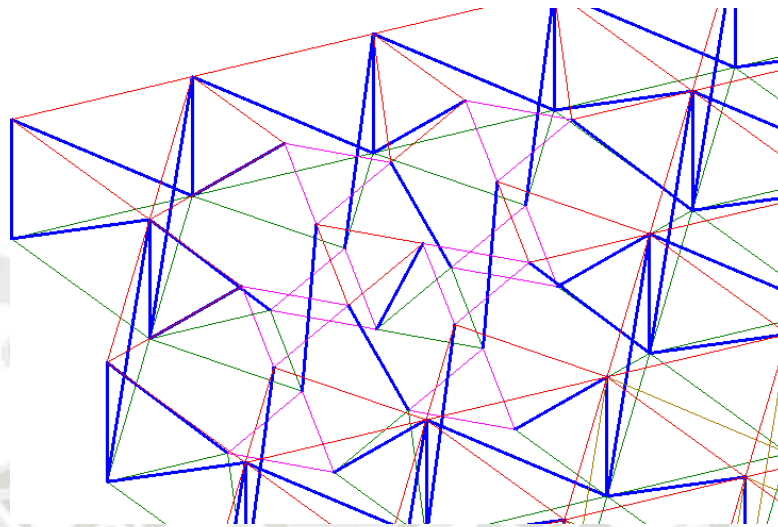
Nota. Segunda Malla Directa o Triangulada, tras la implementación de triángulos en sus nudos; mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Como se puede ver en la figura 105, las figuras geométricas escogidas para esta malla son triángulos (debido a que a cada punto llegan 3 barras), las cuales surgieron tras la intersección con círculos de diámetros iguales a $1/3$ de la longitud que hay entre dos nudos.

Los elementos diagonales de la capa intermedia se abren del nudo de unión inicial y se reubican en el nuevo nudo donde caerían en el triángulo generado previamente, tal cual se muestra en la figura 106.

Figura 106

Reubicación de barras y cables, en la malla tensegrítica Directa o triangulada 2.



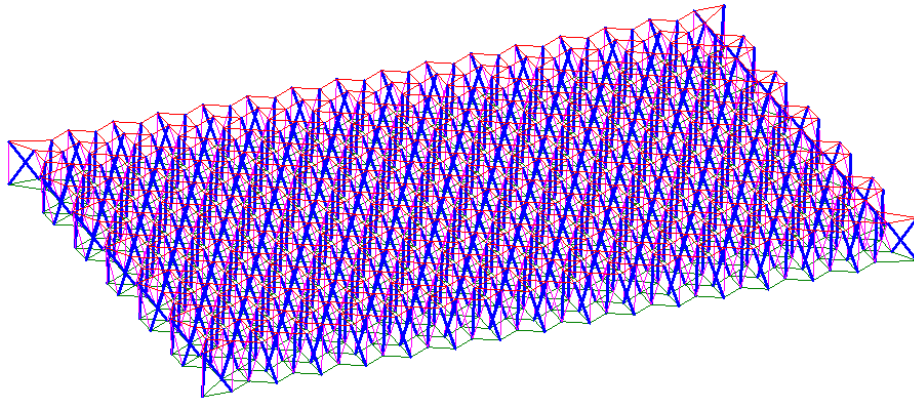
Nota. Vista isométrica de la reubicación de tensores y compresores en la malla Directa o Triangulada 2; mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

En esta ocasión, esta malla tensegrítica no tendrá un giro en sus figuras geométricas generadas (triángulos), ya que la forma que toma sin hacer este paso es muy simétrica y sencilla de entender, sin contar incluso con que los compresores ya están separados adecuadamente; además, es una forma de evaluar esta nueva modificación en la manipulación Rot-Umbela para sacar conclusiones en un futuro.

Finalizando con la manipulación, el paso de la figura 106 se replica en todos los nudos de la malla, luego se colocan los tensores diagonales en la capa intermedia, y después se arreglan y separan los tensores unidos en los bordes; logrando finalmente la malla expuesta en la figura 107.

Figura 107

Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 2 (vista isométrica).

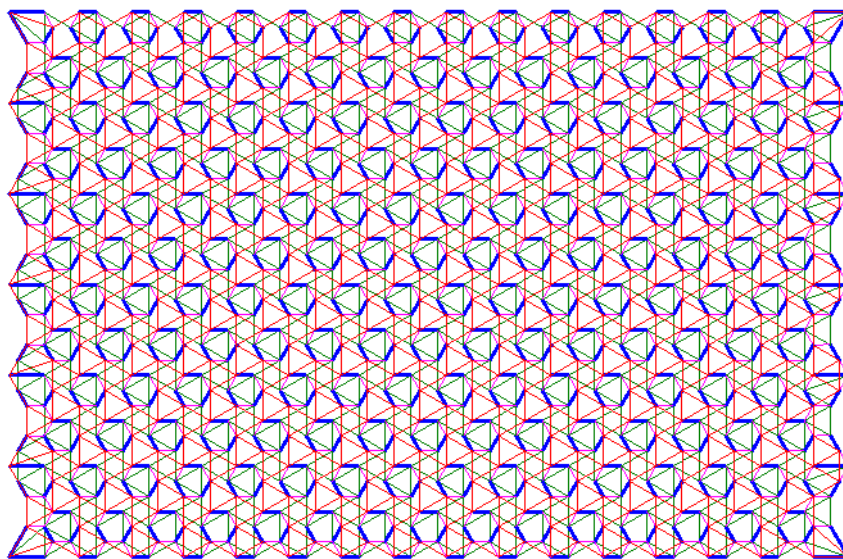


Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Directa o Triangulada 2, desde una vista isométrica, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Esta malla no presenta ninguna unión entre dos barras o compresores y a su vez es mucho más simple y geométrica que las demás mallas con este método; desde una vista en planta se puede observar la figura 108.

Figura 108

Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada 2 (vista en planta).

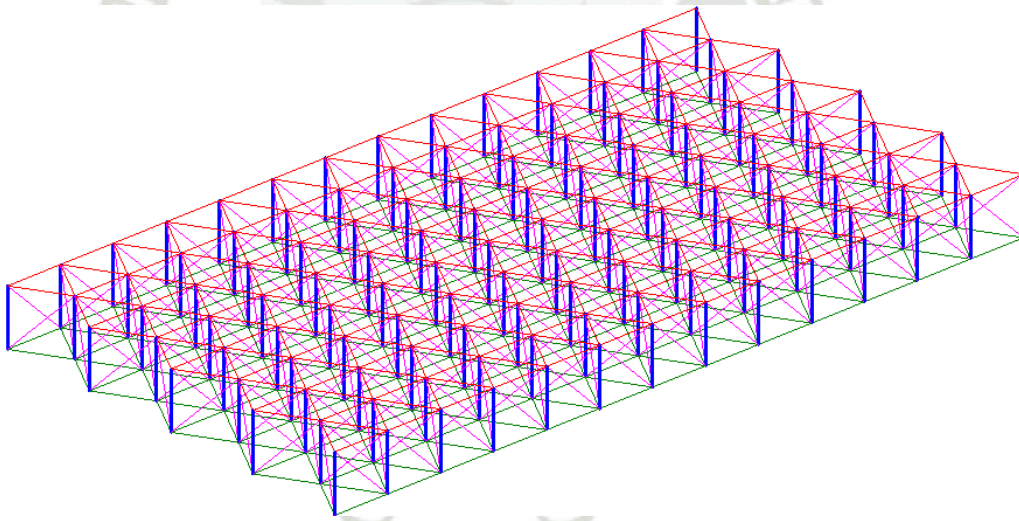


Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Directa o Triangulada 2, desde una vista en planta, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Este tipo de malla con formas geométricas triangulares en las capas superior e inferior, da una gran variedad de opciones para la tensegridad, como la de evitar los giros en la manipulación Rot-Umbela; también da la posibilidad de hacer una nueva malla seleccionando fácilmente a los elementos totalmente verticales como compresores y a los demás elementos diagonales como tensores (ambos de la capa intermedia) desde la configuración inicial de la figura 96, es por esta razón que se incluirá adicionalmente una malla más para la comparación; esta último descrito se muestra en las figuras 109 y 110, desde una vista isométrica y desde una vista en planta.

Figura 109

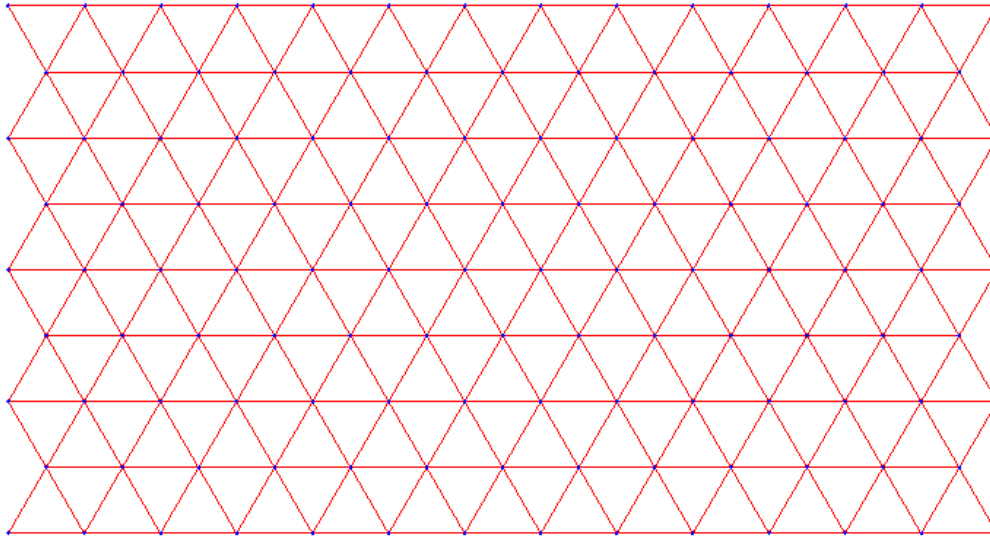
Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada, con una ubicación rápida de tensores y compresores (vista isométrica).



Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Directa o Triangulada, únicamente seleccionando elementos a compresión y tensión en la capa intermedia, desde una vista isométrica, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Figura 110

Configuración final de la malla tensegrítica Directa o Triangulada, con una ubicación rápida de tensores y compresores (vista en planta).



Nota. Resultado final de la Malla tensegrítica basada en la Malla Directa o Triangulada, únicamente seleccionando elementos a compresión y tensión en la capa intermedia, desde una vista en planta, mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

CAPÍTULO VIII

8. DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS POR ÁREA TRIBUTARIA EN MALLAS TENSEGRÍTICAS

Una vez obtenidas las formas de todas las mallas tensegríticas del presente trabajo, se procede a encontrar las fuerzas de viento necesarias que requerirá cada nudo de cada malla, con la finalidad de poder luego modelarlas y analizarlas bajo las mismas condiciones de carga de viento. Como se sabe, la norma peruana especifica cual es la velocidad de viento mínima que debe resistir una estructura de este tipo, en especial una que se ubique en la ciudad de Arequipa; en el capítulo 4 se detallaron todas las consideraciones que se tomarán respecto a la velocidad del viento, carga externa y respecto a la carga interna del viento.

La velocidad de viento según el mapa eólico de nuestro país, es de 85km/h, ubicándonos en la ciudad de Arequipa (lugar donde se aplica la investigación), por lo que con este dato y tomando un valor de $c=0.7$ (factor de forma considerado por la norma, dato detallado en el capítulo 4) se puede proceder a hallar la presión o succión exterior de la carga de viento (partiendo de la Ecuación 2):

$$P_h = 0.005 \times 0.7 \times (85)^2 \quad (16)$$

$$P_h = 25.2875 \text{ kgf/m}^2 \quad (17)$$

Al ser consideradas estas estructuras dentro del tipo 2 o 3, según la norma, se establece que este valor se debe multiplicar por 1.2 (amplificación del 20%).

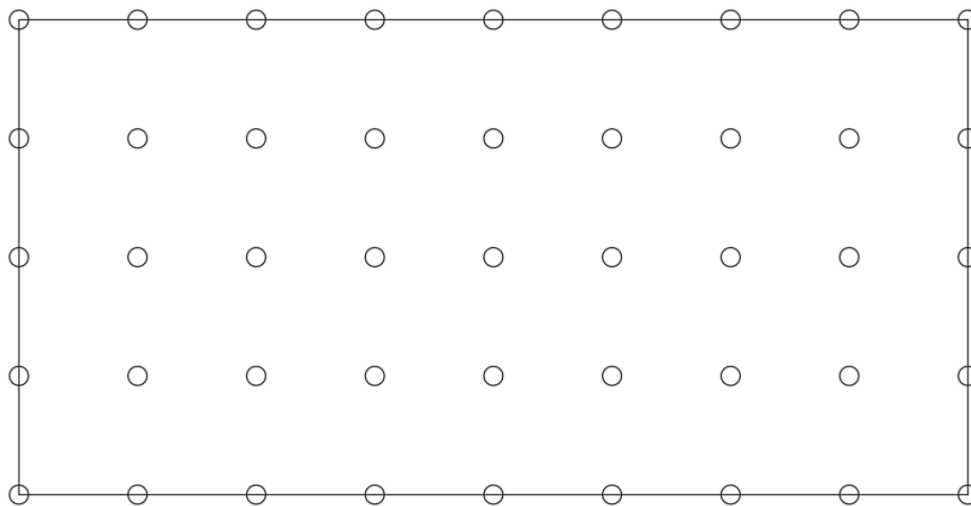
$$P_h = 25.2875 \text{ kgf/m}^2 \times 1.2 \quad (18)$$

$$P_h = 30.345 \text{ kgf/m}^2 \quad (19)$$

Este valor hallado es el que se considerará para cargar cada una de las mallas que se tienen hasta ahora; el procedimiento es sencillo, si una malla tensegrítica tiene “x” puntos en la capa superior, y cada uno de ellos está ubicado simétrica y ordenadamente con los demás, todos tendrán una misma área tributaria correspondiente a una división uniforme del área. Para hacerlo más entendible, se mostrará un ejemplo visual, empezando por la figura 111.

Figura 111

Capa superior con un área rectangular de 50 m², con 45 nudos distribuidos.

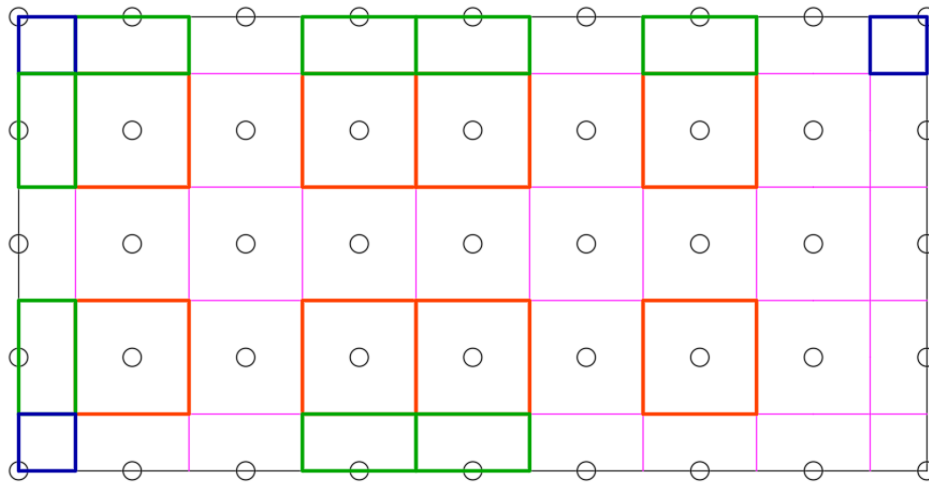


Nota. Ejemplo realizado mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Se tiene una malla de 50 m² (capa superior), de 10m de largo por 5m de ancho, tal cual se muestra en la figura 111; como se puede ver también, se tienen 45 puntos en dicha capa, los cuales van a recibir todas las cargas de viento mediante una adecuada distribución (figura 112).

Figura 112

Distribución de áreas tributarias por nudo de la capa superior de 50 m².



Nota. Ejemplo realizado mediante el programa AutoCad. Elaboración propia.

Las diferentes figuras geométricas de colores vienen a ser las distintas áreas tributarias que le corresponde a cada uno de los puntos dividiendo toda el área en partes iguales; si bien el área del cuadrado celeste no es el mismo que la del anaranjado, es el área que le correspondería tras la distribución por el método de área tributaria.

Como se sabe, la carga externa de viento que se considerará durante toda la investigación es de 30.345 kgf/m², por lo que, si consideramos los 50m² que tiene la capa superior de este ejemplo, tendríamos como carga de viento un total de:

$$F = 30.345 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \times 50 \text{ m}^2 \quad (20)$$

$$F = 1517.25 \text{ kgf} \quad (21)$$

Esta fuerza es la fuerza total que cargará en este caso esta malla tensegrítica de 50m², sin embargo, es un valor muy general, ya que con este valor no podemos analizar nada, únicamente lo que se puede hacer es asegurarse de que el análisis de fuerzas sea correcto,

generalizando y estandarizando la carga exterior de fuerzas en cada una de las mallas tensegríticas a comparar.

Así pues, para poder cargar cada uno de los puntos, lo que se hace es multiplicar de la misma manera la carga externa de viento (30.345 kgf/m^2) con el área tributaria que le corresponde a cada punto; por ejemplo, a los puntos internos (puntos con área tributaria de color anaranjado) que les corresponde un área de 1.5625 m^2 , les tocaría recibir 47.41 kgf/m^2 a cada uno; de igual manera se hace con los demás puntos exteriores de la malla. En la tabla 16 se mostrará la fuerza que le corresponde a cada punto.

Tabla 16

Fuerza total que hay en cada punto de la malla del Ejercicio previsto.

Color de punto de malla	Carga de fuerza externa de viento	Área tributaria de cada punto	Fuerza que recibe cada punto	Cantidad de puntos iguales	TOTAL de fuerzas
Naranja	30.345 kgf/m^2	1.5625 m^2	47.414 kgf	21	995.695 kgf
Verde	30.345 kgf/m^2	0.7813 m^2	23.709 kgf	20	474.171 kgf
Celeste	30.345 kgf/m^2	0.3906 m^2	11.853 kgf	4	47.411 kgf
TOTAL	-	-	-	45	1517.277 kgf

Como se puede ver, el total de fuerzas de toda la malla sumando todos los puntos que hay en ella, es de 1517.277 kgf , valor casi igual al hallado anteriormente multiplicando los 50 m^2 del área de la malla con la presión externa del viento de 30.345 kgf/m^2 ; esto muestra que una buena distribución de áreas por el método del área tributaria, distribuye bien todas las fuerzas que se ejercen sobre la malla.

Así pues, todas las mallas analizadas en esta tesis, deben tener una adecuada distribución de área; si bien en los siguientes capítulos se detallarán y mostrarán el análisis

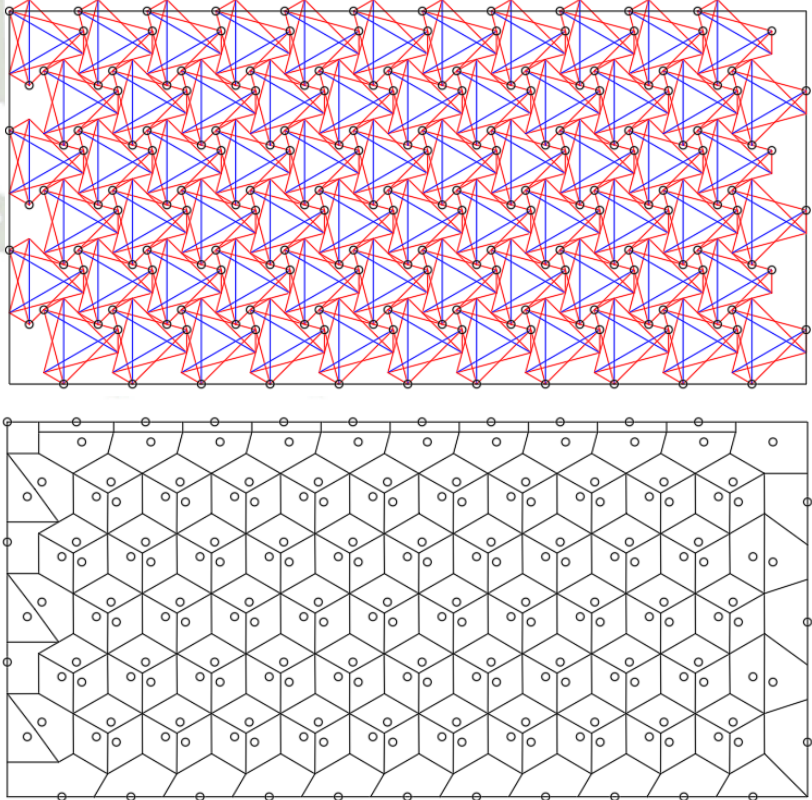
y los resultados de cada una de estas mallas en el programa SAP2000, en este capítulo se verá cómo fue la distribución de áreas y fuerzas en cada una de ellas.

8.1. Distribución de áreas para asignación de fuerzas de Mallas tensegríticas formadas por módulos tensegríticos

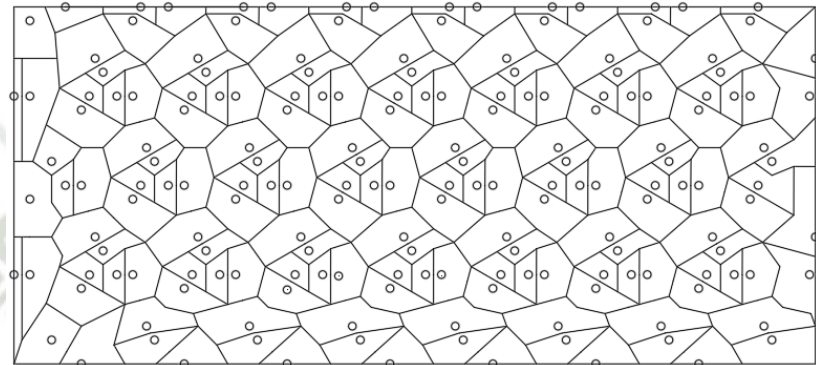
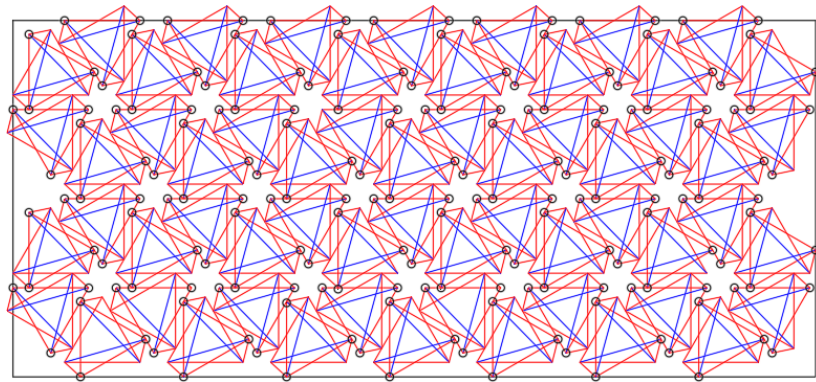
Todas las imágenes que se encuentran en la tabla 17 son de elaboración propia, mediante el programa AutoCad, las cuales permiten ver la distribución de áreas para cada punto de la capa superior de cada una de las mallas a analizar estructuralmente.

Tabla 17

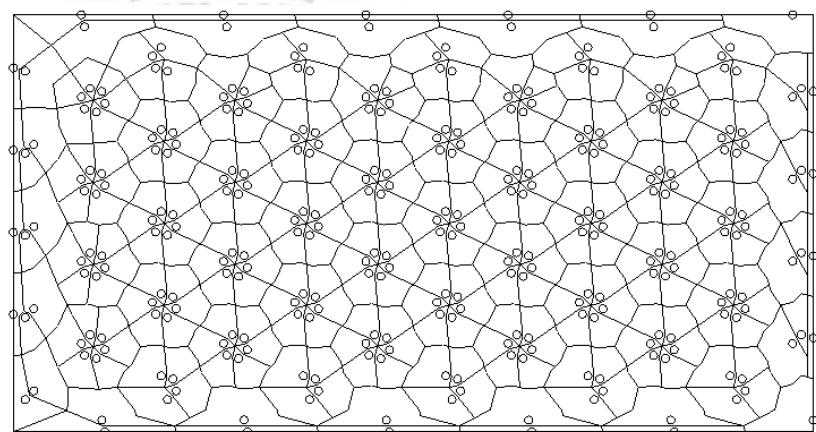
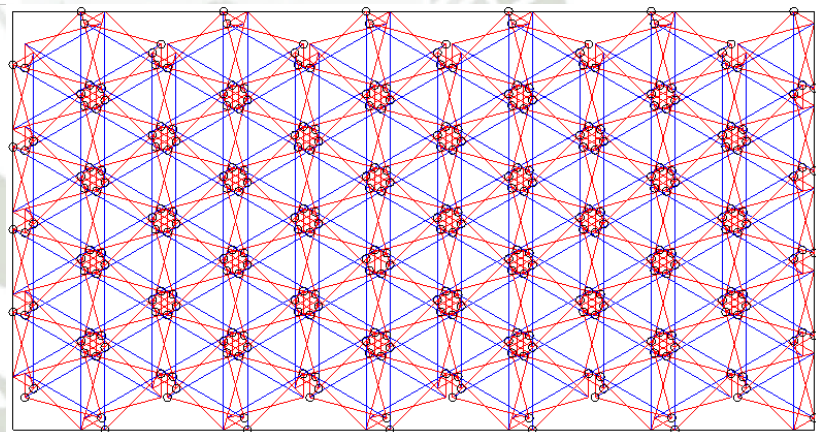
Distribución de áreas tributarias para cada nudo (Mallas tensegríticas formadas por Módulos tensegríticos).

MALLA TENSEGRÍTICA	DISTRIBUCIÓN DE ÁREA TRIBUTARIA
<p>MALLA SIMPLEX Unión Unilateral</p>	

MALLA
SIMPLEX Unión
Bilateral

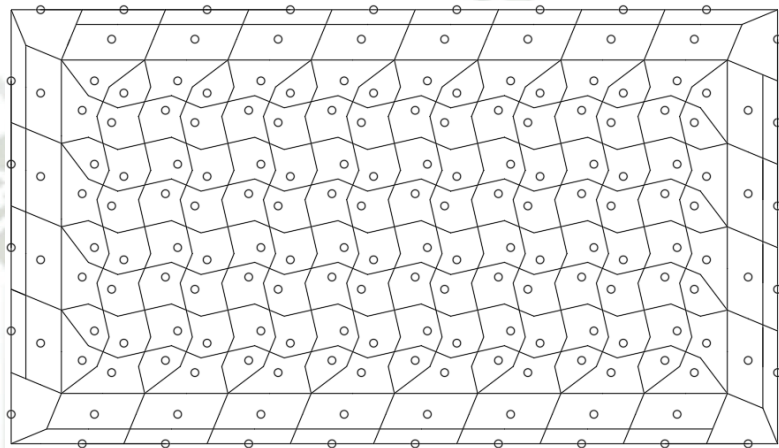
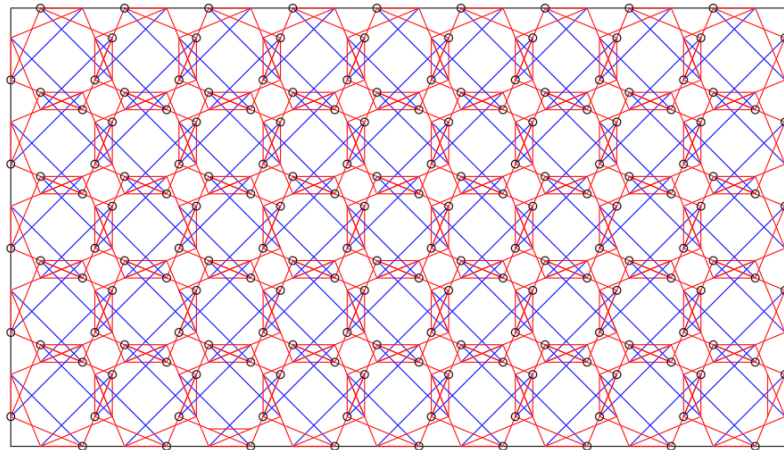


MALLA
SIMPLEX Unión
Conexión Arista-
Arista



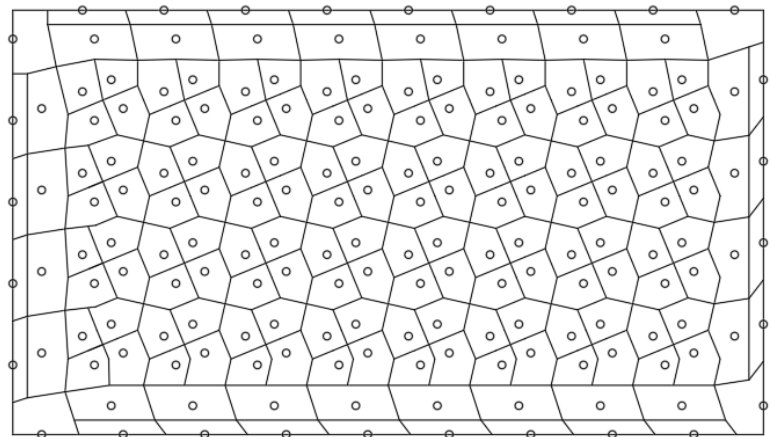
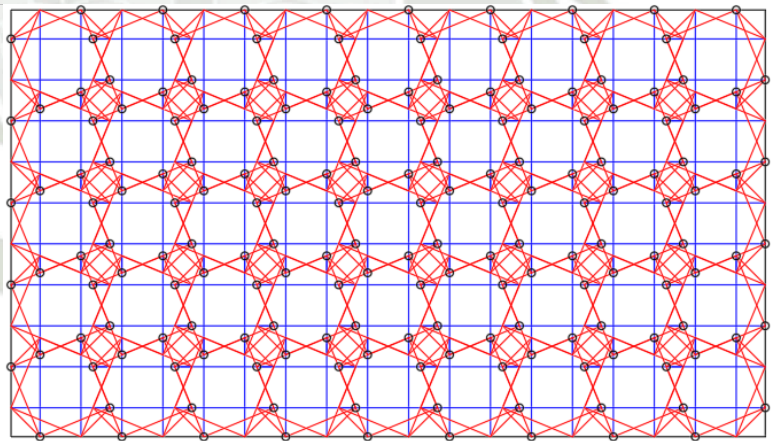
MALLA
CUADRUPLEX

Unión Conexión
Arista-Arista 1



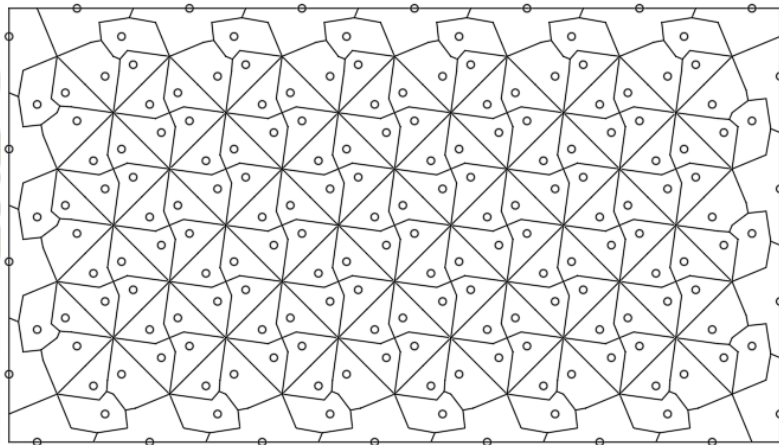
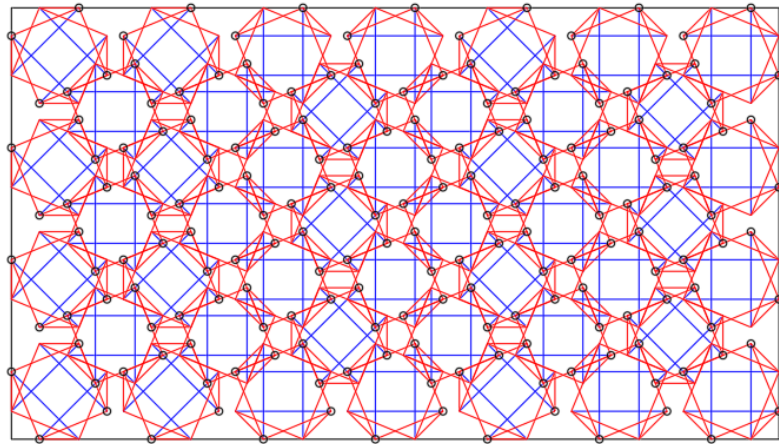
MALLA
CUADRUPLEX

Unión Conexión
Arista-Arista 2



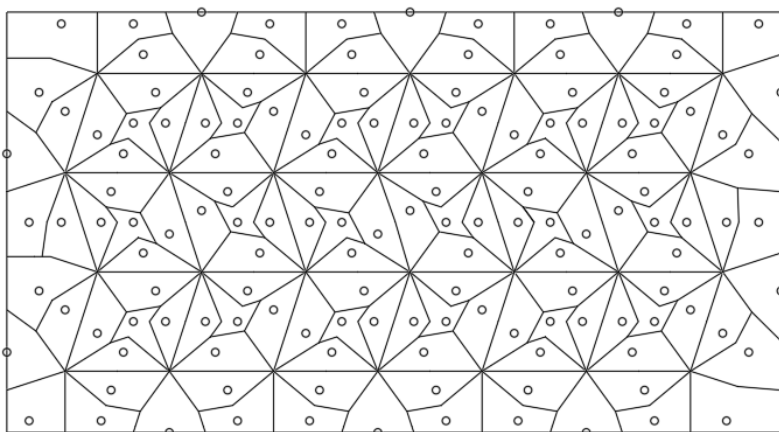
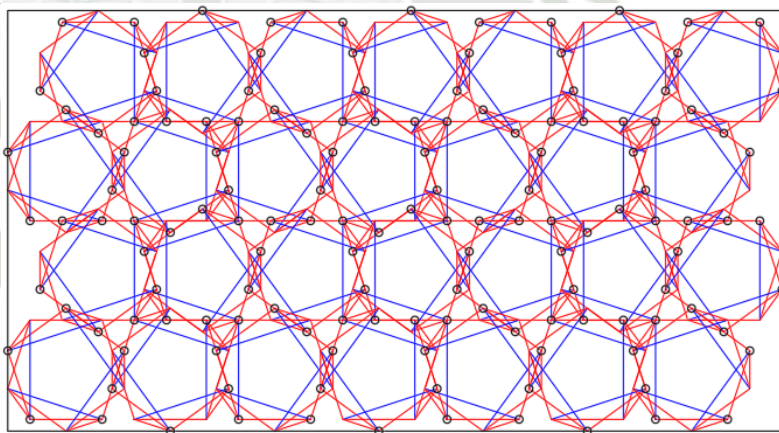
MALLA
CUADRUPLEX

Unión Conexión
Arista-Arista 3

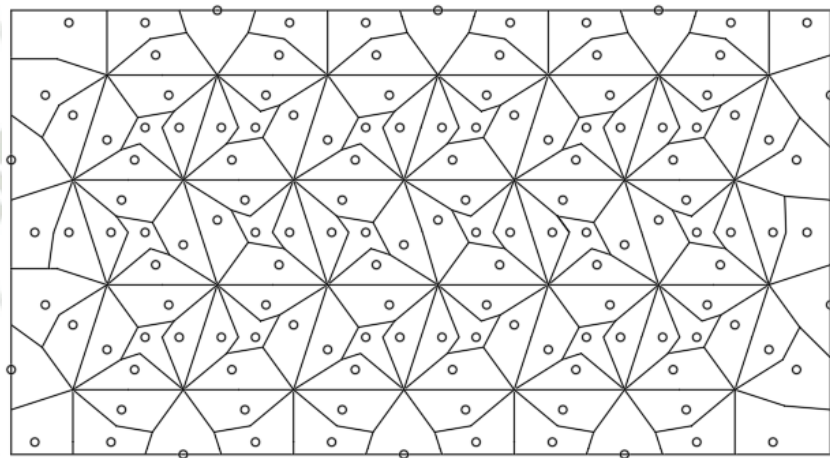
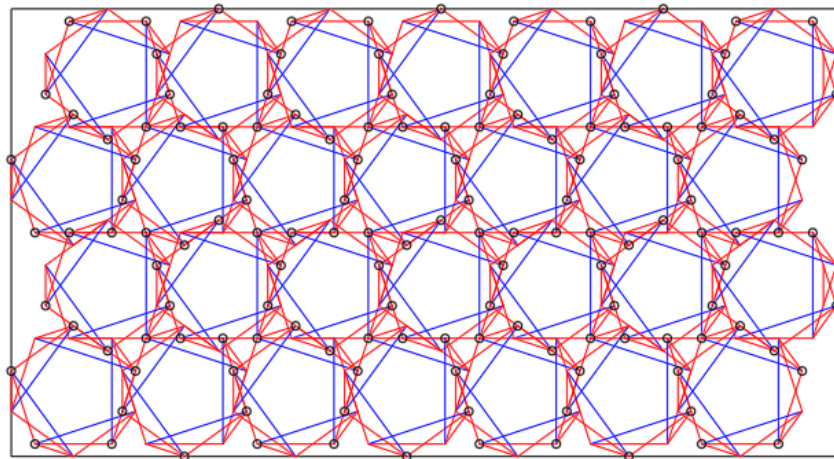


MALLA
QUINTUPLEX

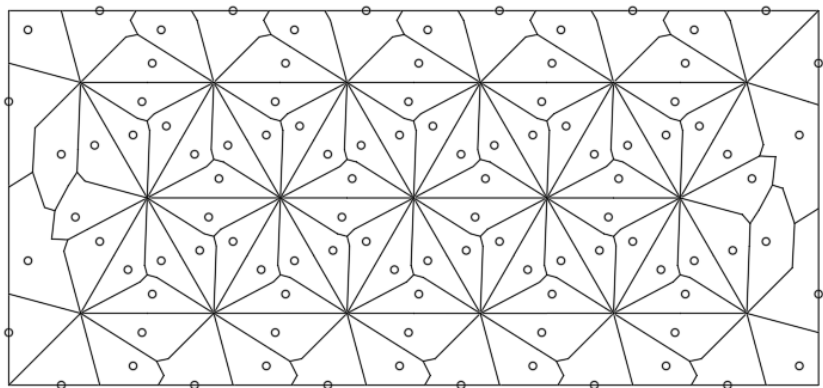
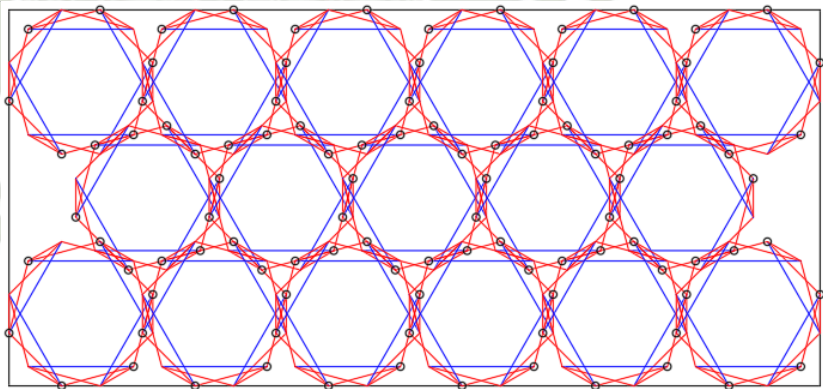
Unión Conexión
Arista-Arista 1



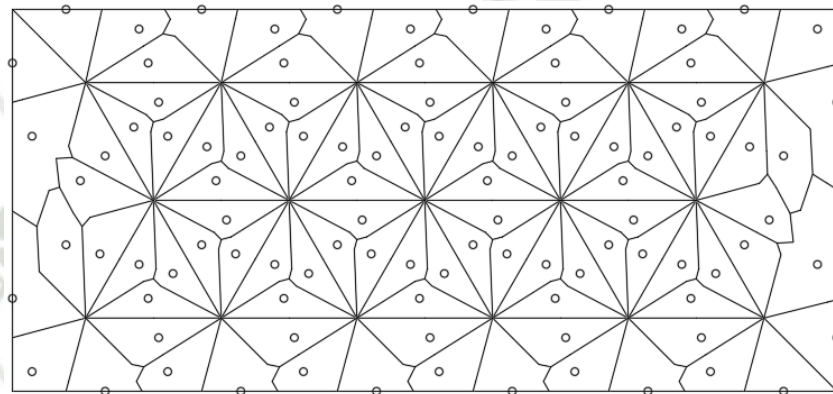
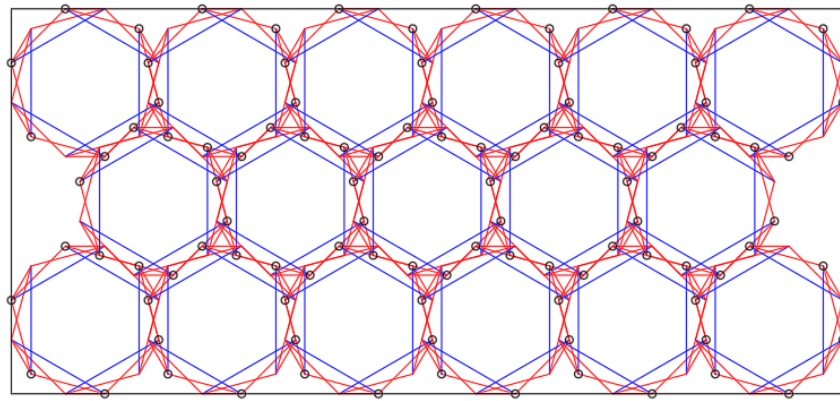
MALLA
QUINTUPLEX
Unión Conexión
Arista-Arista 2



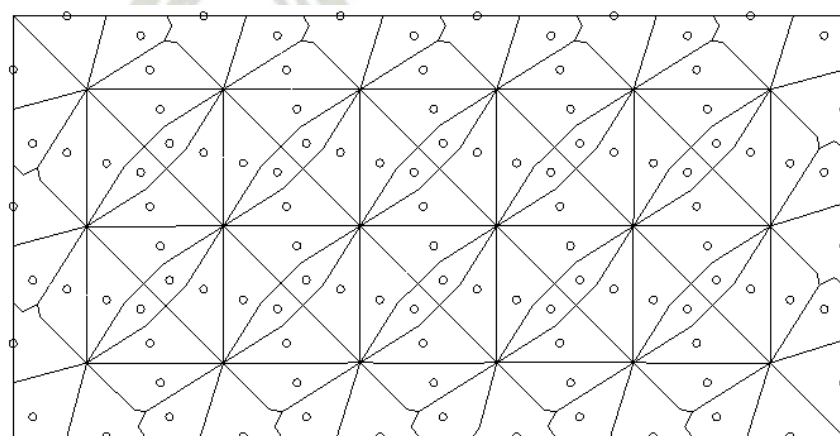
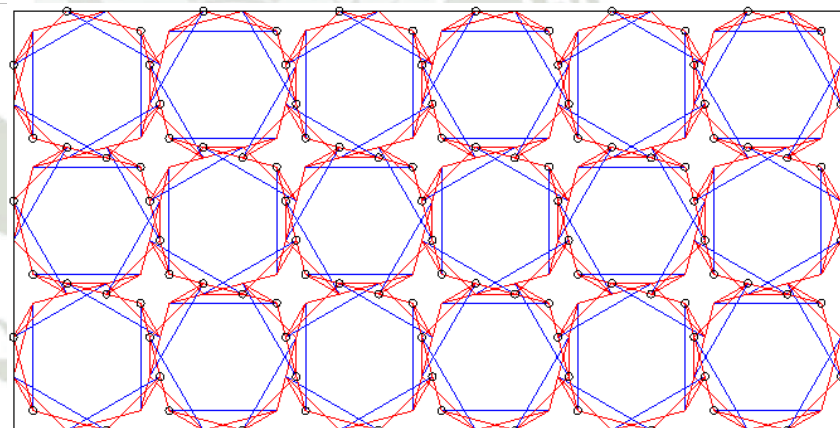
MALLA
SEXTUPLEX
Unión Conexión
Arista-Arista 1



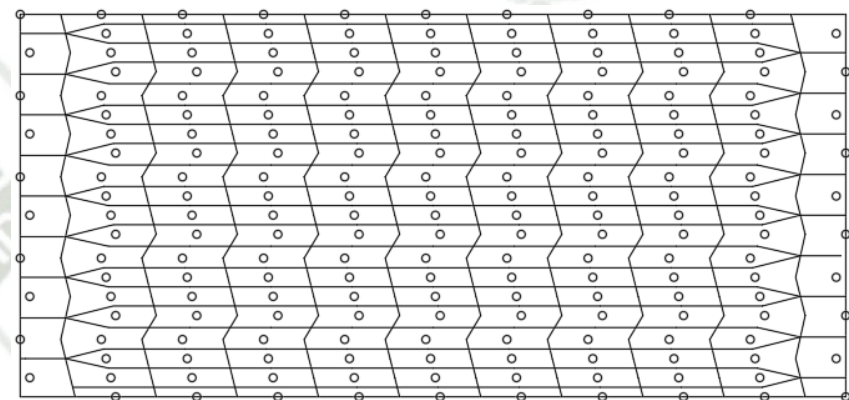
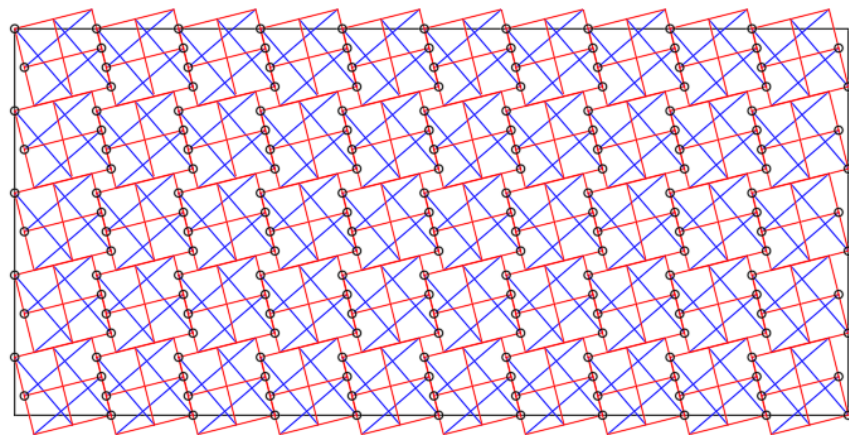
MALLA
SEXTUPLEX
Unión Conexión
Arista-Arista 2



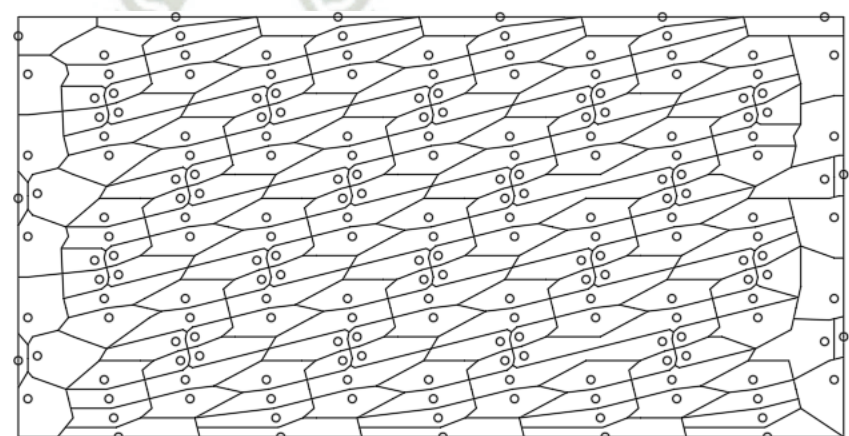
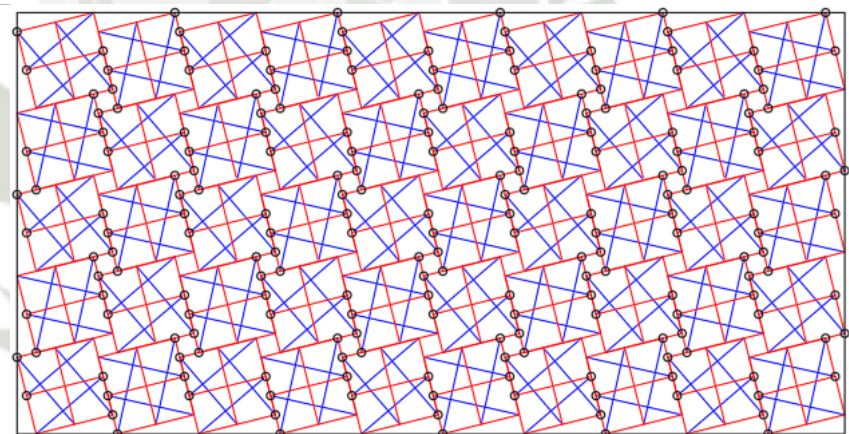
MALLA
SEXTUPLEX
Unión Conexión
Arista-Arista 3



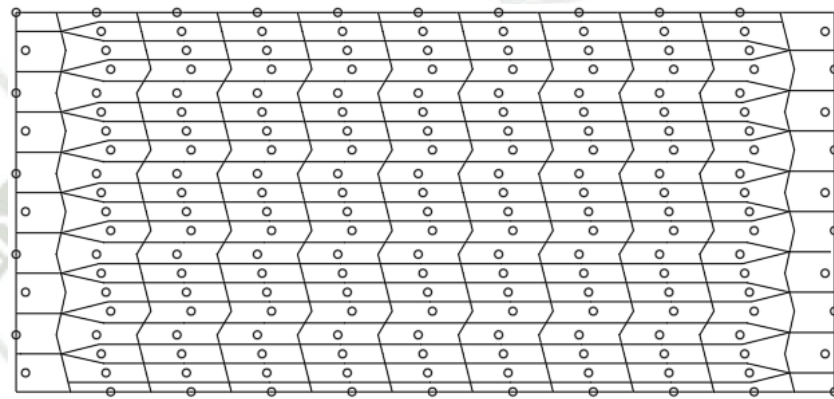
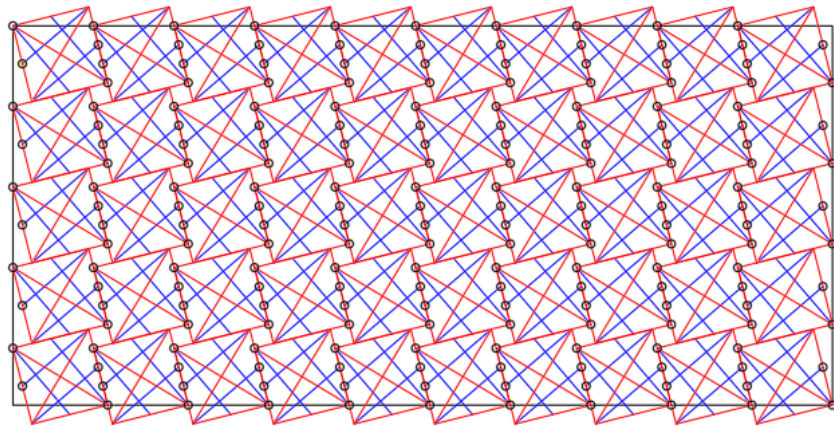
MALLA
QUASTRUT-S
Conexión Arista a
medias 1



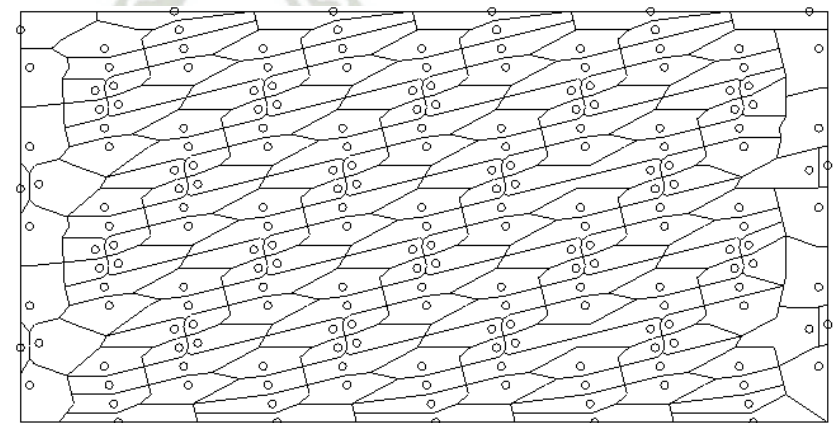
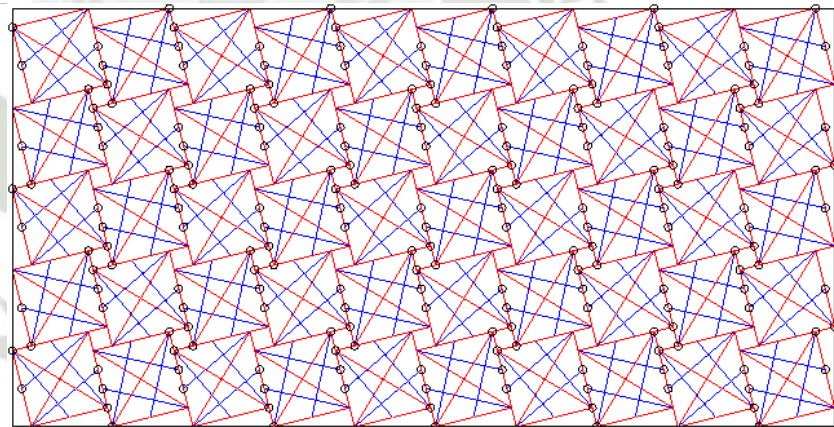
MALLA
QUASTRUT-S
Conexión Arista a
medias 2



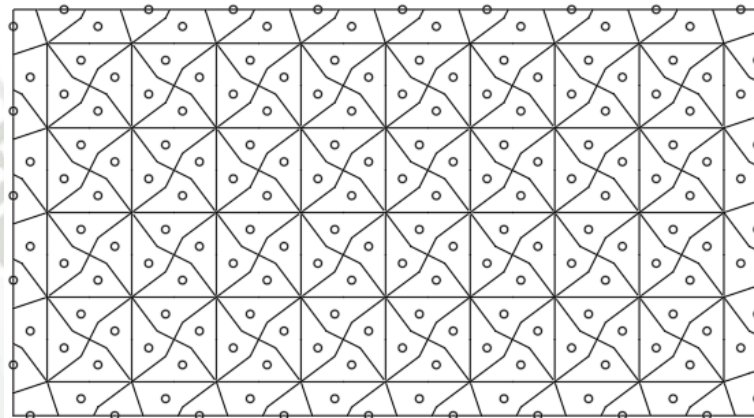
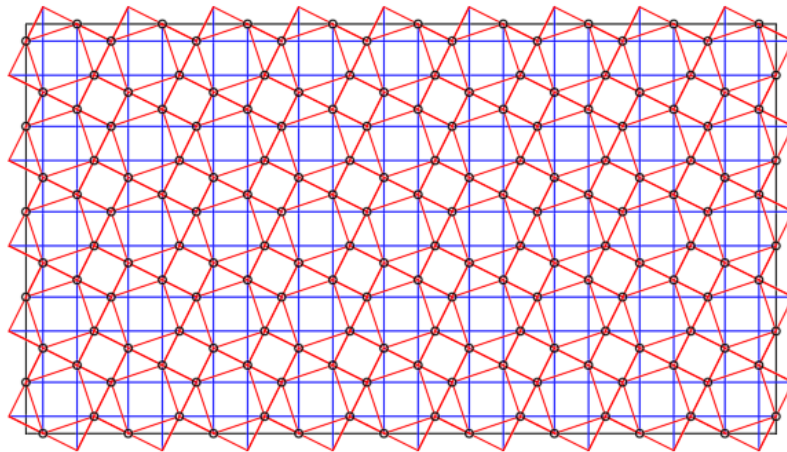
MALLA
QUASTRUT-Z
Conexión Arista a
medias 1



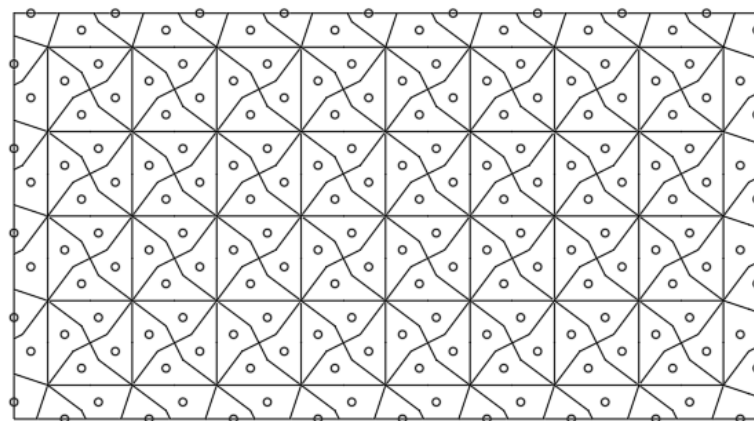
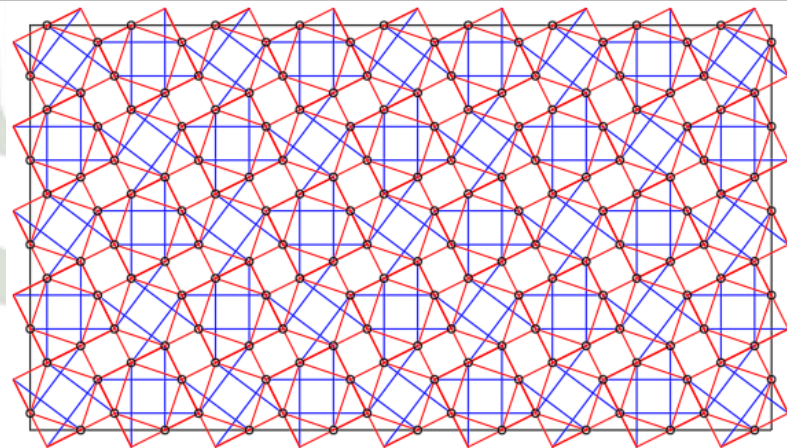
MALLA
QUASTRUT-Z
Conexión Arista a
medias 2



MALLA MEDIO
CUBOCTAEDRO
Conexión Arista
en una sola capa 1

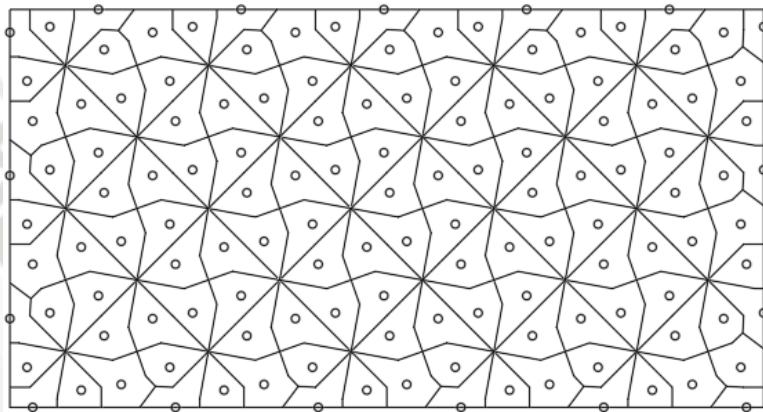
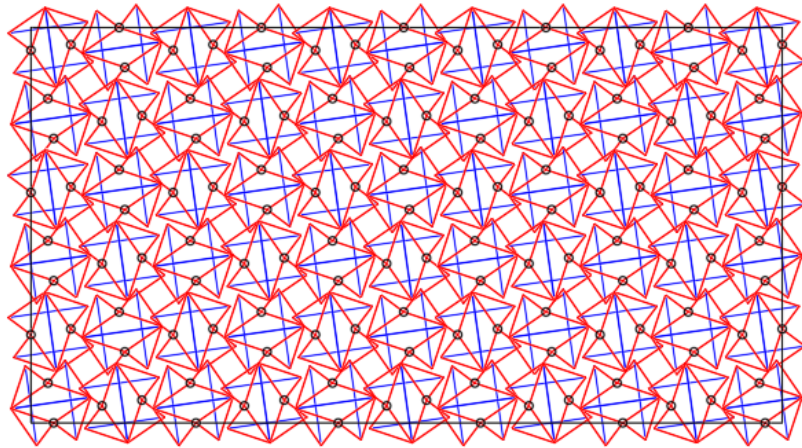


MALLA MEDIO
CUBOCTAEDRO
Conexión Arista
en una sola capa 2



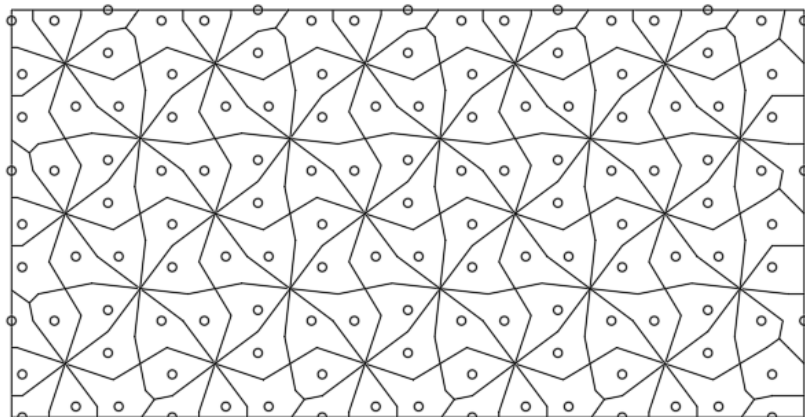
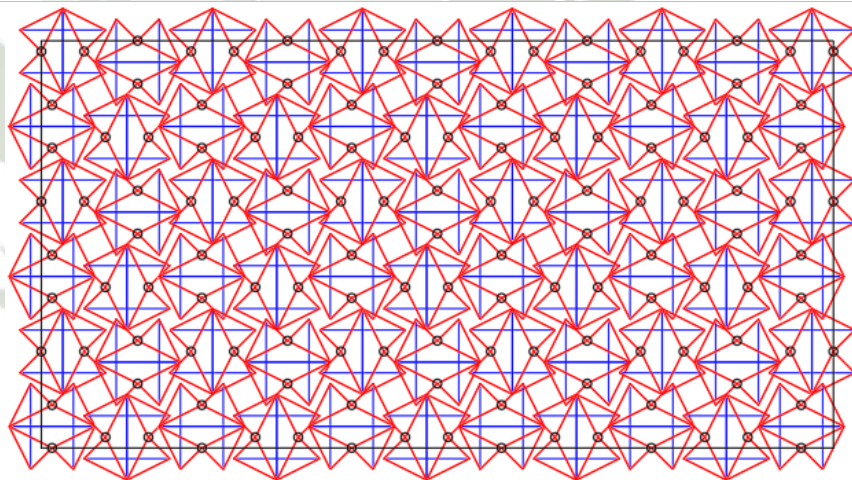
MALLA
OCTAEDRO
EXPANDIDO

Conexión
Unilateral 1

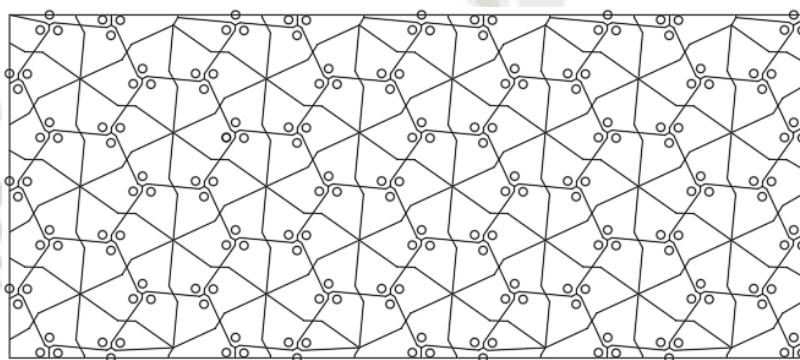
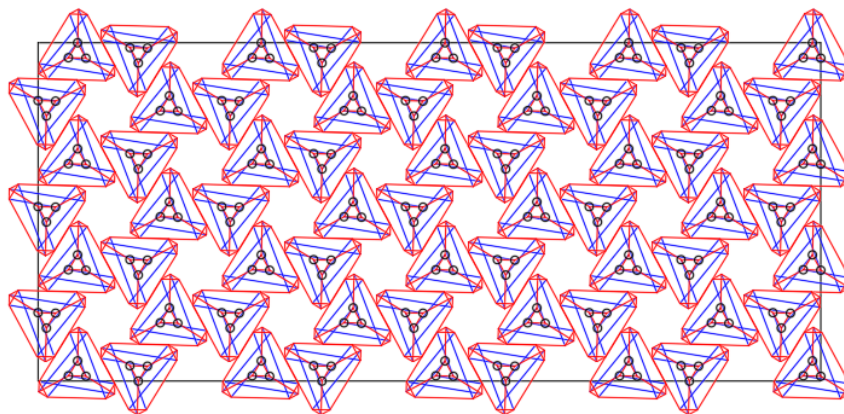


MALLA
OCTAEDRO
EXPANDIDO

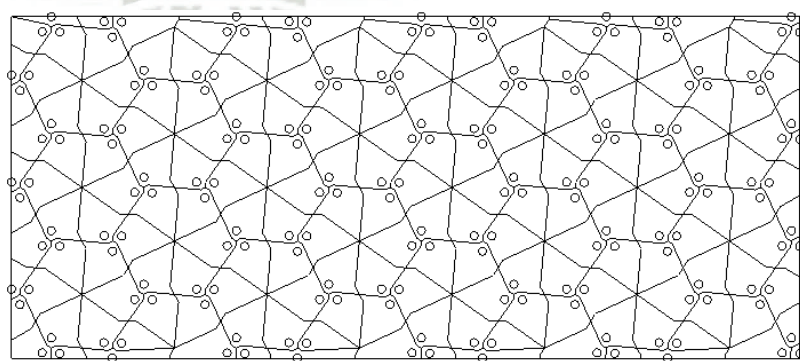
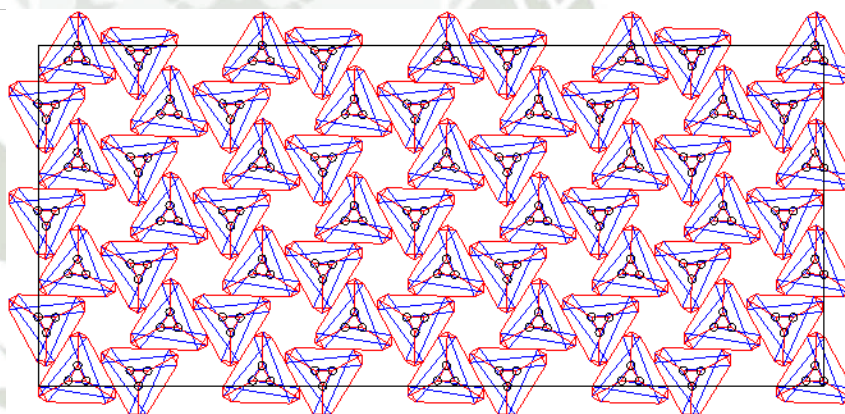
Conexión
Unilateral 2



MALLA
TETRAEDRO
TRUNCADO
Conexión Arista
en una sola capa 1



MALLA
TETRAEDRO
TRUNCADO
Conexión Arista
en una sola capa 2



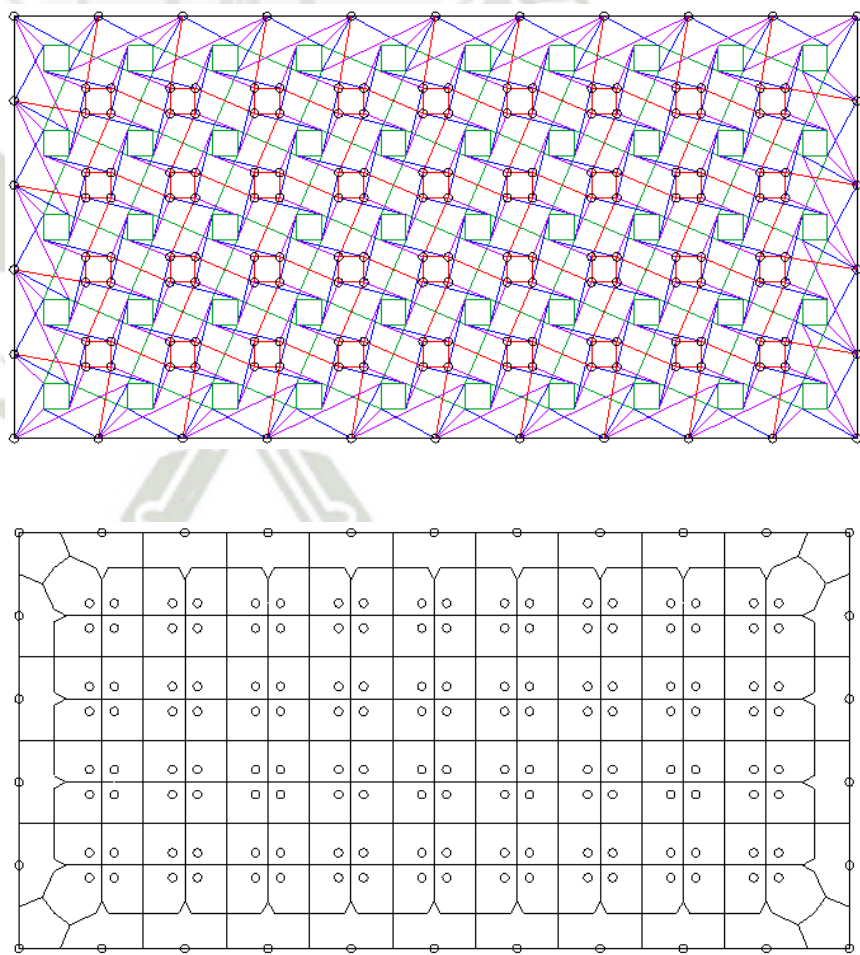
Nota. Vista en planta de cada malla tensegrítica con elementos rojos representando a los tensores, y con elementos azules representando a compresores; y vista en planta de la distribución de áreas a cada punto de la malla. Fuente: Elaboración propia.

8.2. Distribución de áreas para asignación de fuerzas de Mallas tensegríticas formadas por Manipulación Rot-Umbela

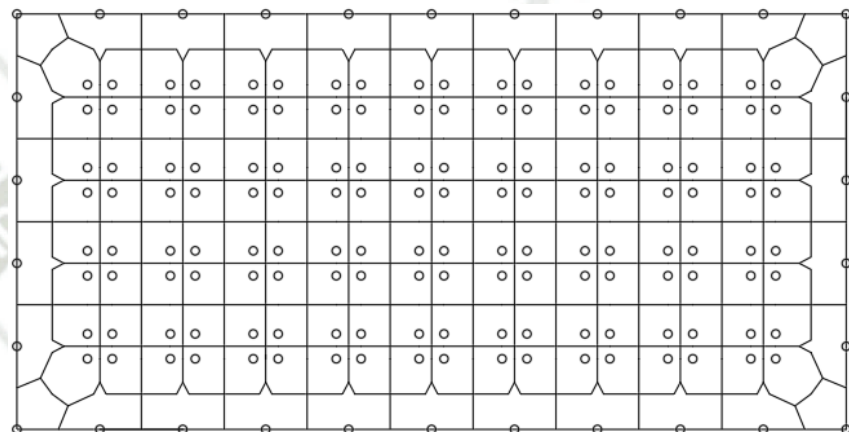
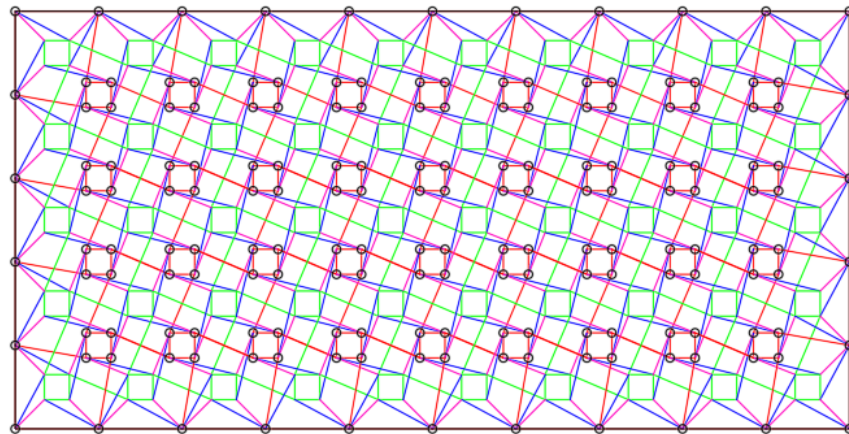
Todas las imágenes que se encuentran en la tabla 18 son de elaboración propia, mediante el programa AutoCad, las cuales permiten ver la distribución de áreas para cada punto de la capa superior de cada una de las mallas a analizar estructuralmente.

Tabla 18

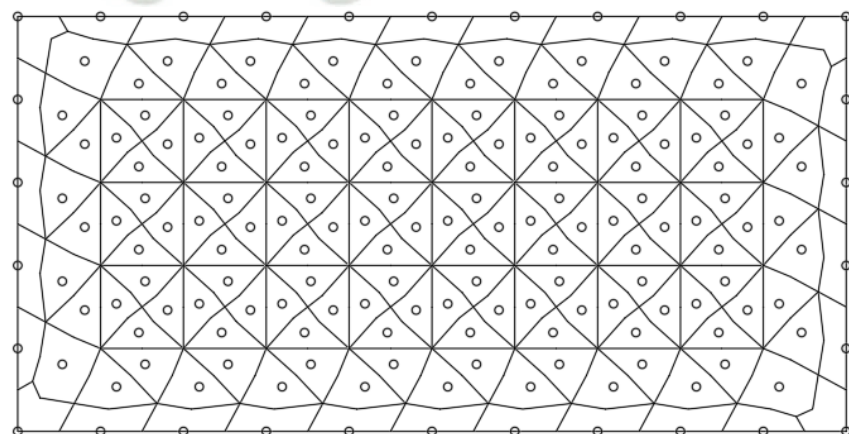
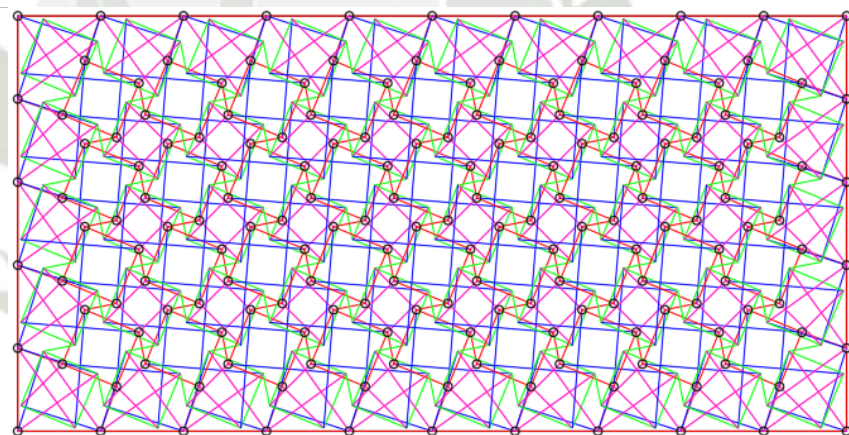
Distribución de áreas tributarias para cada nudo (Mallas tensegríticas formadas por Manipulación Rot-Umbela).

MALLA TENSEGRÍTICA	DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS
SPACE DECK Tensores adicionales Forma 1	

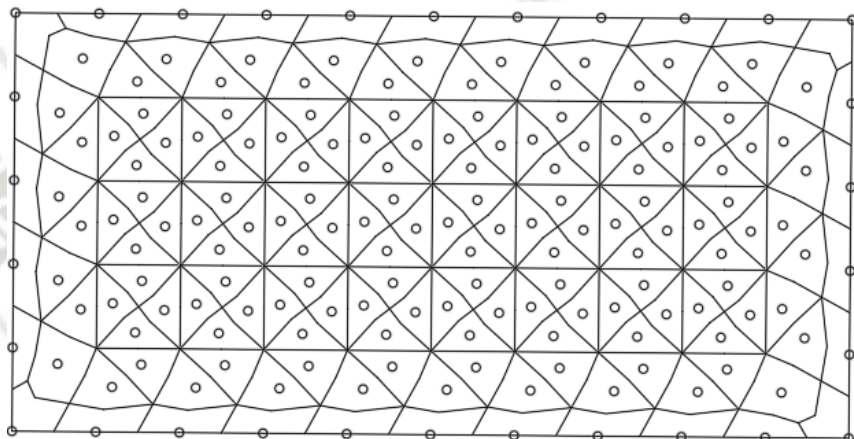
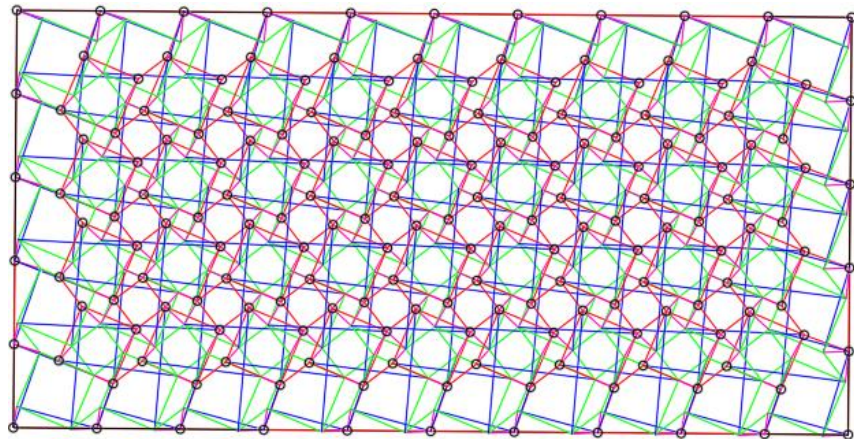
SPACE DECK
Tensores
adicionales Forma
2



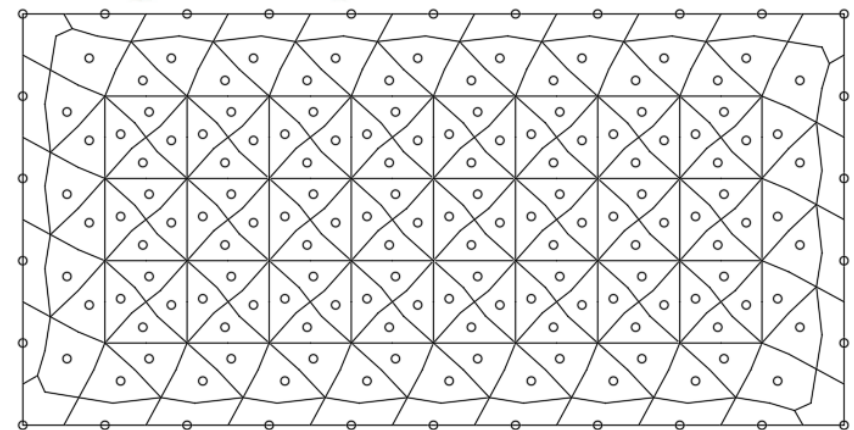
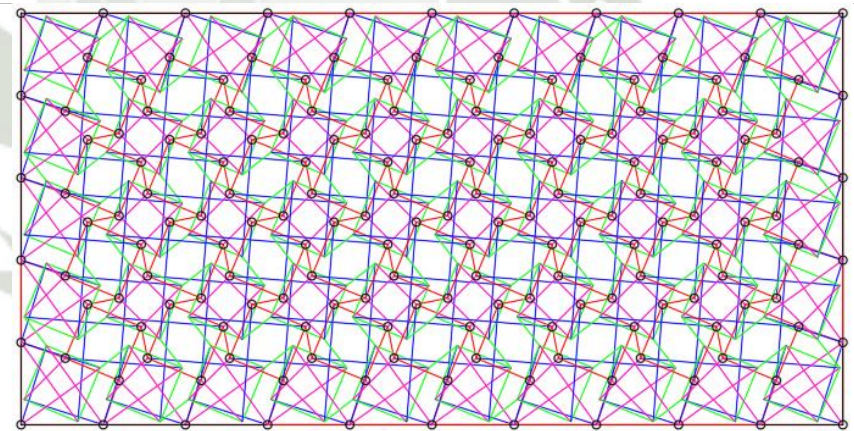
SPACE DECK
Tensores iniciales
Forma 1



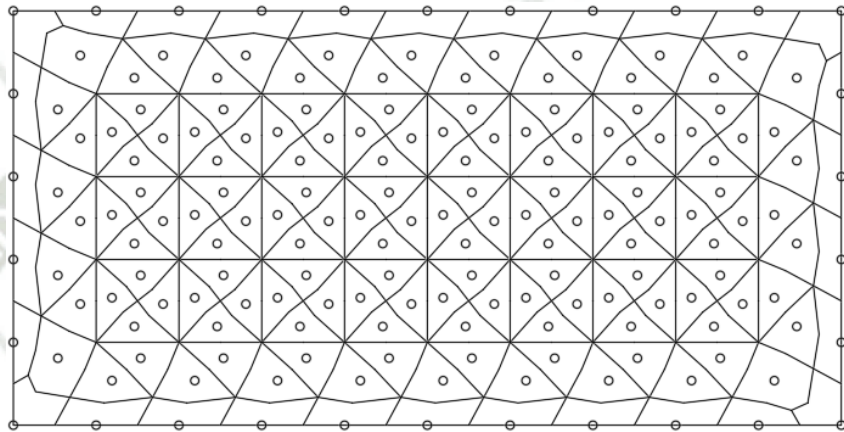
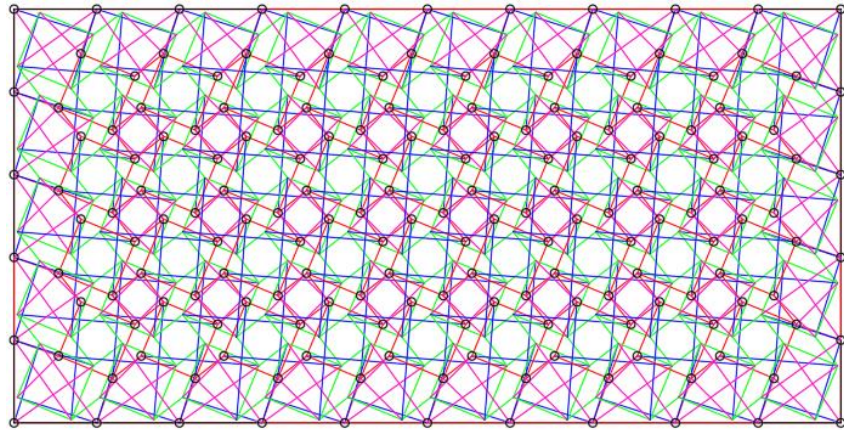
SPACE DECK
Tensores iniciales
Forma 2



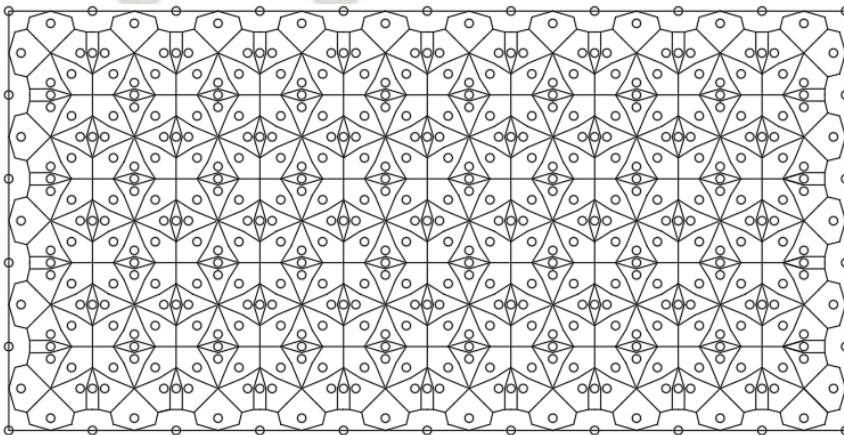
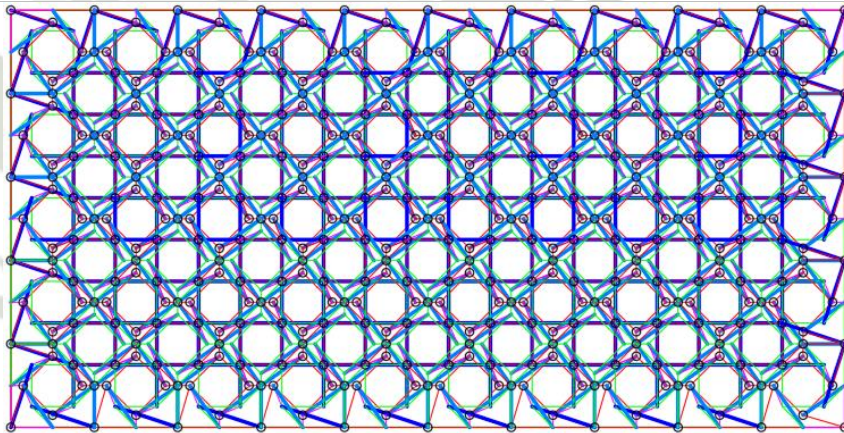
SPACE DECK
Tensores iniciales
Forma 3



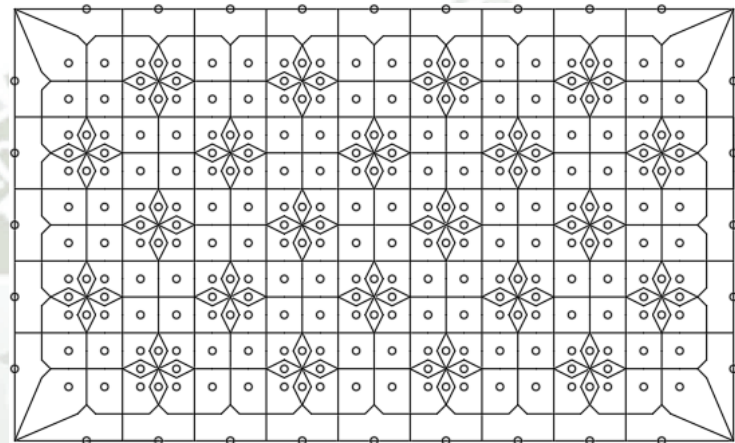
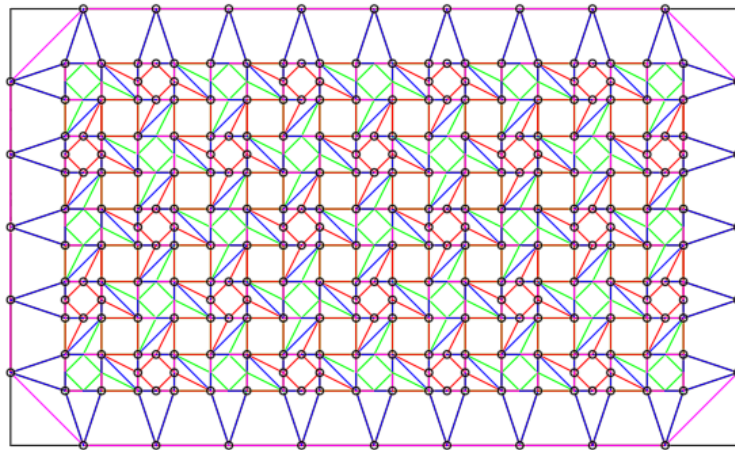
SPACE DECK
Tensores iniciales
Forma 4



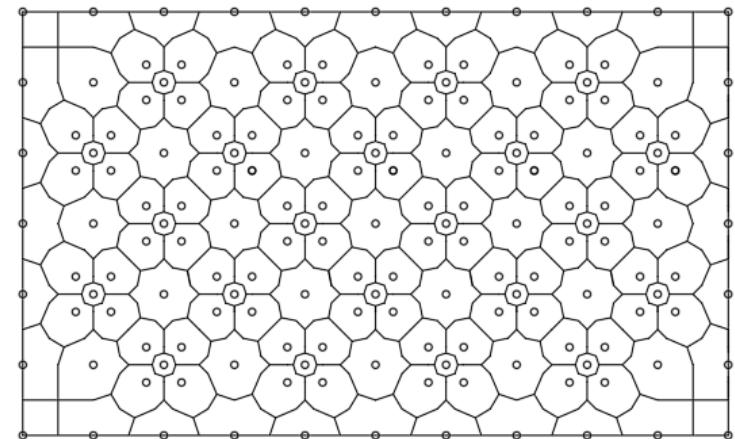
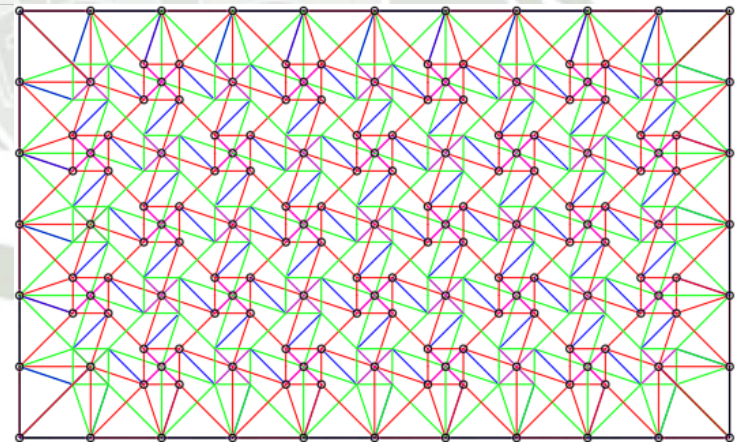
MALLA PLANA
CON
SEPARADORES
V44



MALLA
DIRECTA O
TRIANGULADA
1

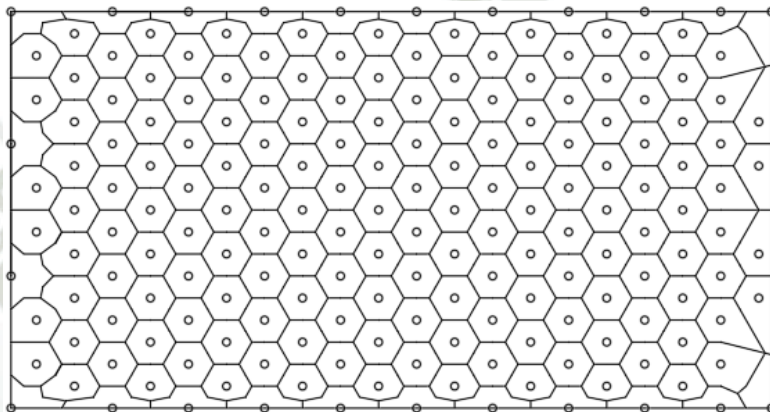
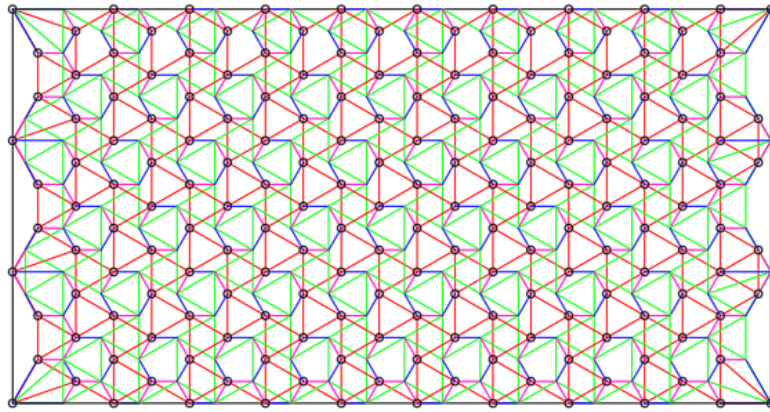


MALLA
DIRECTA O
TRIANGULADA
2



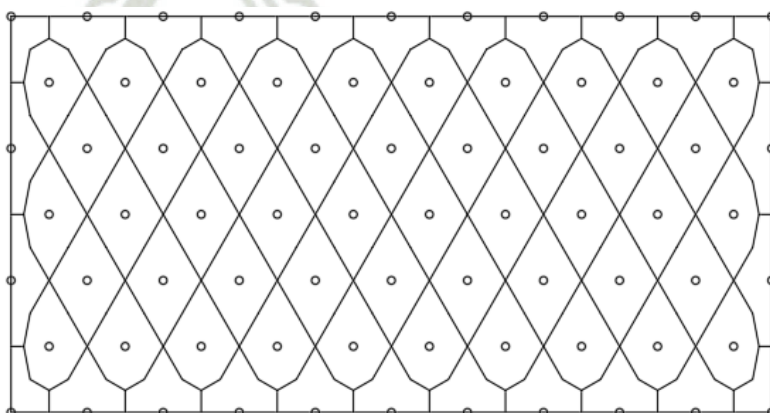
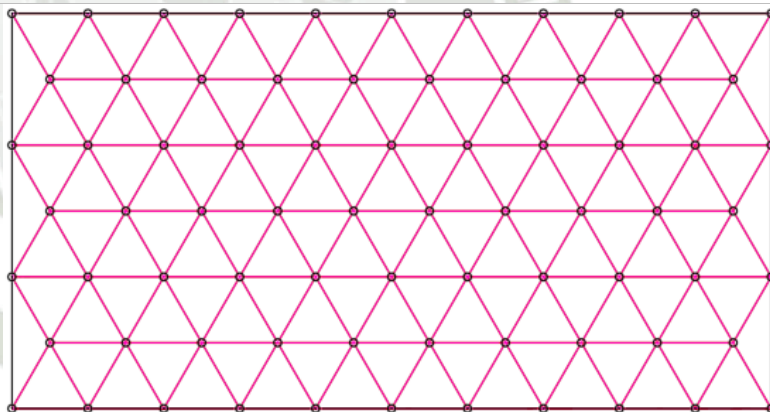
MALLA
DIRECTA O
TRIANGULADA

3

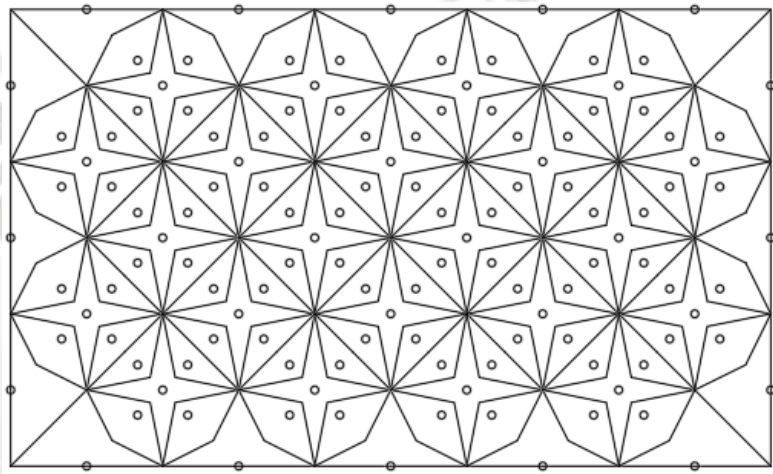
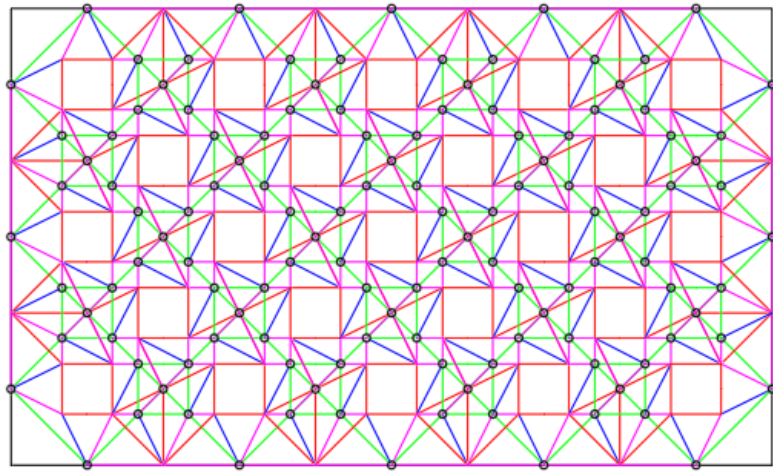


MALLA
DIRECTA O
TRIANGULADA

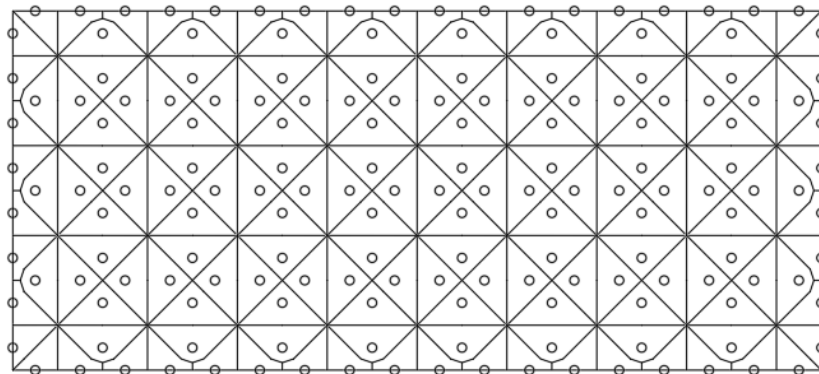
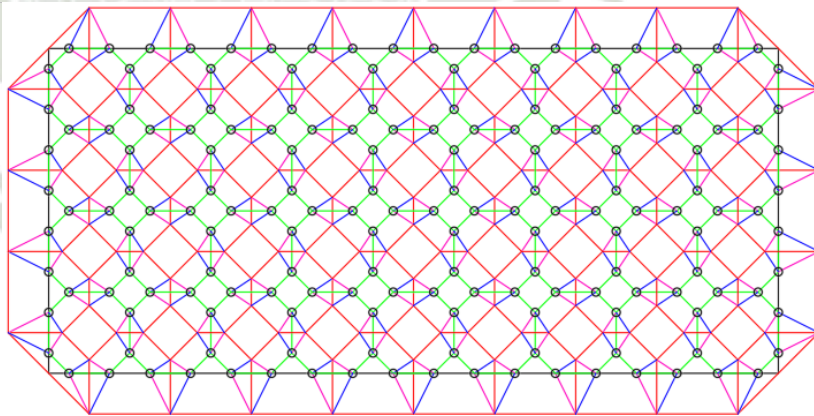
4



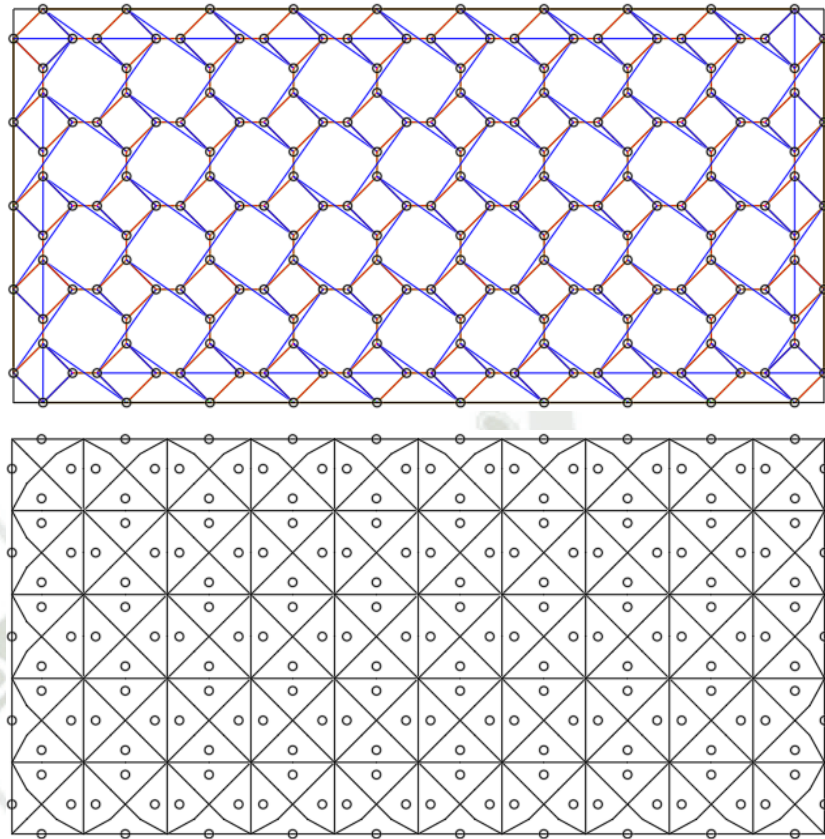
MALLA
BIDIRECCIONAL
CUADRADA
DIFERENCIAL 1



MALLA
BIDIRECCIONAL
CUADRADA
DIFERENCIAL 2



MALLA
BIDIRECCIONAL
CUADRADA
COMPENSADA



Nota. Vista en planta de cada malla tensegrítica con elementos rojos representando a los tensores, y con elementos azules representando a compresores; y vista en planta de la distribución de áreas a cada punto de la malla. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IX

9. MODELADO Y CARACTERÍSTICAS DE MALLAS TENSEGRÍTICAS

En esta sección se modelarán en el programa SAP 2000 todas las mallas tensegríticas que se tienen hasta ahora, tanto las formadas por pequeños módulos de tensegridad como las creadas por la manipulación Rot-Umbela; luego, se procederá a analizarlas con las fuerzas de la carga de viento que le corresponde a cada una (visto en la distribución del capítulo anterior); en el capítulo 10, de entre cada una de las mallas, se seleccionará a la más resistente estructuralmente, la malla que representará a todo su grupo será la que presente menos esfuerzos axiales en sus elementos, ya que si logra esto, también será la que pueda soportar más cargas de viento antes de exceder las fuerzas axiales máximas en sus elementos; para poder compararlas todas y tomar una decisión final, es necesario este paso desarrollado en el presente capítulo.

En la presente investigación se mostrará visualmente también cada malla modelada en el programa y se mostrará al final un cuadro donde se podrá ver la comparación de las características principales de cada una de ellas.

Para poder estandarizar todas las estructuras y analizarlas bajo las mismas condiciones, se usará un determinado rango de longitudes para el largo y ancho del área total de la malla, también se usarán los mismos materiales para los elementos (compresores y tensores), y se aplicarán las mismas cargas de viento en los nudos de la capa superior (distribución de fuerzas).

9.1. Condiciones generales para el Modelado y el Análisis de Mallas Tensegríticas

- El tamaño del área de las mallas deberá ser aproximadamente 5 m de ancho por 10m de largo, tomando como referencia la tercera parte de las medidas promedio de las canchas de fútbol, básquet y vóley (actividades usadas en este tipo de

infraestructuras). Existirá cierta excepción con algunas mallas debido a la geometría que presentan.

- Se idealizarán como apoyos, columnas de 1m de ancho y 1m de largo aproximadamente, ubicadas en las 4 esquinas de toda la cobertura; adicionalmente se hará un análisis extra, con dos columnas más en la mitad de la longitud más larga. Los apoyos serán articulados y sujetos a 3 puntos como mínimo, simulando a una columna cuadrada. Los apoyos serán todos aquellos puntos que puedan entrar en el área cuadrada de 1m² aproximadamente que representa a cada columna.
- Las fuerzas ejercidas sobre cada malla se aplicarán en base a la presión mínima de viento necesaria para que la estructura sea segura en la ciudad de Arequipa; en este caso, considerando un factor de forma $c=0.7$ para succión y una amplificación del 20% por efectos dinámicos, se tendrá que considerar una presión de viento de 30.345 kgf/m². Se tomará como unidad principal esta fuerza de viento ejercida sobre toda la malla, independientemente del área que tenga.
- El método establecido para distribuir la fuerza total de viento en todos los nudos de la capa superior, se dará a través de la distribución por área tributaria.
- Los elementos compresores y tensores serán del mismo material para todas, tanto las características físicas que tengan como sus propiedades mecánicas.

Cabe resaltar que algunas mallas presentan geoméricamente un área mayor a 50 m² (5m de ancho y 10m de largo), esto ocurre debido a los diseños y las imposibilidades que tienen las mallas al momento de cubrir exactamente las dimensiones requeridas, por eso, para el análisis de dichas mallas se usará el área real que llegan a cubrir, así sean ligeramente mayores o menores que los 50m²; esto se hace ya que si una malla presenta más área, tendrá también más elementos para resistir las fuerzas de viento, logrando una ventaja sobre las

demás, por lo que con esta modificación si una malla tiene más elementos, deberá también resistir proporcionalmente una mayor presión de fuerzas (mayor área).

Para el tema de los soportes o apoyos en las mallas, hay que aclarar que serán idealizados como cuadrados de 1 m de lado, pero hay que entender que dicho cuadrado solo será una idealización mas no la realidad, ya que todas las mallas al tener diferentes geometrías tendrán también en la capa inferior formas geométricas distintas, y no formarán cuadrados perfectos entre sus puntos, por lo que los apoyos no serán en 4 puntos como tal, pueden ser más o incluso menos, lo importante es que todos los apoyos seleccionados estén dentro del área de 1 m² aproximadamente; puede que algunas mallas al tener formas geométricas grandes excedan ligeramente dicha área en la capa inferior, pero serán pocas y con una variación controlada; para el caso de las mallas con formas geométricas pequeñas, se tratará de usar al máximo el área cuadrada de 1 m², colocando más de 4 apoyos dentro del cuadrado (ventaja para mallas con módulos pequeños). Como las mallas son rectangulares y tienen 4 vértices, debería haber una columna en cada esquina, sin embargo, como algunas mallas tienen geometrías raras y distintas en la capa inferior, no es posible colocar estos apoyos exactamente en las esquinas, por lo que se tratará de ponerlos lo más cerca de las esquinas, buscando simetría entre estas.

Los apoyos serán nudos articulados ya que todos los elementos solo transmiten fuerzas axiales, por lo que colocar nudos empotrados sería innecesario.

En resumen, los apoyos de 1 m² (columnas) se ubicarán en los puntos de la capa inferior, mientras que la cubierta de 50 m² aprox. que cubre cada malla, se ubicará en los puntos de la capa superior, así es como se modelarán las mallas en el programa.

9.2. Modelado y Análisis de mallas tensegríticas formadas por Módulos tensegríticos

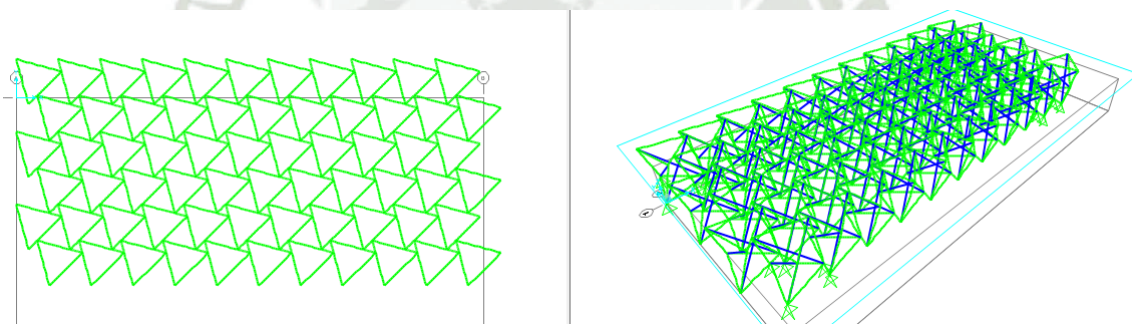
A continuación, se mostrará cada malla modelada en sus respectivas familias, aclarando si se obtuvieron resultados positivos o negativos en cada una de ellas, y al finalizar este apartado se mostrará un cuadro con las características principales de cada una de ellas (características y propiedades generales tras el modelado).

9.2.1. Simplex

Para este módulo se tienen 3 mallas diferentes, una malla con cada tipo de unión (unilateral, bilateral y conexión arista-arista), todas con buenos resultados tras el análisis.

Figura 113

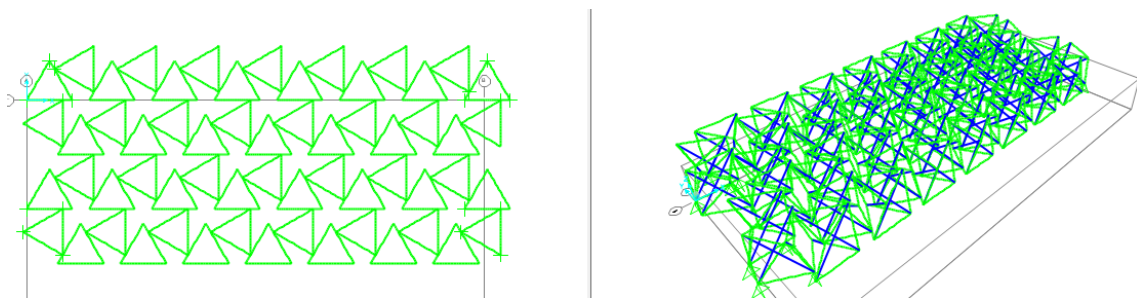
Modelado de Malla Simplex Unión Lateral



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 114

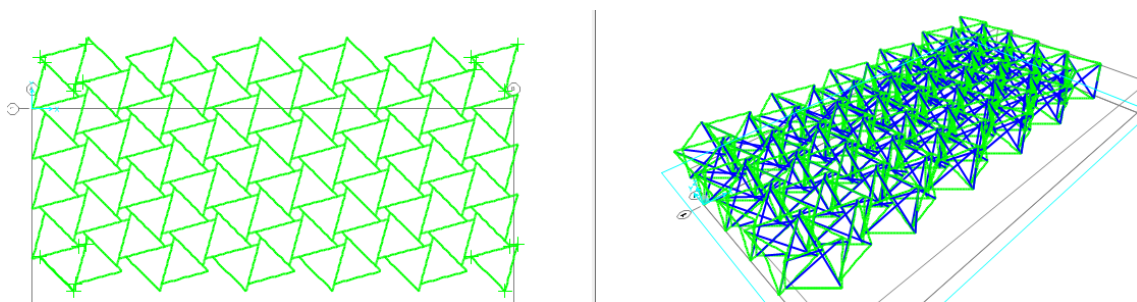
Modelado de Malla Simplex Unión Bilateral



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 115

Modelado de Malla Simplex Unión Conexión Arista-Arista



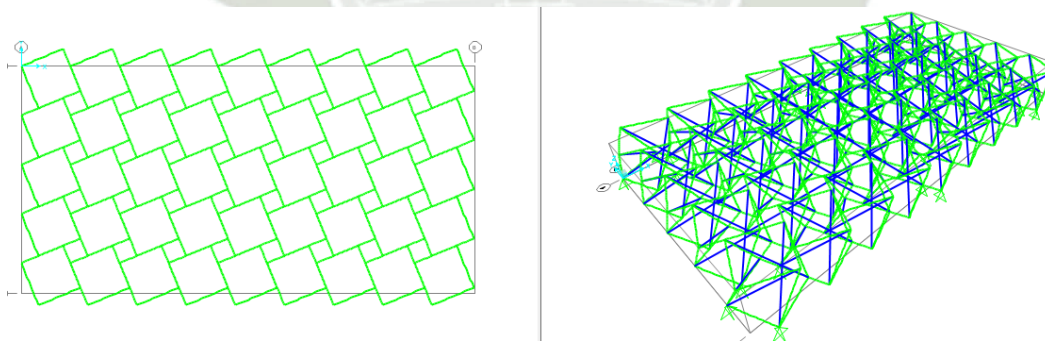
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.2.2. Cuádruplex

Para esta familia de módulos, existen también 3 posibles mallas, con un único tipo de unión (Conexión arista-arista); tras el análisis las 3 tienen resultados positivos.

Figura 116

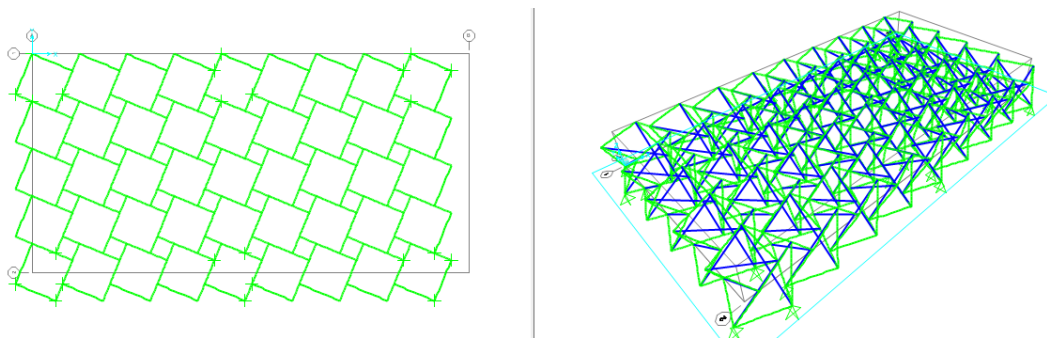
Modelado de Malla Cuádruplex Unión Conexión Arista-Arista 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 117

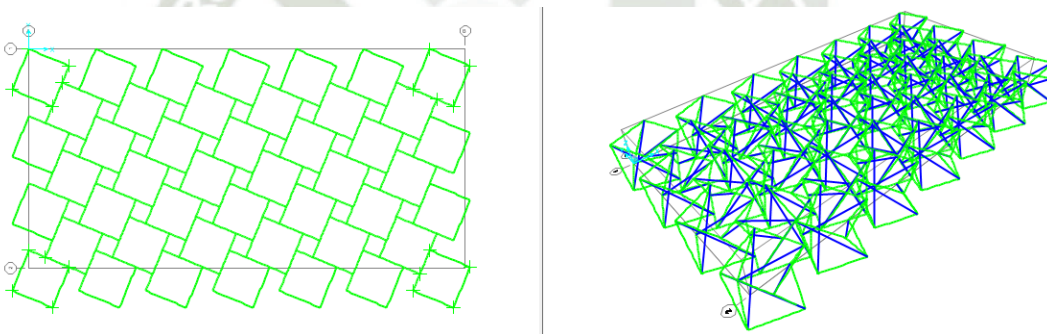
Modelado de Malla Cuádruplex Unión Conexión Arista-Arista 2.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 118

Modelado de Malla Cuádruplex Unión Conexión Arista-Arista 3.



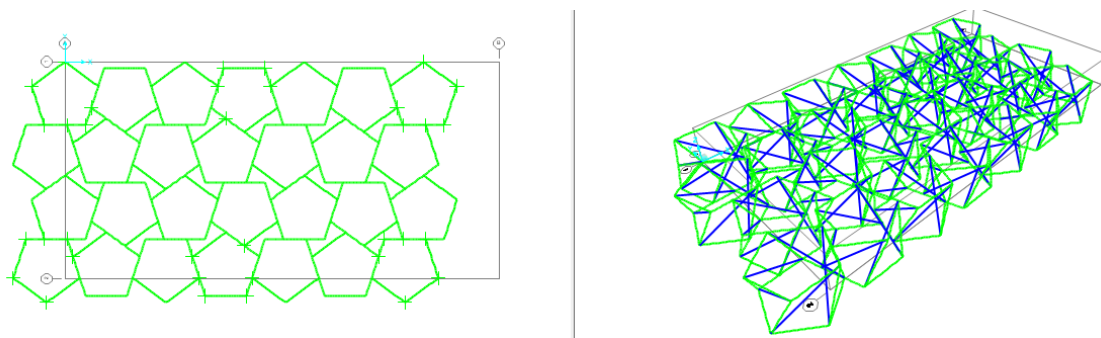
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.2.3. *Quíntuplex*

En esta familia existen solo dos mallas, y al igual que la anterior, ambas tienen la misma unión (Conexión arista-arista). Las 2 mallas tuvieron resultados positivos tras el análisis de fuerzas.

Figura 119

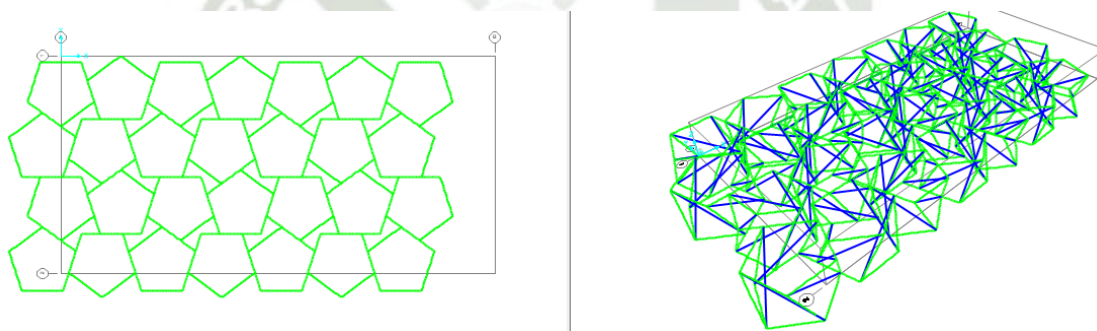
Modelado de Malla Quíntuplex Unión Conexión Arista-Arista 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 120

Modelado de Malla Quíntuplex Unión Conexión Arista-Arista 2.



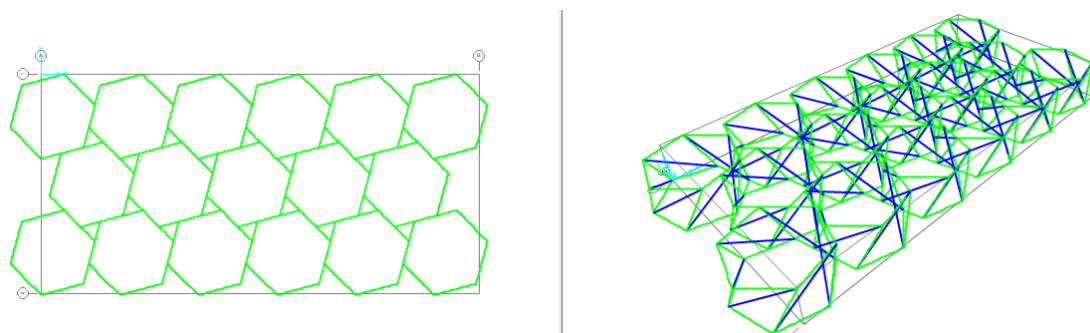
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.2.4. Séxtuplex

Para esta familia, existen 3 coberturas, las cuales también tienen el mismo tipo de unión (Conexión arista-arista). Todas tuvieron resultados óptimos tras el análisis con fuerzas de viento.

Figura 121

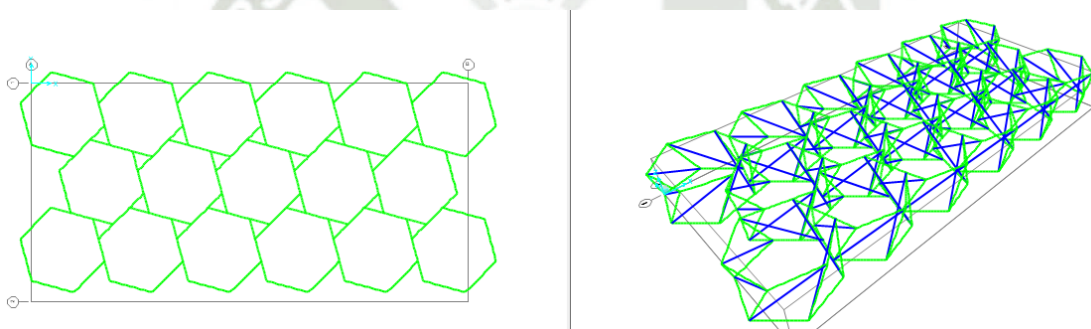
Modelado de Malla Séxtuplex Unión Conexión Arista-Arista 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 122

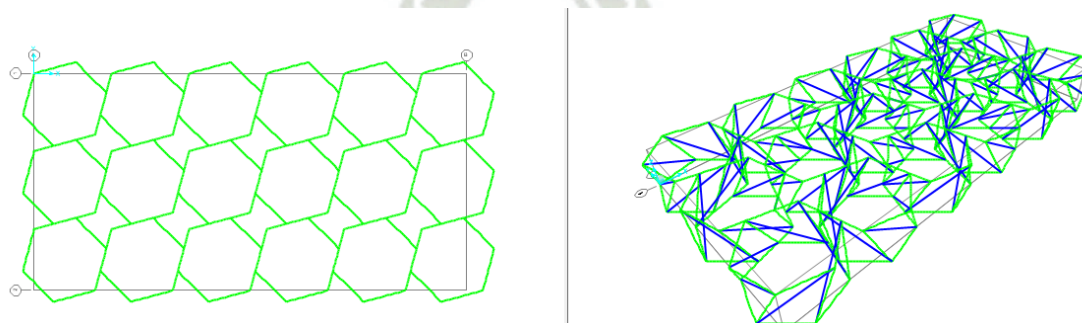
Modelado de Malla Séxtuplex Unión Conexión Arista-Arista 2.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 123

Modelado de Malla Séxtuplex Unión Conexión Arista-Arista 3.



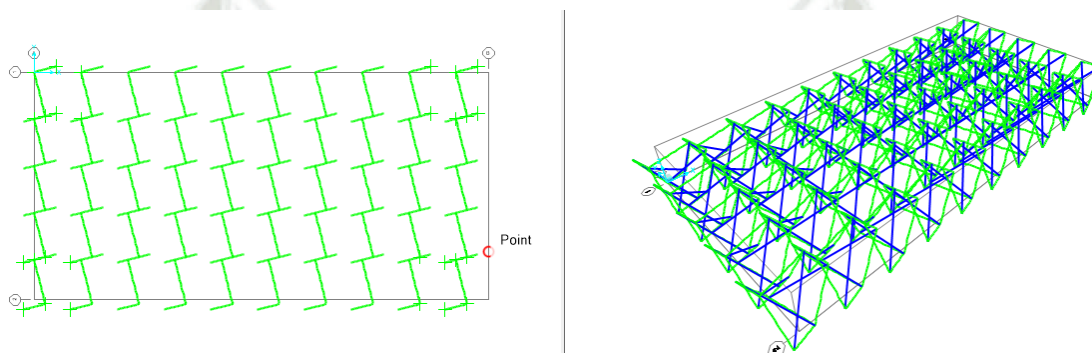
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia

9.2.5. *Quastrut-S*

Las mallas con módulos *Quastrut-S*, que siguen un patrón distinto al de las anteriores y logran 2 mallas con un tipo de unión especial (Conexión arista-arista a medias), obtienen buenos resultados tras el análisis previo.

Figura 124

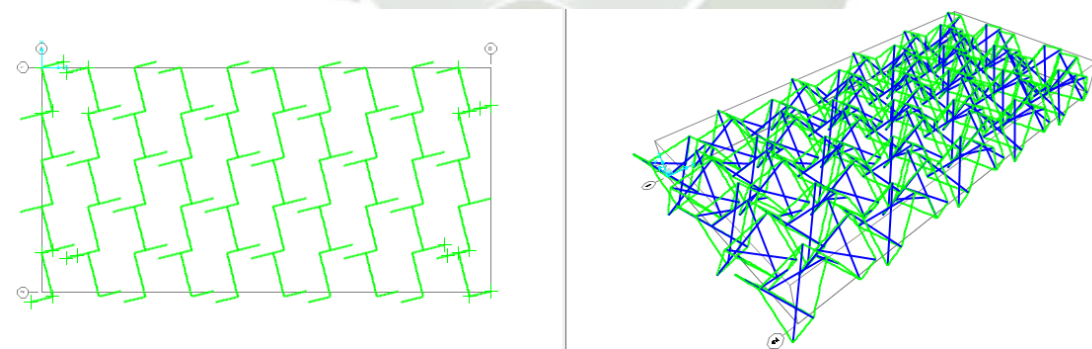
Modelado de Malla Quastrut-S Conexión Arista a medias 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 125

Modelado de Malla Quastrut-S Conexión Arista a medias 2.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

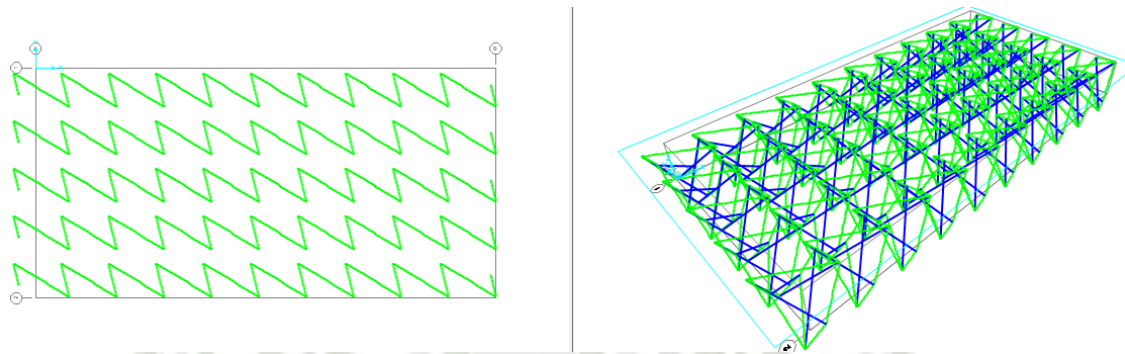
9.2.6. *Quastrut-Z*

Esta familia de mallas, que son muy similares a las anteriores, tiene dos tipos de mallas también, las cuales no logran obtener resultados positivos al momento de analizarlas

frente a fuerzas verticales de viento, debido a la configuración que tienen, la cual las hace inestables al momento de juntar los módulos.

Figura 126

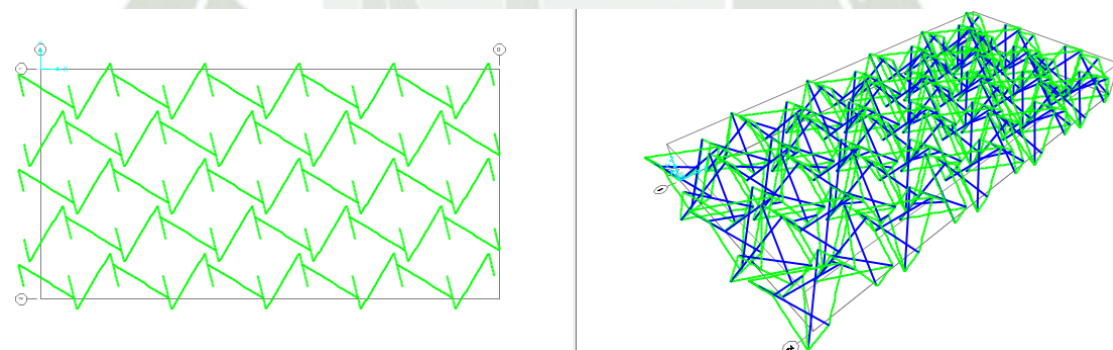
Modelado de Malla Quastrut-Z Conexión Arista a medias 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 127

Modelado de Malla Quastrut-Z Conexión Arista a medias 2.



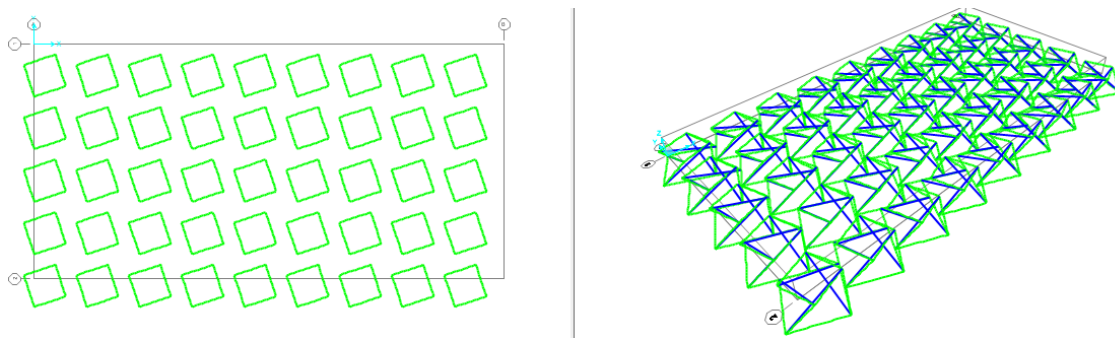
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.2.7. Medio Cuboctaedro

Esta familia de mallas que tiene configuraciones muy diferentes a las vistas hasta ahora, y que logra obtener 2 mallas con un mismo tipo de unión (Conexión arista -arista en una sola capa), presenta resultados positivos en ambas cuando se analizan bajo las cargas de viento dadas.

Figura 128

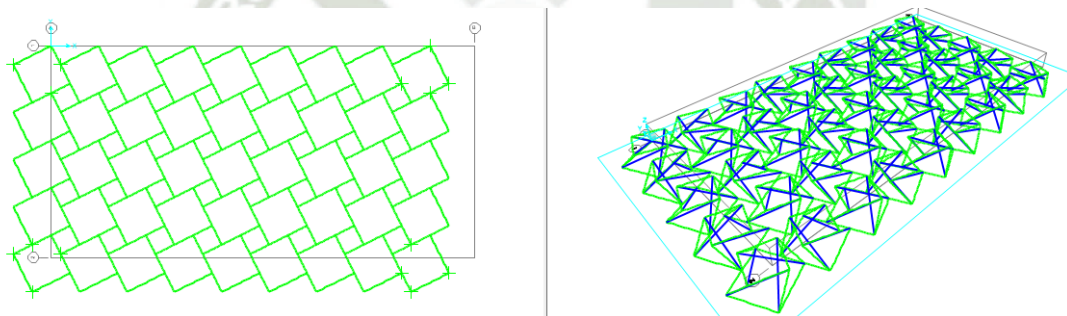
Modelado de Malla Medio Cuboctaedro Conexión Arista en una sola capa 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 129

Modelado de Malla Medio Cuboctaedro Conexión Arista en una sola capa 2.



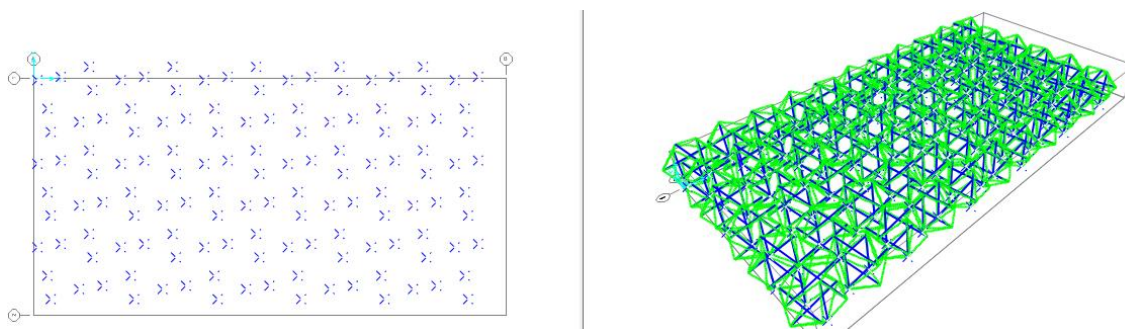
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.2.8. *Octaedro Expandido*

Esta familia de módulos con 2 mallas tensegríticas obtenidas, y con conexiones unilaterales, logra también resultados positivos tras el análisis de cargas de viento respectivo.

Figura 130

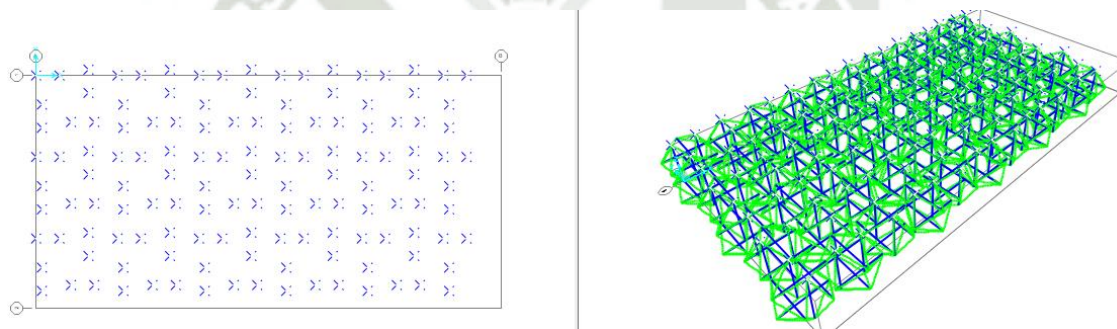
Modelado de Malla Octaedro Expandido Conexión Unilateral 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 131

Modelado de Malla Octaedro Expandido Conexión Unilateral 2.



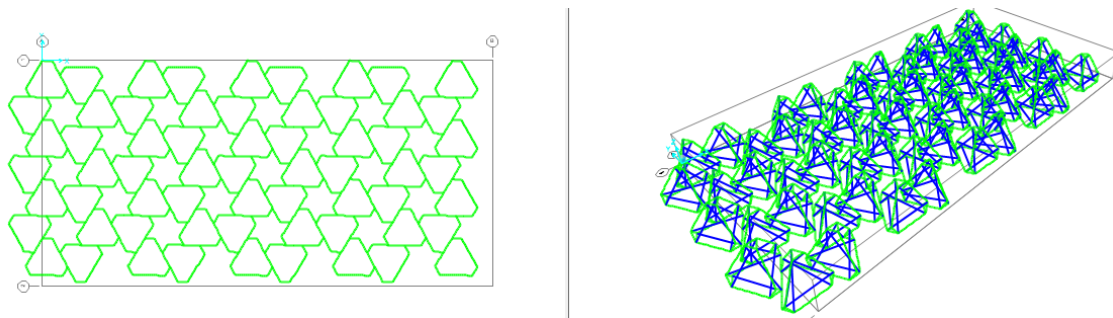
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.2.9. Tetraedro Truncado

Para esta última familia de módulos, con 2 mallas tensegríticas obtenidas, y con el tipo de unión especial ya usado en mallas anteriores (Conexión arista-arista en una sola capa), se logran resultados óptimos en ambas luego de analizarlas bajo las cargas de viento conocidas.

Figura 132

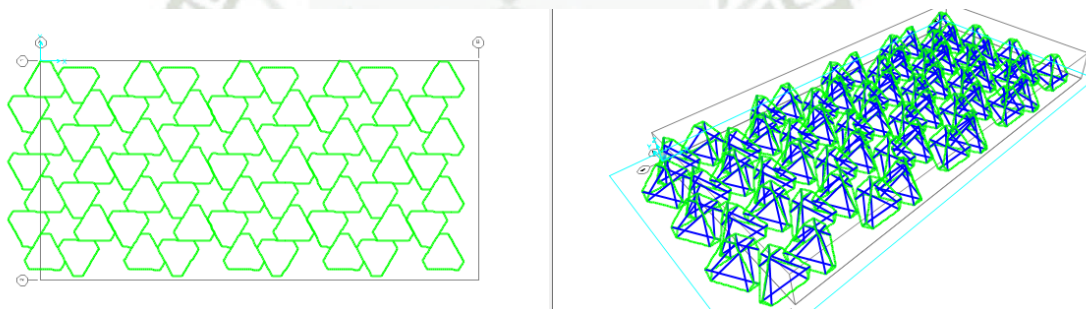
Modelado de Malla Tetraedro Truncado Conexión Arista en una sola capa 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 133

Modelado de Malla Tetraedro Truncado Conexión Arista en una sola capa 2.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

La tabla 19 muestra las características generales tomadas tras el modelado de cada una de las mallas tensegríticas tras la unión de los Módulos tensegríticos.

Tabla 19

Características generales de Mallas generadas por Módulos Tensegríticos.

	Tipos de mallas tensegríticas por Módulos	Área Real de malla(m ²)	Área de columnas (m ²)	Apoyos x columna	Fuerza del viento (kgf)	Nudos centrales	Nudos externos	Forma
1	MALLA SIMPLEX Unión Lateral	50.32	1.00	5-6	1527.12	171	27	Irregular
2	MALLA SIMPLEX Unión Bilateral	50.35	1.00	4-5	1527.83	155	25	Irregular
3	MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista	52.99	1.00	4-5-6	1608.04	277	20	Irregular
4	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	56.17	1.17	4	1704.45	152	28	Regular
5	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.17	1.17	4	1704.45	152	28	Regular
6	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	61.88	1.71	5.00	1877.90	162	22	Regular
7	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	56.68	2.14	6.00	1720.12	130	10	Regular
8	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.68	2.14	6.00	1720.12	130	10	Regular
9	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	54.89	2.80	4-5	1665.75	86	16	SemiRegular
10	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	54.90	2.80	4-5	1665.93	86	16	Regular

11	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	60.13	2.80	4	1824.82	90	18	Regular
12	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1	50.88	1.33	7	1544.06	172	28	Regular
13	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2	55.97	1.33	5-6-7	1698.46	185	15	Irregular
14	MALLA QUASTRUT-Z Conexión Arista a medias 1	50.88	1.47	7-8	1544.06	172	28	Regular
15	MALLA QUASTRUT-Z Conexión Arista a medias 2	55.97	1.47	6-7	1698.46	185	15	Irregular
16	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1	52.80	1.25	4	1602.25	152	28	Regular
17	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2	52.80	1.25	4	1602.25	152	28	Regular
18	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	45.87	1.00	4	1391.95	115	17	Regular
19	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	43.94	1.00	4	1333.31	115	17	SemiRegular
20	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1	40.59	1.01	6-8	1231.65	174	15	Irregular
21	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2	40.59	1.01	6-8	1231.65	174	15	Irregular

9.3. Modelado y Análisis de mallas tensegríticas formadas por manipulaciones Rot-Umbela

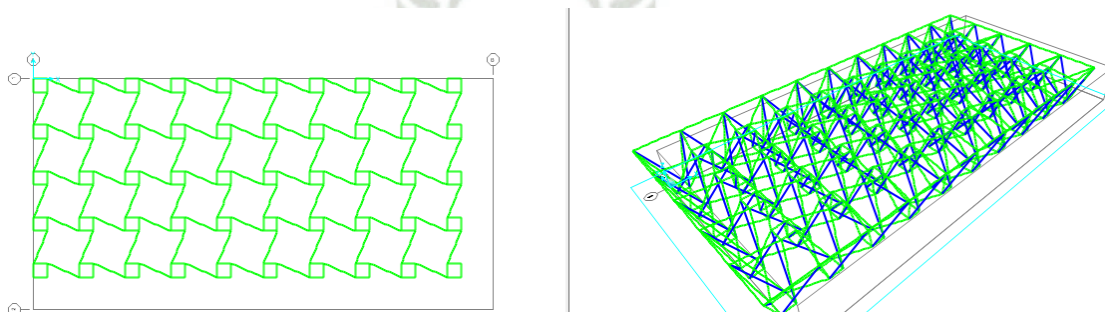
Entrando al segundo grupo de mallas, se mostrará cada una de ellas, aclarando si se tuvo resultados positivos o negativos tras el análisis respectivo; al finalizar este apartado se mostrará también un cuadro con las características principales de cada una de ellas (características y propiedades generales tras el modelado).

9.3.1. *Space Deck*

En la familia de las “Space Deck”, como ya se vio en el capítulo 7, se logran obtener 6 mallas diferentes, con distintas uniones y configuraciones, incluso con dos variantes de tensores, unas donde se usan los que existen inicialmente y otras donde se adicionan algunos tensores más. A pesar de tener varias mallas de este tipo, solo una de estas logra tener resultados positivos, ya que las fuerzas en sus elementos son redundantes y desequilibradas ante fuerzas externas de viento, por lo que se considera a 5 mallas inestables. La única malla que logró buenos resultados en todo este grupo de Manipulaciones Rot-Umbela fue la tercera forma de la Space Deck con tensores iniciales.

Figura 134

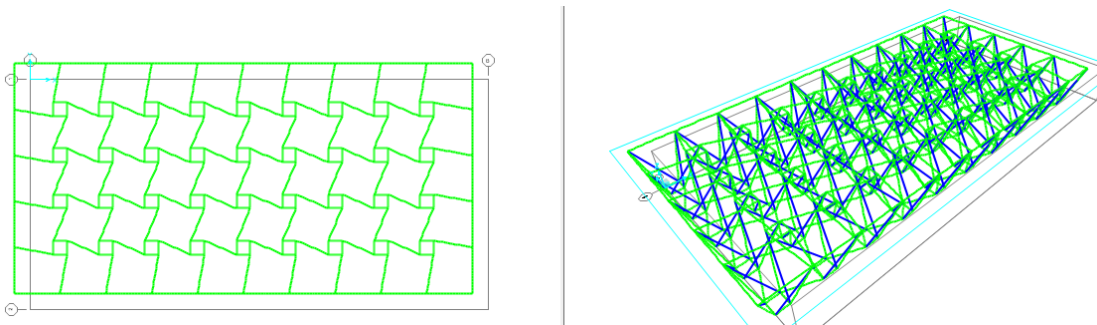
Modelado de Malla Space Deck con Tensores Adicionales Forma 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 135

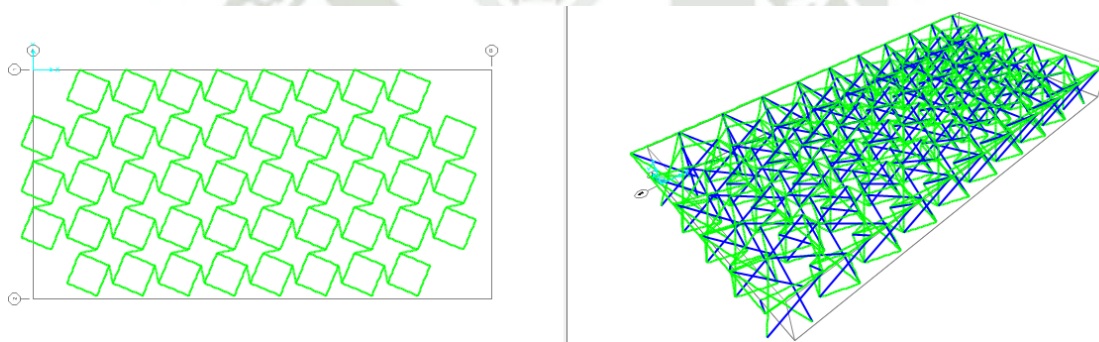
Modelado de Malla Space Deck con Tensores Adicionales Forma 2.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 136

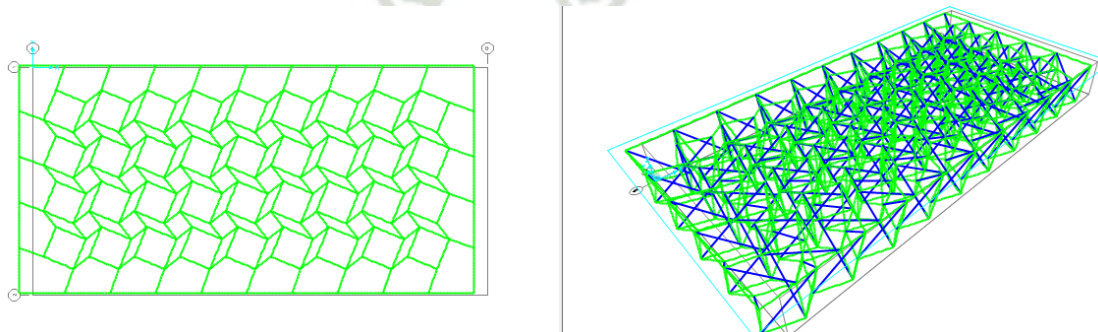
Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 137

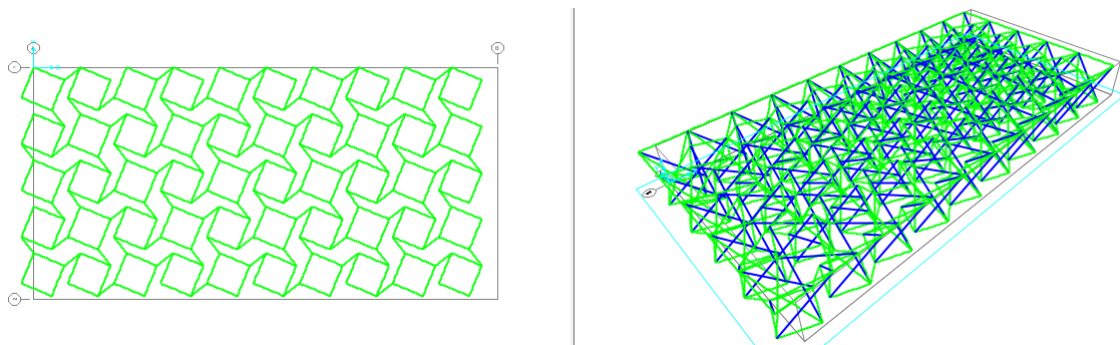
Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 2.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 138

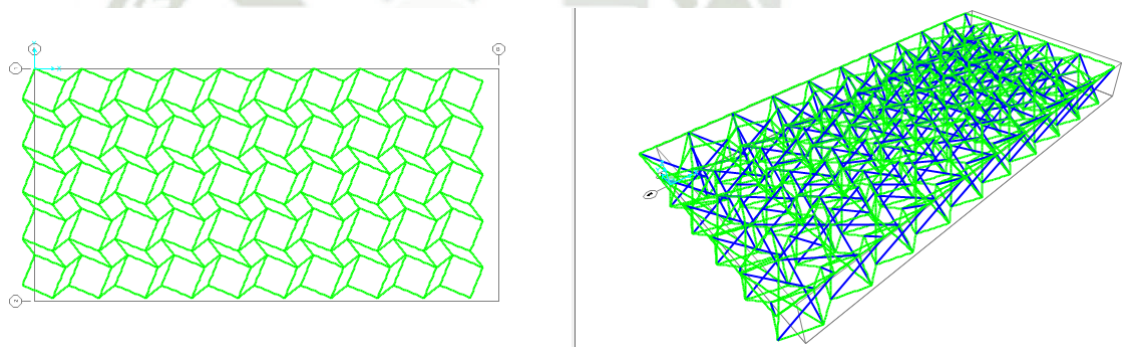
Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 3.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 139

Modelado de Malla Space Deck con Tensores Iniciales Forma 4.



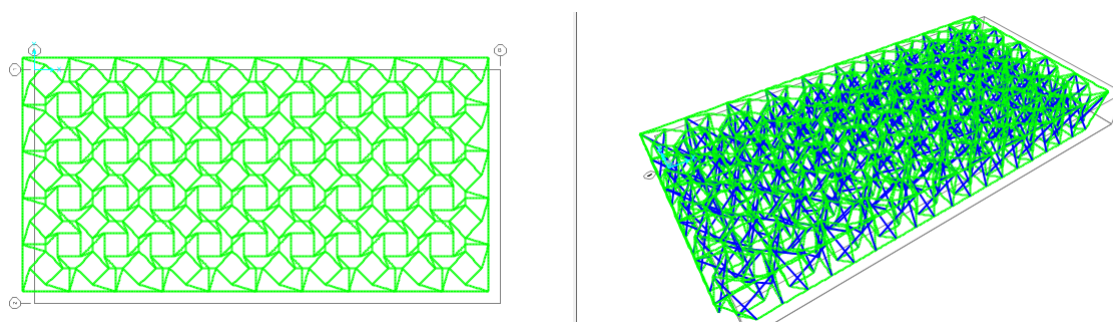
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.3.2. Malla Plana con Separadores V44

En esta familia de mallas, donde solo se logra una cubierta, ocurre lo mismo que en las anteriores, la malla a pesar de tener varios elementos tensores y compresores no logra una configuración adecuada para resistir las fuerzas de viento, obteniendo elementos redundantes y haciendo a la malla inestable; por consiguiente, esta malla tampoco obtiene resultados favorables tras su análisis.

Figura 140

Modelado de Malla Plana con Separadores V44.



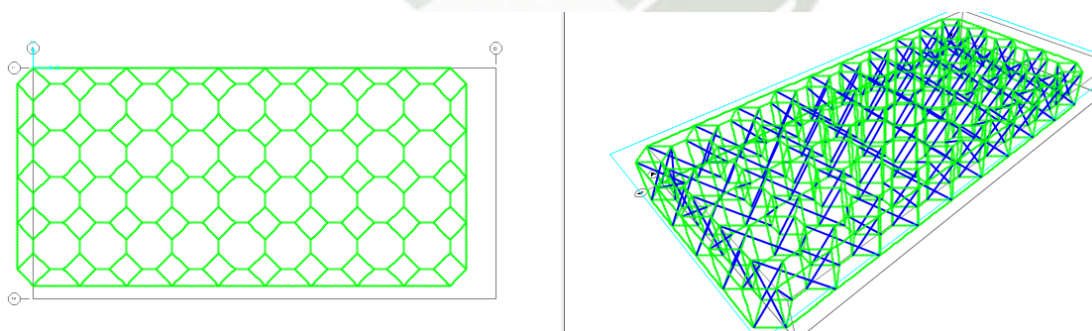
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.3.3. *Malla Bidireccional Cuadrada Compensada*

De igual forma a la familia anterior, solo existe una malla de este tipo, pero nuevamente tras su análisis, no se logra obtener resultados óptimos para soportar cargas de viento externas en la capa superior.

Figura 141

Modelado de Malla Bidireccional Cuadrada Compensada.



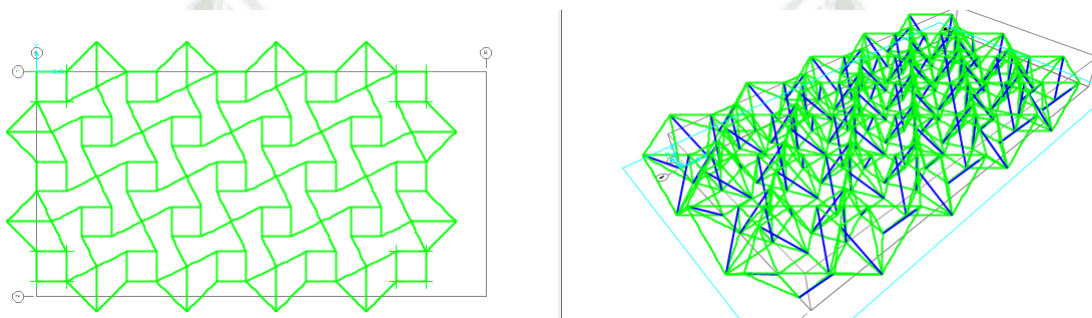
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.3.4. Malla Bidireccional Cuadrada Diferencial

Para esta familia donde solo existen 2 mallas, tras sus análisis respectivos, ninguna logra tener buenos resultados al momento de resistir las fuerzas de viento ejercidas sobre los puntos superiores de la cubierta.

Figura 142

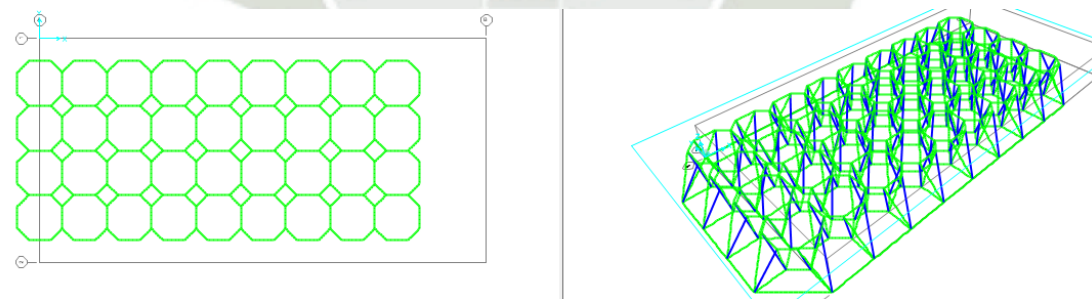
Modelado de Malla Bidireccional Cuadrada Diferencial 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 143

Modelado de Malla Bidireccional Cuadrada Diferencial 2.



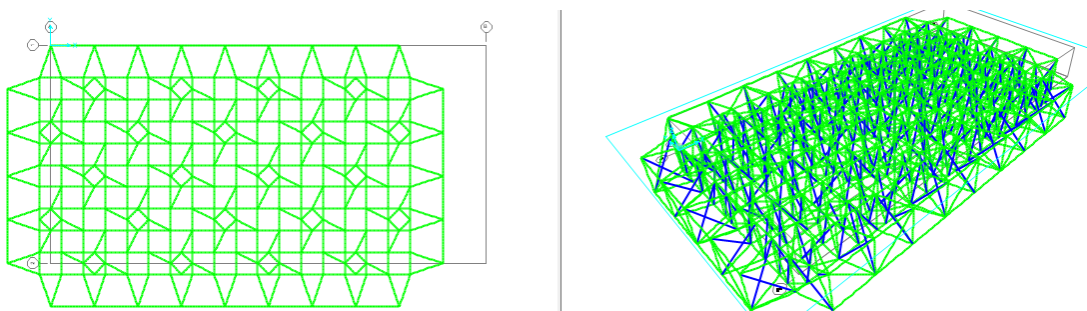
Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

9.3.5. Malla Directa o Triangulada

Esta familia de mallas, pese a tener 4 mallas diferentes, no logra resultados óptimos en ninguna de ellas, nuevamente debido a la redundancia en sus elementos y su posible inestabilidad ante eventos de cargas externas.

Figura 144

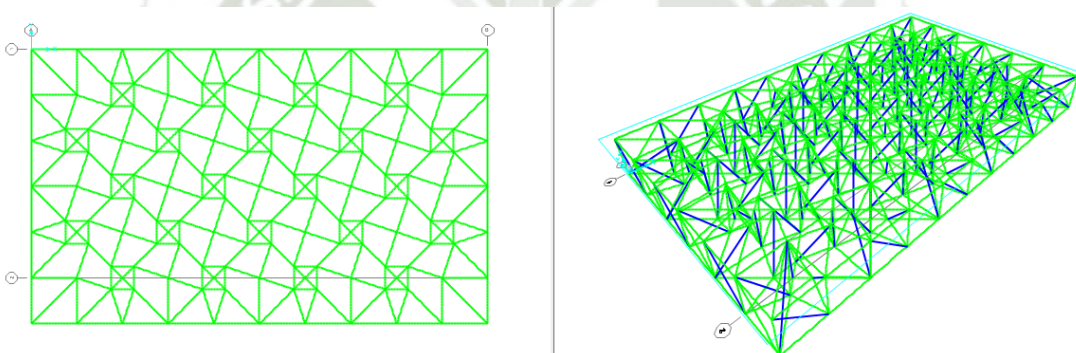
Modelado de Malla Directa o Triangulada 1.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 145

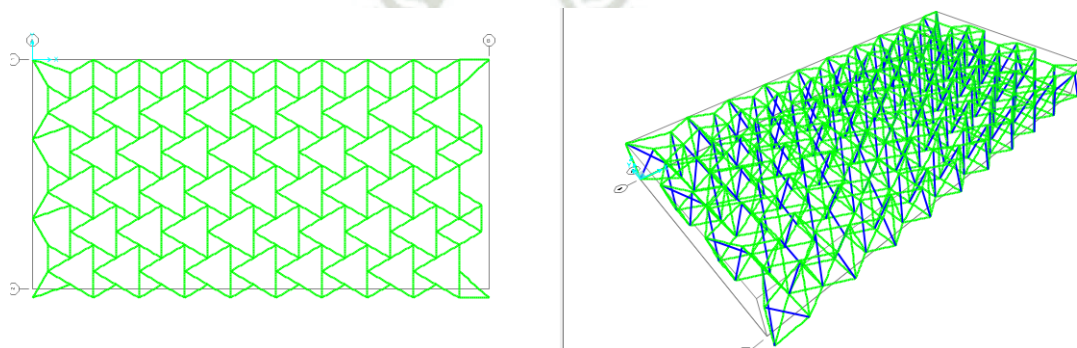
Modelado de Malla Directa o Triangulada 2.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 146

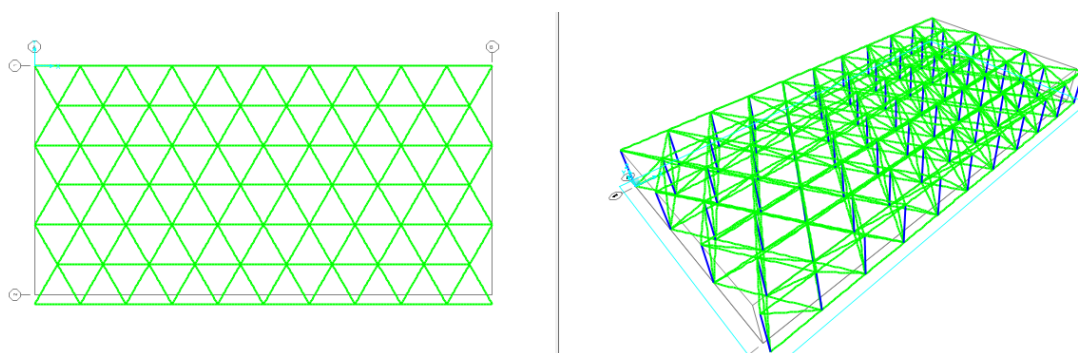
Modelado de Malla Directa o Triangulada 3.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 147

Modelado de Malla Directa o Triangulada 4.



Nota. Modelado mediante el programa SAP2000. Elaboración propia.



La tabla 20 muestra las propiedades generales y características importantes que se tomaron tras el modelado de cada una de las mallas formadas por Manipulaciones Rot-Umbela.

Tabla 20

Características generales de Mallas generadas por la Manipulación Rot-Umbela.

	Tipos de mallas tensegríticas por Manipulaciones Rot-Umbela	Area Real de malla(m ²)	Área de columnas (m ²)	Apoyos x columna	Fuerza del viento (kgf)	Nudos centrales	Nudos externos	Forma
1	SPACE DECK Tensores adicionales Forma 1	50.00	1.00	9	1517.28	144	30	Regular
2	SPACE DECK Tensores adicionales Forma 2	49.99	1.00	9	1516.84	144	30	Regular
3	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 1	50.00	1.00	6	1517.28	144	30	Regular
4	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 2	50.00	1.00	6	1517.28	144	30	Regular
5	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3	50.00	1.00	6	1517.28	144	30	Regular
6	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 4	50.00	1.00	6	1517.28	144	30	Regular
7	MALLA PLANA CON SEPARADORES V44	50.00	1.00	12	1517.28	429	30	Regular
8	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 1	60.00	1.00	5	1820.74	268	28	Regular
9	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 2	60.00	1.00	5	1820.74	133	32	Regular
10	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 3	51.96	1.00	3-4	1576.85	163	24	SemiRegular
11	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 4	51.96	1.00	3	1576.80	48	26	Regular
12	MALLA BIDIRECCIONAL CUADRADA DIFERENCIAL 1	60.00	1.00	4	1820.74	110	16	Regular
13	MALLA BIDIRECCIONAL CUADRADA DIFERENCIAL 2	36.00	1.00	4	1092.44	118	52	Regular
14	MALLA BIDIRECCIONAL CUADRADA COMPENSADA	45.69	1.00	6	1386.56	170	30	Regular

CAPÍTULO X

10. RESULTADOS Y COMPARACIÓN GLOBAL DE MALLAS TENSEGRÍTICAS

Finalizando con este trabajo, en este capítulo se mostrarán 5 apartados, en el primero se mostrarán los resultados de las 35 mallas del modelado anterior tras sus análisis respectivos, mostrando las fuerzas internas máximas de los elementos y las reacciones máximas de los apoyos (tabla 21); en el segundo apartado se mostrarán otras 2 tablas, comparando estas mismas características de la tabla 21 pero ahora solo con 20 mallas (mallas funcionales), una de estas tablas tendrá los mismos resultados de antes, tras el análisis con 4 columnas como apoyos, y la otra tabla tendrá los resultados del análisis adicional con 2 columnas más; en el tercer apartado se mostrará una comparación con los desplazamientos máximos y mínimos que tiene cada malla funcional tras el análisis con cargas de viento; en el cuarto y quinto apartado, para finalizar con este capítulo, se darán las observaciones y conclusiones respectivas de la comparación final con ambos tipos de mallas tensegríticas, obteniendo así una malla tensegrítica final representativa que será la que se usará para la comparación con la cobertura convencional.

10.1. Resultados del Análisis global de Mallas Tensegríticas

Tabla 21

Resultados generales de Fuerzas y Reacciones de Todas las Mallas Tensegríticas.

	Tipos de mallas	Fuerza del viento (kgf)	Fuerza máxima de elementos (kgf)	Fuerza mínima de elementos (kgf)	Promedio de fuerzas internas (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Cantidad de elementos
1	MALLA SIMPLEX Unión Lateral	1527.22	567.76	-961.96	60.57	349.60	-311.79	1122
2	MALLA SIMPLEX Unión Bilateral	1527.72	700.00	-1039.41	80.16	470.97	-447.96	878
3	MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista	1607.83	632.93	-991.09	69.30	554.23	-376.77	1476
4	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	1704.47	653.61	-923.41	96.83	281.25	-206.14	872
5	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	1704.54	630.86	-894.45	94.92	328.87	-121.65	872
6	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	1879.66	824.95	-1227.79	104.21	754.45	-771.65	880
7	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	1720.01	589.81	-750.22	68.64	374.22	-299.34	650
8	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	1719.99	298.82	-451.69	31.06	325.25	-208.38	650
9	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	1665.47	872.41	-1035.22	88.54	782.07	-652.94	476
10	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	1665.87	536.78	-699.66	105.03	396.53	-193.59	476
11	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	1824.49	305.26	-480.34	32.80	360.91	-289.34	486
12	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1	1544.13	705.41	-628.56	101.11	348.50	-339.99	785
13	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2	1696.30	979.99	-901.25	115.05	587.08	-343.37	785
14	MALLA QUASTRUT-Z Conexión Arista a medias 1	1544.06	-	-	-	-	-	-
15	MALLA QUASTRUT-Z Conexión Arista a medias 2	1698.46	-	-	-	-	-	-
16	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1	1602.23	866.93	-1327.30	111.14	261.24	-151.28	796

17	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2	1602.24	929.90	-1322.92	110.88	262.96	-139.44	796
18	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	1383.81	337.31	-682.96	37.67	459.52	-215.13	2210
19	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	1333.27	318.69	-673.36	37.40	439.37	-129.54	2240
20	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1	1231.51	581.13	-402.40	33.96	360.25	-281.15	1594
21	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2	1231.51	521.15	-468.93	34.10	427.20	-295.20	1594
22	SPACE DECK Tensores adicionales Forma 1	1517.28	-	-	-	-	-	-
23	SPACE DECK Tensores adicionales Forma 2	1516.84	-	-	-	-	-	-
24	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 1	1517.28	-	-	-	-	-	-
25	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 2	1517.28	-	-	-	-	-	-
26	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3	1517.35	730.05	-912.98	17.24	636.15	-619.86	944
27	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 4	1517.28	-	-	-	-	-	-
28	MALLA PLANA CON SEPARADORES V44	1517.28	-	-	-	-	-	-
29	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 1	1820.74	-	-	-	-	-	-
30	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 2	1820.74	-	-	-	-	-	-
31	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 3	1576.85	-	-	-	-	-	-
32	MALLA DIRECTA O TRIANGULADA 4	1576.80	-	-	-	-	-	-
33	MALLA BIDIRECCIONAL CUADRADA DIFERENCIAL 1	1820.74	-	-	-	-	-	-
34	MALLA BIDIRECCIONAL CUADRADA DIFERENCIAL 2	1092.44	-	-	-	-	-	-
35	MALLA BIDIRECCIONAL CUADRADA COMPENSADA	1386.56	-	-	-	-	-	-

Como se mencionó previamente, algunas mallas tensegríticas después de haberlas modelado y analizarlas, no obtuvieron resultados positivos, es por esa razón que en el cuadro anterior se ven muchos datos vacíos ya que directamente en el programa no se muestran los resultados. Esto sucede por diversas razones, una de ellas es porque la tensegridad es un sistema muy delicado en cuanto a geometrías y configuraciones, ya que solo lleva dos tipos de fuerza (compresión y tracción), y si en algún punto de la malla no hay equilibrio cuando se resiste fuerzas externas, toda la malla presenta fallas, ya que no tiene de donde soportar dichas fuerzas en alguna dirección en específico (compresión y tensión son fuerzas axiales en una sola dirección); otra razón es debido a que, al haber tantos elementos en estas mallas, cuando se resisten las fuerzas de viento, muchos de los elementos son nulos y el programa se carga redundantemente de fuerzas, haciendo a la malla muy inestable e incapaz de distribuir las fuerzas equilibradamente. Como conclusiones de esta comparación global, se puede observar claramente que todas las mallas tensegríticas conformadas por módulos tienen buenos resultados, a excepción de la malla con Quastrut-Z, ya que de por sí dicho elemento es inestable en uno de sus puntos, por lo que la malla en conjunto también lo es; por otro lado, sucede lo contrario con las mallas formadas por las manipulaciones Rot-Umbela, donde ninguna tiene resultados óptimos cuando se les cargan con las fuerzas de viento, a excepción de una, la cual es la Space Deck en su tercera forma creada con tensores iniciales.

Por ende, a partir de ahora solo se mostrarán resultados de las siguientes mallas:

- MALLA SIMPLEX Unión Lateral
- MALLA SIMPLEX Unión Bilateral
- MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista
- MALLA CUADRÚPLEX Unión Conexión Arista-Arista1

- MALLA CUADRÚPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2
- MALLA CUADRÚPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3
- MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1
- MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2
- MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3
- MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1
- MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2
- MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3
- MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1
- MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2
- MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1
- MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2
- MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1
- MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2
- MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1
- MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2
- SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3

10.2. Resultados de Fuerzas y Reacciones máximas de Mallas Tensegríticas funcionales

Como se adelantó antes, en este apartado se verán 2 tablas; la 1ra será un resumen de la anterior (únicamente con las mallas funcionales), y la 2da mostrará los resultados tras el análisis adicional mencionado, con dos columnas más en la mitad de la longitud más larga.

Tabla 22

Resultados generales de Fuerzas y Reacciones de las Mallas Tensegríticas funcionales con solo 4 columnas como apoyo.

	Tipos de mallas	Área Real de malla (m ²)	Área de columnas (m ²)	Apoyo x col	Fuerza del viento (kgf)	Fuerza máxima de elementos (kgf)	Fuerza mínima de elementos (kgf)	Promedio de fuerzas internas (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Cant. de elementos
1	MALLA SIMPLEX Unión Lateral	50.32	1.00	5-6	1527.22	567.76	-961.96	60.57	349.60	-311.79	1122
2	MALLA SIMPLEX Unión Bilateral	50.35	1.00	4-5	1527.72	700.00	-1039.41	80.16	470.97	-447.96	878
3	MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista	52.99	1.00	4-5-6	1607.83	632.93	-991.09	69.30	554.23	-376.77	1476
4	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	56.17	1.17	4	1704.47	653.61	-923.41	96.83	281.25	-206.14	872
5	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.17	1.17	4	1704.54	630.86	-894.45	94.92	328.87	-121.65	872
6	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	61.88	1.71	5	1879.66	824.95	-1227.79	104.21	754.45	-771.65	880
7	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	56.68	2.14	6	1720.01	589.81	-750.22	68.64	374.22	-299.34	650
8	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.68	2.14	6	1719.99	298.82	-451.69	31.06	325.25	-208.38	650

9	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	54.89	2.80	4-5	1665.47	872.41	-1035.22	88.54	782.07	-652.94	476
10	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	54.90	2.80	4-5	1665.87	536.78	-699.66	105.03	396.53	-193.59	476
11	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	60.13	2.80	4	1824.49	305.26	-480.34	32.80	360.91	-289.34	486
12	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1	50.88	1.33	7	1544.13	705.41	-628.56	101.11	348.50	-339.99	785
13	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2	55.97	1.33	5-6-7	1696.30	979.99	-901.25	115.05	587.08	-343.37	785
14	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1	52.80	1.25	4	1602.23	866.93	-1327.30	111.14	261.24	-151.28	796
15	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2	52.80	1.25	4	1602.24	929.90	-1322.92	110.88	262.96	-139.44	796
16	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	45.87	1.00	4	1383.81	337.31	-682.96	37.67	459.52	-215.13	2210
17	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	43.94	1.00	4	1333.27	318.69	-673.36	37.40	439.37	-129.54	2240
18	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1	40.59	1.01	6-8	1231.51	581.13	-402.40	33.96	360.25	-281.15	1594
19	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2	40.59	1.01	6-8	1231.51	521.15	-468.93	34.10	427.20	-295.20	1594
20	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3	50.00	1.00	6	1517.35	730.05	-912.98	17.24	636.15	-619.86	944

Tabla 23

Resultados generales de Fuerzas y Reacciones de las Mallas Tensegríticas funcionales con 6 columnas como apoyo.

	Tipos de mallas	Área Real de malla (m ²)	Área de columnas (m ²)	Apoyos adicionales x columna	Fuerza del viento (kgf)	Fuerza máxima de elementos (kgf)	Fuerza mínima de elementos (kgf)	Promedio de fuerzas internas (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Cantidad de elementos
1	MALLA SIMPLEX Unión Lateral	50.32	1.00	5-6	1527.22	262.39	-434.40	34.06	164.71	-157.93	1122
2	MALLA SIMPLEX Unión Bilateral	50.35	1.00	4-5	1527.72	367.78	-574.47	45.80	276.72	-279.73	878
3	MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista	52.99	1.00	5-6	1607.83	348.51	-544.96	42.44	321.24	-205.53	1476
4	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	56.17	1.17	4	1704.47	324.77	-469.70	62.07	156.47	-110.82	872
5	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.17	1.17	4	1704.54	337.64	-451.94	59.51	170.57	-82.56	872
6	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	61.88	1.71	6	1879.66	474.01	-701.23	64.65	453.39	-454.30	880
7	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	56.68	2.14	5-6	1720.01	267.22	-324.94	39.77	174.83	-129.84	650
8	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.68	2.14	5-6	1719.99	144.84	-192.66	16.35	130.53	-112.44	650
9	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	54.89	2.80	6-7	1665.47	470.35	-505.51	46.44	397.17	-284.69	476
10	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	54.90	2.80	6	1665.87	485.72	-721.31	56.42	585.29	-575.59	476
11	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	60.13	2.80	5	1824.49	268.22	-362.27	20.41	238.90	-210.06	486

12	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1	50.88	1.33	6	1544.13	434.24	-390.50	65.16	405.95	-414.44	785
13	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2	55.97	1.33	5-9	1696.30	484.37	-447.68	70.88	375.41	-311.70	785
14	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1	52.80	1.25	4	1602.23	514.86	-805.74	78.25	149.57	-133.30	796
15	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2	52.80	1.25	4	1602.24	540.55	-807.93	77.89	149.30	-125.33	796
16	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	45.87	1.00	3	1383.81	196.45	-356.86	21.32	238.34	-79.07	2210
17	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	43.94	1.00	3	1333.27	190.69	-359.10	21.69	231.52	-54.65	2240
18	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1	40.59	1.01	7-8	1231.51	-	-	-	-	-	-
19	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2	40.59	1.01	7-8	1231.51	293.44	-225.82	17.49	206.28	-151.12	1594
20	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3	50.00	1.00	5	1517.35	217.63	-352.93	9.67	248.05	-195.35	944

10.3. Resultados de Desplazamientos máximos de Mallas Tensegríticas funcionales

En este apartado se mostrarán los desplazamientos máximos y mínimos que obtiene cada una de las 20 mallas tensegríticas funcionales, tanto para el sentido “x” como para “y” y para “z” (sentido más importante en el desplazamiento). Estos resultados se obtienen después del análisis elástico ante cargas de viento; cada malla recibe sus adecuadas cargas de viento tras la distribución de área tributaria que se hizo antes.

Tabla 24

Desplazamientos de Mallas Tensegríticas funcionales en el sentido "x", tras el análisis elástico ante carga de viento.

Tipos de mallas	Desplazamientos con apoyos normales (Sentido "x")		Desplazamientos con apoyos adicionales (Sentido "x")	
	MAX (m)	MIN (m)	MAX (m)	MIN (m)
1 MALLA SIMPLEX Unión Lateral	0.0439	-0.0445	0.0264	-0.0230
2 MALLA SIMPLEX Unión Bilateral	0.0424	-0.0362	0.0353	-0.0311
3 MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista	0.0396	-0.0353	0.0301	-0.0227
4 MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.0624	-0.0624	0.0414	-0.0414
5 MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.0540	-0.0542	0.0317	-0.0320
6 MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	0.0584	-0.0585	0.0432	-0.0432
7 MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.1171	-0.1171	0.0850	-0.0866
8 MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.1918	-0.1824	0.2083	-0.2090
9 MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.1705	-0.1409	0.2450	-0.1975
10 MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.0728	-0.0728	0.1380	-0.1376
11 MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	0.3064	-0.3644	0.3523	-0.3831
12 MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1	0.0373	-0.0374	0.0270	-0.0270
13 MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2	0.0469	-0.0529	0.0317	-0.0338

14	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1	0.0426	-0.0426	0.0325	-0.0325
15	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2	0.0426	-0.0426	0.0320	-0.0320
16	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	0.0248	-0.0256	0.0172	-0.0175
17	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	0.0253	-0.0303	0.0164	-0.0192
18	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1	0.1088	-0.1213	0.1088	-0.1213
19	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2	0.1439	-0.1278	0.1518	-0.1279
20	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3	0.2590	-0.2590	0.1747	-0.2742

Tabla 25

Desplazamientos de Mallas Tensegríticas funcionales en el sentido "y", tras el análisis elástico ante carga de viento.

Tipos de mallas	Desplazamientos con apoyos normales (Sentido "y")		Desplazamientos con apoyos adicionales (Sentido "y")	
	MAX (m)	MIN (m)	MAX (m)	MIN (m)
1 MALLA SIMPLEX Unión Lateral	0.0269	-0.0227	0.0204	-0.0266
2 MALLA SIMPLEX Unión Bilateral	0.0247	-0.0404	0.0275	-0.0331
3 MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista	0.0193	-0.0261	0.0211	-0.0276
4 MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.0468	-0.0469	0.0417	-0.0418
5 MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.0378	-0.0380	0.0319	-0.0323
6 MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	0.0525	-0.0525	0.0429	-0.0429
7 MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.0601	-0.0607	0.0788	-0.0782
8 MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.1520	-0.1769	0.2251	-0.2267
9 MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.1574	-0.1576	0.2107	-0.2005

10	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.0865	-0.0861	0.1786	-0.1783
11	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	0.4478	-0.2829	0.4571	-0.3324
12	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1	0.0430	-0.0430	0.0401	-0.0401
13	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2	0.0402	-0.0444	0.0395	-0.0405
14	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1	0.0350	-0.0350	0.0351	-0.0351
15	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2	0.0347	-0.0347	0.0349	-0.0350
16	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	0.0144	-0.0145	0.0143	-0.0140
17	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	0.0211	-0.0154	0.0163	-0.0157
18	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1	0.1368	-0.1386	0.1368	-0.1386
19	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2	0.1341	-0.1588	0.1402	-0.1548
20	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3	0.2651	-0.2442	0.2793	-0.2472

Tabla 26

Desplazamientos de Mallas Tensegríticas funcionales en el sentido "z", tras el análisis elástico ante carga de viento.

	Tipos de mallas	Desplazamientos con apoyos normales (Sentido "z")		Desplazamientos con apoyos adicionales (Sentido "z")	
		MAX (m)	MIN (m)	MAX (m)	MIN (m)
1	MALLA SIMPLEX Unión Lateral	0.0141	-0.1778	0.0047	-0.0594
2	MALLA SIMPLEX Unión Bilateral	0.0054	-0.3417	0.0024	-0.1175
3	MALLA SIMPLEX Unión Conexión Arista-Arista	0.0041	-0.2588	0.0040	-0.0981
4	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.0069	-0.2248	0.0030	-0.0946
5	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.0032	-0.2185	0.0022	-0.0888

6	MALLA CUADRUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	0.0000	-0.2841	0.0000	-0.0899
7	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.0274	-0.2622	0.0164	-0.1449
8	MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.0623	-0.6187	0.0124	-0.3129
9	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 1	0.0444	-0.4151	0.0224	-0.3170
10	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	0.0213	-0.2701	0.0208	-0.2372
11	MALLA SEXTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 3	0.0000	-1.1706	0.0000	-0.6484
12	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 1	0.0048	-0.2094	0.0006	-0.0904
13	MALLA QUASTRUT-S Conexión Arista a medias 2	0.0094	-0.2445	0.0046	-0.1003
14	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 1	0.0000	-0.3261	0.0000	-0.1546
15	MALLA MEDIO CUBOCTAEDRO Conexión Arista en una sola capa 2	0.0000	-0.3273	0.0000	-0.1573
16	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	0.0116	-0.1127	0.0083	-0.0385
17	MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	0.0110	-0.1121	0.0075	-0.0435
18	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 1	0.0039	-1.2084	0.0039	-1.2084
19	MALLA TETRAEDRO TRUNCADO Conexión Arista en una sola capa 2	0.0060	-1.4065	0.0076	-0.7318
20	SPACE DECK Tensores iniciales Forma 3	0.0648	-0.9640	0.0653	-0.5591

10.4. Observación y discusión de Resultados

Tras todos los resultados vistos previamente, se pueden hacer varias observaciones que se detallarán a continuación:

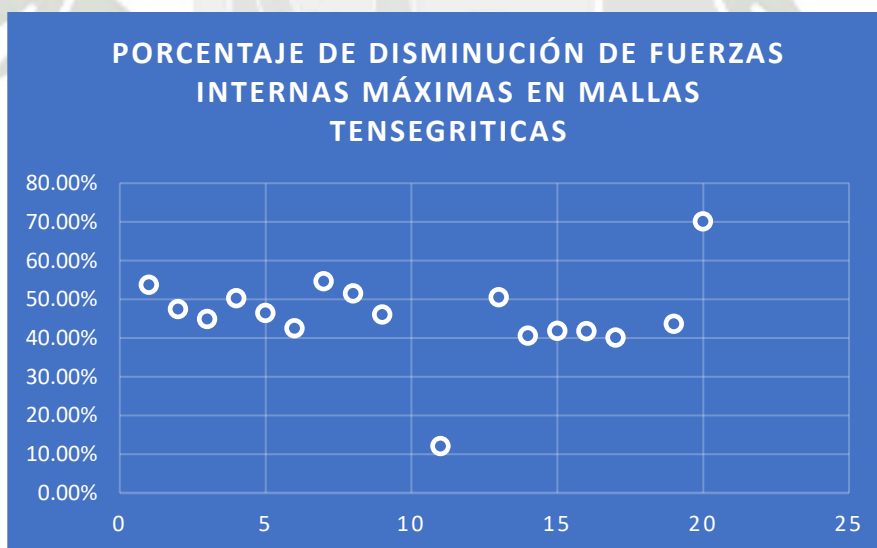
- De las 20 mallas funcionales, un 90% obtuvo resultados coherentes cuando se añadieron los apoyos adicionales; el 10% restante fueron dos mallas en específico, la “Malla Séxtuplex Conexión Arista-Arista 2” y la “Malla Quastrut-S Conexión Arista a medias 1”, las cuales son incoherentes porque se supone que si a una cobertura se le añaden apoyos, las fuerzas internas de sus elementos deben disminuir, al igual que los apoyos, los cuales deberían tener menores valores de reacción, ya que las fuerzas son distribuidas entre más apoyos; así pues, esto no ocurre en dichas mallas, las cuales tienen un incremento en las fuerzas máximas de los apoyos, y una de ellas incluso tiene un incremento de fuerzas internas máximas en los elementos. Se piensa que todo esto sucede por un círculo vicioso que ocurre en las fuerzas internas de los elementos, tal cual como sucede cuando se diseña una columna o viga de concreto armado en un pórtico de un edificio, donde se aumenta el área de una sección y su resistencia para que no esté tan exigida de fuerzas, sin embargo, al hacer eso, la viga o columna modificada termina resistiendo más fuerzas que antes, exigiéndose nuevamente de fuerzas y sobredimensionando sucesivamente así, los elementos y la estructura.

Por esta razón estas 2 mallas no se considerarán para la comparación final, ya que presentan resultados extraños y diferentes a la mayoría; esto sucede también por razones que se desconocen, ya que al ser mallas creadas desde 0, sin un procedimiento validado existente, y con una propiedad física nueva, no es posible identificar al 100% las causas.

- La malla N° 18 “Malla Tetraedro Truncado Conexión Arista en una sola capa 2”, es la única que, con apoyos adicionales, entra en conflicto y sus elementos entran en desequilibrio, ocurriendo lo mismo que con todas las mallas tensegríticas generadas por manipulaciones Rot-Umbela; por esa razón esta malla también se descartará de los resultados y de las observaciones posteriores, quedándonos únicamente con 17 mallas buenas y coherentes.
- Con todos estos datos, se generaron gráficas (figuras 148-152) que muestran todos los porcentajes de disminución en fuerzas y reacciones en las mallas, tras la adición de los 2 apoyos extras; únicamente se considerarán en las gráficas a las mallas positivas y coherentes (17 estructuras).

Figura 148

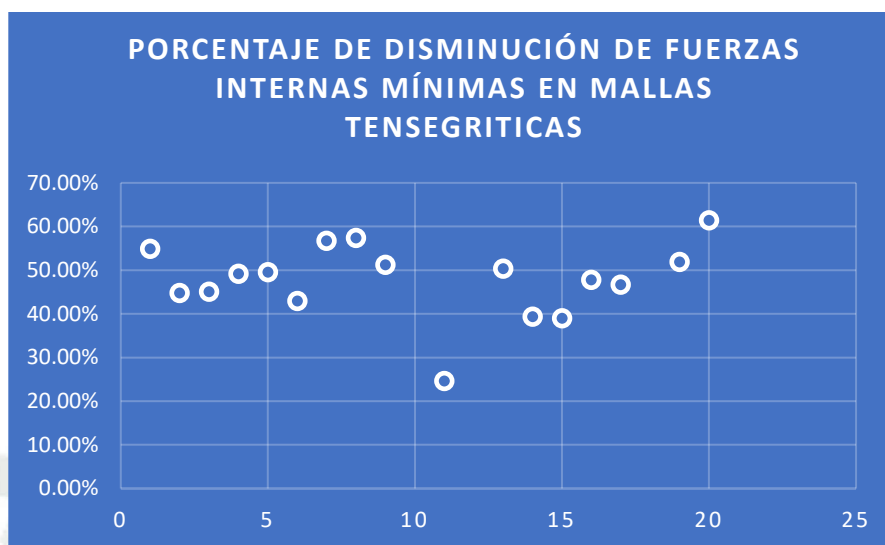
Porcentaje de Disminución de Fuerzas Internas Máximas.



Nota. Datos extraídos de un procesamiento previo de los resultados obtenidos por el programa de análisis, ordenados en el programa Excel. Elaboración propia.

Figura 149

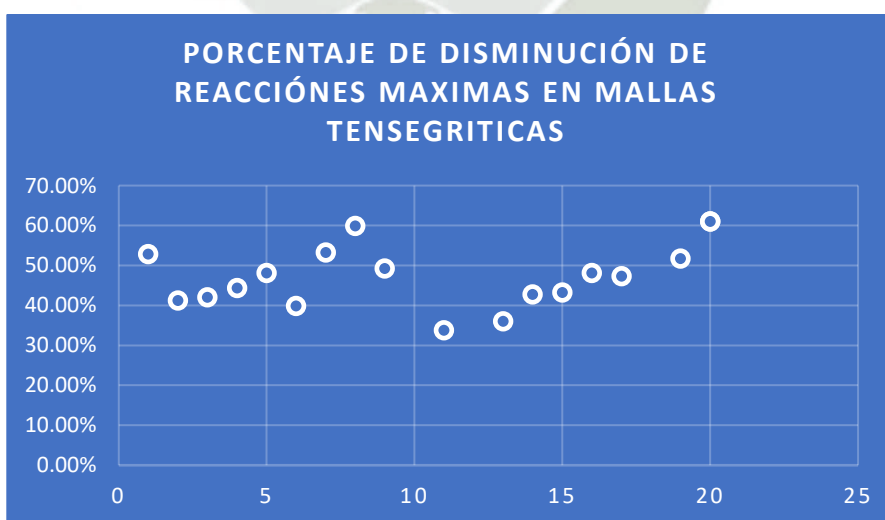
Porcentaje de Disminución de Fuerzas Internas Mínimas.



Nota. Datos extraídos de un procesamiento previo de los resultados obtenidos por el programa de análisis, ordenados en el programa Excel. Elaboración propia.

Figura 150

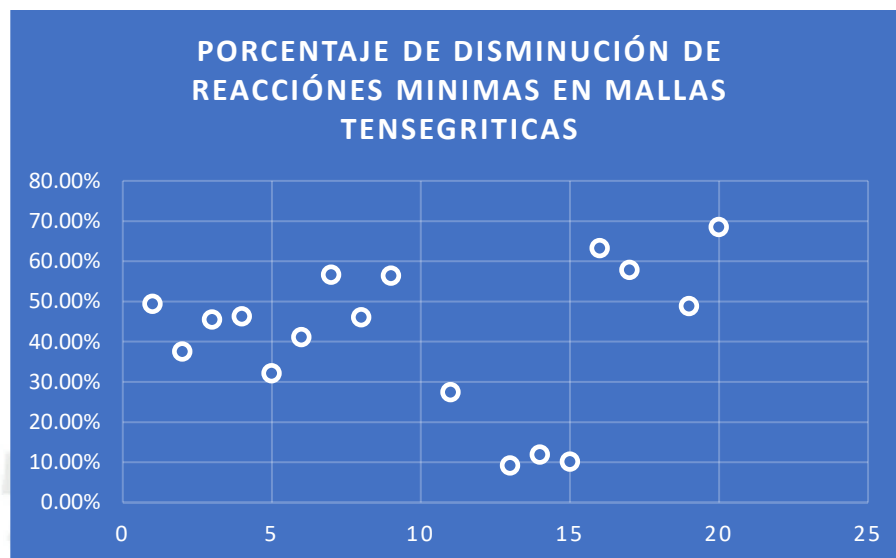
Porcentaje de Disminución de Reacciones Máximas.



Nota. Datos extraídos de un procesamiento previo de los resultados obtenidos por el programa de análisis, ordenados en el programa Excel. Elaboración propia.

Figura 151

Porcentaje de Disminución de Reacciones Mínimas.



Nota. Datos extraídos de un procesamiento previo de los resultados obtenidos por el programa de análisis, ordenados en el programa Excel. Elaboración propia.

- Como se puede observar en las figuras previas, el porcentaje de disminución de las reacciones y de las fuerzas internas de los elementos, con los apoyos adicionales en las mallas, es de aproximadamente el 45%, 44.48% siendo exactos, lo cual da como primera observación y conclusión que notablemente el uso de 2 apoyos adicionales en el medio de la malla, logra disminuir las fuerzas y las reacciones aproximadamente en la mitad.
- De todas las mallas (35) con las que se iniciaron la investigación, solo 17 logran ser coherentes y obtener buenos resultados (aproximadamente un 50%).
- Se seleccionarán únicamente 3 mallas tensegríticas para la comparación final de cada grupo de mallas (módulos y Manipulación Rot-Umbela) y para la elección de la malla tensegrítica representativa; estas deberán ser las más destacables considerando

solamente los resultados de fuerzas (mejor desempeño con apoyos adicionales y menores esfuerzos axiales entre los elementos); los resultados de desplazamientos no se consideran como criterio para esta selección porque lo que se busca es saber qué geometría de malla tensegrítica es la que resiste más fuerzas de viento y cual se desempeña mejor con sus elementos; cuando ya se tenga esta selección de las 3 mejores mallas, recién se tendrá en consideración estos valores de desplazamientos, mostrados en las tablas 24, 25 y 26.

Así pues, tras una sencilla observación de las tablas 22 y 23, es fácil destacar a las 3 mejores mallas: “Malla Quíntuplex Unión Conexión Arista-Arista 2”, “Malla Octaedro expandido Conexión Unilateral 1”, “Malla Octaedro expandido Conexión Unilateral 2”, las cuales se mostrarán nuevamente en las tablas 27 y 28, con el fin de tener una mejor percepción y una mejor visualización de las mejores mallas tensegríticas que se consiguieron en este trabajo de investigación.

Tabla 27

Resultados y Características generales de las 3 mejores Mallas Tensegríticas tras el análisis elástico de cargas de viento (4 columnas iniciales).

Tipos de mallas	Área Real de malla (m2)	Área de columnas (m2)	Apoyos x col	Fuerza del viento (kgf)	Fuerza máxima de elementos (kgf)	Fuerza mínima de elementos (kgf)	Promedio de fuerzas internas (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Cantidad de elementos
1 MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.68	2.14	6	1720.12	298.82	-451.69	31.06	325.25	-208.38	650
2 MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	45.87	1	4	1391.95	337.31	-682.96	37.67	459.52	-215.13	2210
3 MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	43.94	1	4	1333.31	318.69	-673.36	37.4	439.37	-129.54	2240

Nota. Todos estos datos son resultado del análisis elástico con las 4 columnas iniciales, con 1 columna de apoyo en cada esquina.

Tabla 28

Resultados y Características generales de las 3 mejores Mallas Tensegríticas tras el análisis elástico de cargas de viento (4 columnas iniciales con 2 columnas adicionales).

Tipos de mallas	Área Real de malla (m2)	Área de columnas (m2)	Apoyos adicionales x columna	Fuerza del viento (kgf)	Fuerza máxima de elementos (kgf)	Fuerza mínima de elementos (kgf)	Promedio de fuerzas internas (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Cantidad de elementos
1 MALLA QUINTUPLEX Unión Conexión Arista-Arista 2	56.68	2.14	5-Jun	1720.12	144.84	-192.66	16.35	130.53	-112.44	650
2 MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 1	45.87	1	3	1391.95	196.45	-356.86	21.32	238.34	-79.07	2210
3 MALLA OCTAEDRO EXPANDIDO Conexión Unilateral 2	43.94	1	3	1333.31	190.69	-359.1	21.69	231.52	-54.65	2240

Nota. Todos estos datos son resultado del análisis elástico con 6 columnas en total, las 4 iniciales y 2 adicionales en la mitad de la longitud más larga de la malla.

10.5. Comparación y Elección final de la Malla Tensegrítica representativa

Tras la observación de las tablas 27 y 28 se puede escoger a la mejor malla tensegrítica de todas, en cuanto a fuerzas internas de elementos, como se explicó en el apartado anterior; esta es la malla número 1: “Malla Quíntuplex Unión Conexión Arista-Arista 2” y los criterios a considerarla como tal son las siguientes:

- Es la malla tensegrítica con menores valores de fuerzas internas en los elementos, tanto máximas como mínimas, incluyendo ambos análisis, con 4 y 6 apoyos como columnas. Esto significa que ante determinado fenómeno de viento, será la que soportare más velocidad de viento antes de colapsar.
- Es la malla tensegrítica con el promedio de fuerzas internas más bajo, lo que significa que la mayoría de sus elementos tiene fuerzas axiales bajas en comparación con las demás, y presenta una mejor distribución de fuerzas entre sus elementos, maximizando así un posterior diseño y generando un mejor costo en su posible elaboración.
- Es la malla tensegrítica con menores valores en cuanto a las reacciones máximas de apoyos, tanto con 4 soportes iniciales y con 2 soportes adicionales.

A pesar de todos estos buenos resultados a su favor, la malla formada por módulos Quíntuplex resulta tener también puntos en contra, considerando ahora sí los desplazamientos máximos de los nudos; estos puntos negativos son:

- Es la segunda malla tensegrítica en cuanto a valores de la reacción mínima de los apoyos (columnas iniciales), y la peor cuando se añaden las columnas adicionales.

- Presenta áreas necesarias de 2.14 m² para las columnas de soporte, siendo áreas excesivamente grandes y muy poco prácticas para su construcción (prácticamente sobredimensionadas).
- Los desplazamientos en su capa inferior son extremadamente grandes en comparación con las otras dos mallas, teniendo como valores máximos 19 cm, 17 cm y 62 cm, para los desplazamientos en el sentido “x”, “y” y “z” respectivamente (columnas iniciales), y 21 cm, 23 cm y 31 cm para los desplazamientos en el sentido “x”, “y” y “z” respectivamente, pero con columnas adicionales. Las otras dos mallas en comparación tienen como valores máximos 3cm, 2cm y 11cm (“x”, “y” y “z” respectivamente) con las columnas iniciales y 2cm, 2cm y 4cm con las columnas adicionales.

Por estos puntos negativos no se considerará como la mejor a la “Malla Quíntuplex Unión Conexión Arista-Arista 2”, a pesar de tener mejores resultados en cuanto a fuerzas internas de los elementos, e incluso usando menor cantidad de elementos que las demás (650 contra 2200 elementos); cabe resaltar que un gran impedimento para no considerarlas como tal son los desplazamientos excesivos que tiene en la capa inferior, siendo de 31cm en el sentido vertical, incluso con columnas adicionales; además este desplazamiento se da usando solo 50 m² como área cubierta, y para la comparación final se usará cubiertas de 700 m² aproximadamente, por lo que usar esta malla como representativa traerá problemas de inestabilidad y deflexiones excesivas en el futuro.

Así pues, al quedar solo dos mallas para escoger, y siendo ambas de la misma familia (Octaedro expandido), es fácil observar a través de las tablas que una de ellas es ligeramente mejor a la otra, en cuanto a fuerzas y reacciones, porque en cuanto a desplazamientos son casi iguales, sin embargo, como se mencionó, en esta investigación se está primando las

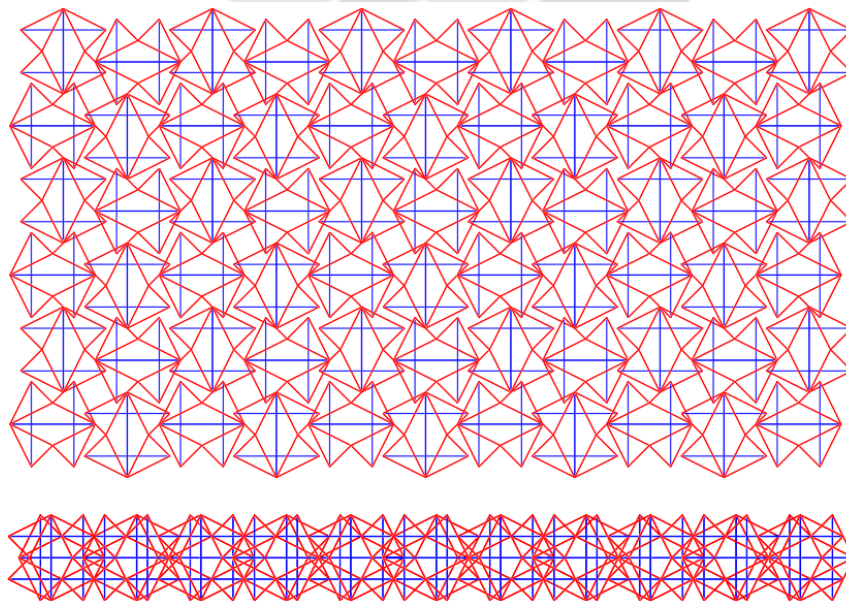
fuerzas internas en los elementos. Por lo tanto, la malla final que representará a todas será la malla de “Octaedro expandido Conexión Unilateral 2”.

Como dato adicional, esta malla presenta columnas de 1m^2 de área para los apoyos (área mínima y estándar para todas las mallas comparadas inicialmente), y además sus apoyos son simétricos e iguales en cada una de las columnas; la geometría de esta malla también permite que la adición de más columnas en la capa inferior sea simétrica en ambos extremos, algo beneficioso para el siguiente capítulo, donde se adaptará la malla a condiciones más grandes.

En las figuras 152 y 153 se puede apreciar a la malla escogida. Esta malla pertenece al grupo de mallas tensegríticas formadas por módulos tensegríticos y está compuesta por Octaedros Expandidos, a través de una conexión del tipo Unilateral.

Figura 152

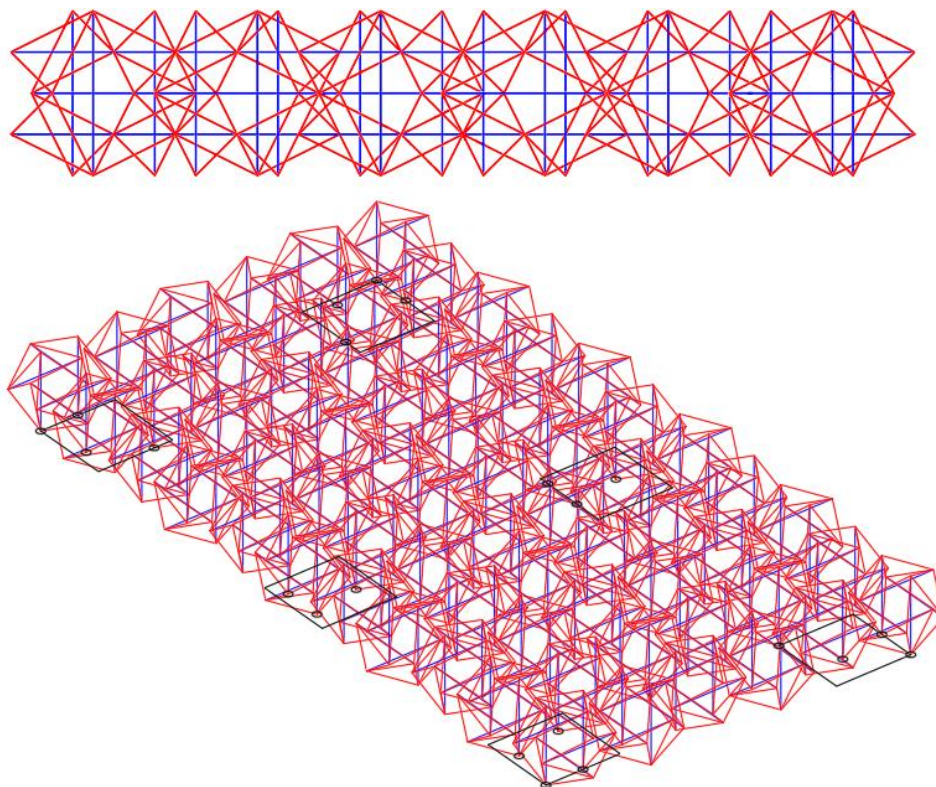
Malla Tensegrítica Escogida para la comparación final, compuesta por Módulos de Octaedros Expandidos, a través del tipo de Unión Unilateral (Vista en planta/perfil).



Nota. Vista en planta y vista de perfil de la Malla Tensegrítica Final, escogida previamente de una comparación exhaustiva entre otras mallas. Elaboración propia.

Figura 153

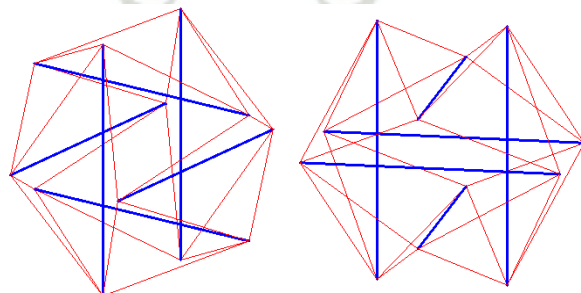
Malla Tensegrítica escogida para la comparación final, compuesta por Módulos de Octaedros Expandidos, a través del tipo de Unión Unilateral (Vista isométrica/canto).



Nota. Vista de canto y vista isométrica de la Malla Tensegrítica Final, escogida previamente de una comparación exhaustiva entre otras mallas. Elaboración propia.

Figura 154

Vista en planta y Vista Isométrica del Módulo Octaedro Expandido



Nota. Vista en planta y vista isométrica del módulo tensegrítico necesario para la malla tensegrítica escogida final. Elaboración propia.

CAPÍTULO XI

11. COMPARACIÓN FINAL DE MALLA TENSEGRÍTICA CON COBERTURA CONVENCIONAL

Ya se tiene la malla tensegrítica representativa para la comparación, únicamente falta la cobertura convencional; como ya se explicó, esta cobertura metálica se extraerá del trabajo de tesis de Milón y Morón, escogiendo así, a la cobertura “Urb. Juan XXIII”, ubicada en la ciudad de Yanahuara, en el departamento de Arequipa, y se escoge esta de entre todas las demás porque es una de las mejores, con buenos resultados y está dentro del promedio de coberturas metálicas buenas.

En este capítulo se realizará la comparación final entre estas dos estructuras, siendo el principal objetivo de la investigación. El documento citado de donde se extrae la cobertura metálica, nos proporciona la velocidad de viento con la que falla la estructura, por lo que no es necesario volver a modelarla y analizarla en el programa SAP2000, únicamente se modelará y analizará la malla tensegrítica final seleccionada en el capítulo previo.

Para poder comparar estas mallas, se tienen que adaptar a las mismas condiciones, que serán las mismas que se tomaron para la cobertura convencional; esto se hace para que la comparación final sea equitativa para ambas estructuras; estas modificaciones se darán en el área, debiendo ser la misma a la que usa la cobertura metálica; se darán también modificaciones en los materiales de los elementos, y en los apoyos como columnas; todas estas consideraciones se detallarán a continuación:

- Se considerará un área de aproximadamente 688 m², con un largo de 32 m por un ancho de 21.5 m. Se da esta área porque se observó en los planos de la cobertura “Urb. Juan XXIII” que el área que se cubre es similar a estas dimensiones; está


claro que el área difiere un poco debido a la geometría de la malla tensegrítica, es imposible hacerlas completamente iguales.

- Las propiedades de los compresores que se usarán serán las del acero estructural A-36 con comportamiento no lineal ($f_y=2530 \text{ kgf/cm}^2$), siendo el mismo tipo de material que se usó en la cobertura convencional del trabajo citado.
- Para los tensores, como la cobertura convencional no usa estos elementos, se tiene que proponer un cable que pueda resistir las fuerzas mínimas de los tirantes (esperando que fallen primero los compresores); así pues, se usarán cables de una empresa comercializadora de cables de acero llamada “Cargoflet blasant”, proveniente de España, la cual se dedica a la fabricación de elementos y equipos necesarios para la construcción, y se rige por la norma ASTM 416 de acuerdo a sus especificaciones técnicas; el diámetro que se usará será de 26 mm de diámetro dado que, según las especificaciones de un tipo de cable de acero con esa medida, se logra alrededor de 36 tonf como fuerza mínima, un valor un poco sobredimensionado para este tipo de estructuras pero necesario para que puedan primero fallar los compresores; el cable a usar en específico es el mostrado en la figura 155.

Figura 155

Primera Selección de Cable a usar, mediante un catálogo de Tensores (cables).

CABLE 6x37 STANDARD (1+6+12+18)+FE = 222 HILOS



Ø 5 a 50 mm

6 x 37 + 1

Gris engrasado		Galvanizado	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Carga de rotura calculada		Carga de rotura mínima	
CD	CI	CD			(kN)	(kp)	(kN)	(kp)
9380500	9380501	9380502	5	0,0865	15,8	1610	13	1330
9380600	9380601	9380602	6	0,125	22,8	2320	18,8	1910
9380700	9380701	9380702	7	0,170	31,0	3150	25,6	2600
9380800	9380801	9380802	8	0,221	40,5	4120	33,4	3400
9380900	9380901	9380902	9	0,280	51,2	5210	42,3	4300
9381000	9381001	9381002	10	0,346	63,3	6430	52,2	5310
9381100	9381101	9381102	11	0,419	76,5	7780	63,1	6420
9381200	9381201	9381202	12	0,498	91,1	9260	75,1	7640
9381300	9381301	9381302	13	0,585	107	10900	88,2	8970
9381400	9381401	9381402	14	0,678	124	12600	102	10400
9381600	9381601	9381602	16	0,886	162	16500	134	13600
9381800	9381801	9381802	18	1,120	205	20800	169	17200
9382000	9382001	9382002	20	1,380	253	25700	209	21200
9382200	9382201	9382202	22	1,670	306	31100	253	25700
9382400	9382401	9382402	24	1,990	364	37100	301	30600
9382600	9382601	9382602	26	2,340	428	43500	353	35900
9382800	9382801	9382802	28	2,710	496	50400	409	41600
9383200	9383201	9383202	32	3,540	648	65900	534	54300
9383600	9383601	9383602	36	4,480	820	83400	676	68800
9384000	9384001	9384002	40	5,540	1010	103000	835	84900
9384400	9384401	9384402	44	6,700	1220	125000	1010	103000
9384800	9384801	9384802	48	7,970	1460	148000	1200	122000
9385000	9385001	9385002	50	8,560	1580	161000	1300	133000

Nota. Adaptada de *CABLE* (p. 9), por CargoFlet Blasant, s.f., CargoFlet Blasant.

Si bien el rango que tiene este cable antes de la falla es grande, se diseña así porque como se mencionó antes, entre los tensores y los compresores, se busca que primero fallen los compresores para que el desmoronamiento de la estructura no sea fatal, ya que si fallan primero los tensores, se fracturarían y la estructura entraría rápidamente en un desequilibrio de fuerzas, colapsando al instante, mientras que si primero fallan los compresores, los cables aun resistirían las conexiones y mantendría a los compresores colgados, evitando fatalidades.

- Se considerarán solo 7 columnas en cada lado de la malla (áreas de 1m²), debido a que es la misma cantidad de columnas que tiene la cobertura metálica convencional del distrito de Yanahuara; si bien esas columnas tienen una menor área (alrededor

de 0.16 m²), la cantidad será la misma para tratar de tener una comparación homogénea, además, las coberturas convencionales se pueden dar el lujo de presentar columnas más pequeñas por el sistema de fuerzas y el anclaje de elementos que tiene, presentando brazos rígidos en las conexiones y transmitiendo no solo fuerzas axiales sino también de momentos, lo cual le da cierta ventaja sobre nuestro sistema netamente axial.

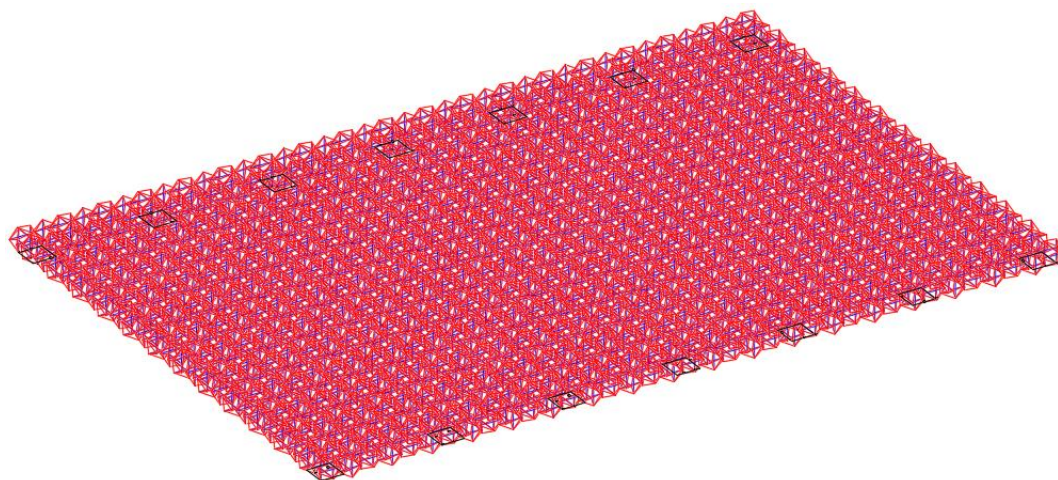
- En total se tendrían 14 columnas y 56 apoyos en toda la malla tensegrítica (56 puntos de la capa inferior), ya que adentro del área de cada columna se logran tener solo 4 apoyos, los cuales son articulados, ya que como se sabe solo existen fuerzas axiales.
- En la capa superior se tiene la misma cantidad de puntos que en la capa inferior (1850), los cuales distribuyen toda la fuerza ejercida sobre la parte superior en áreas iguales a través del método de áreas tributarias.
- El valor de 30.345 kgf/m² multiplicado por toda el área nos da una fuerza total de 20877.36 kgf o 20.88 tonf, valor que debería soportar como mínimo la malla tensegrítica antes de colapsar o mostrar algún mecanismo de falla.

En la figura 156 se puede visualizar la nueva malla tensegrítica en un programa CAD, adaptada a las nuevas condiciones para poderla comparar con la cobertura metálica convencional.

Las áreas distribuidas por cada punto (capa superior) se muestran en la figura 157.

Figura 156

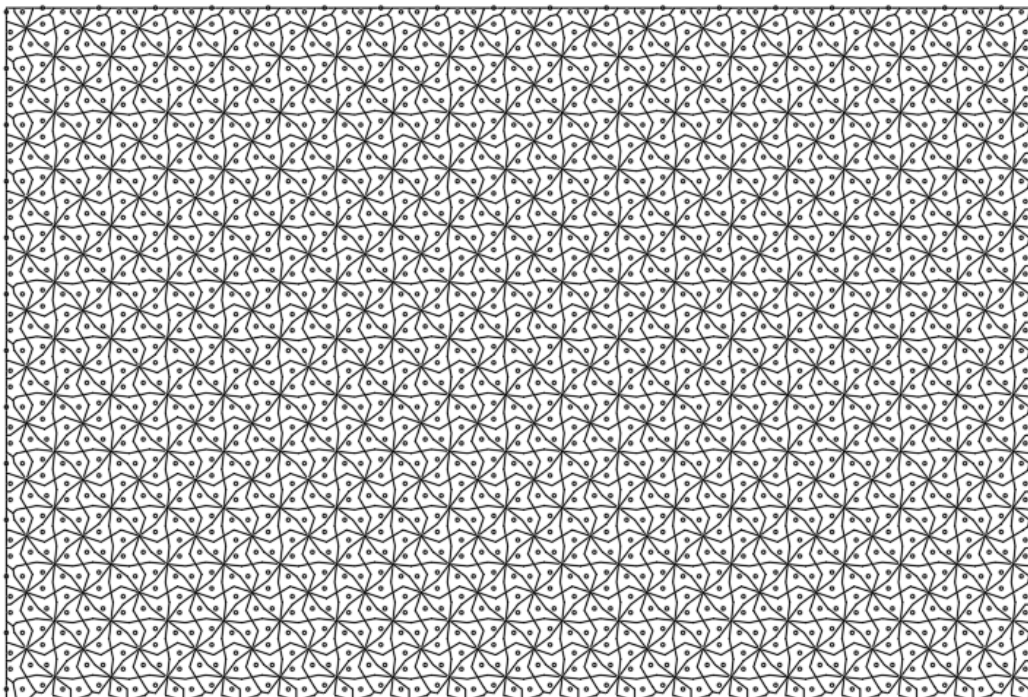
Malla Tensegrítica final, adaptada a nuevas condiciones para la Comparación final.



Nota: Vista isométrica de malla tensegrítica final para comparación final con la cobertura metálica, modificada en área para igualar condiciones. Elaboración propia.

Figura 157

Áreas tributarias para cada punto de la capa superior de la malla tensegrítica final.



Nota: Distribución de áreas tributarias para cada punto de la malla, para determinar luego la fuerza de viento que le corresponde a cada nudo. Elaboración propia.

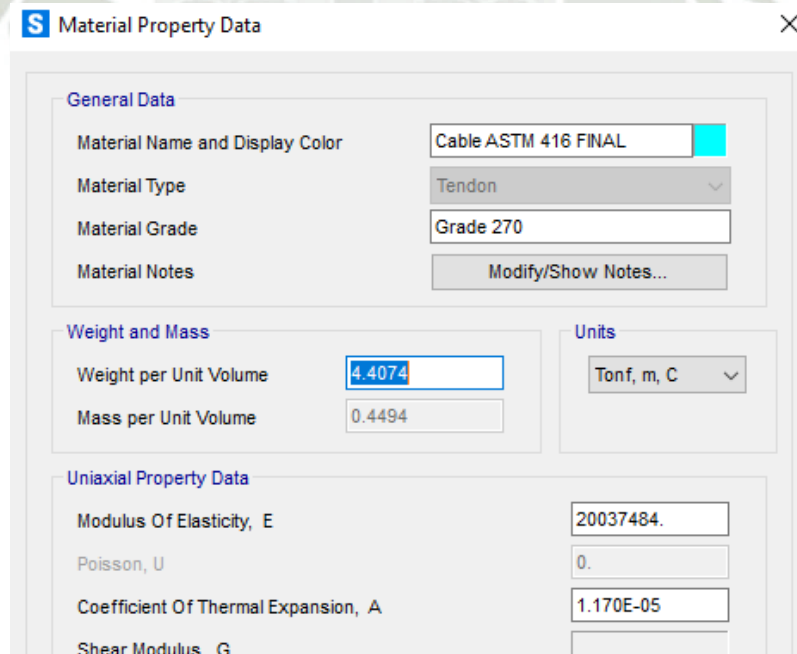
Al tener ya construida nuestra nueva malla tensegrítica modificada, proveniente de la unión de módulos “Octaedros expandidos”, se procede a modelarla en el programa SAP200 para poderla analizar bajo un análisis estático no lineal que nos permitirá determinar la velocidad de viento con la que falla.

11.1. Análisis elástico y análisis estático no lineal de malla tensegrítica final (1er diseño)

Luego de tener construida y adaptada a la malla tensegrítica en el programa AutoCad, se procede a modelarla en el programa SAP2000, definiendo las dimensiones geométricas de cada elemento (figuras 160 y 161) con sus respectivos materiales (figuras 158 y 159), mencionados previamente.

Figura 158

Definición de material para cables en programa SAP2000 (1er diseño).

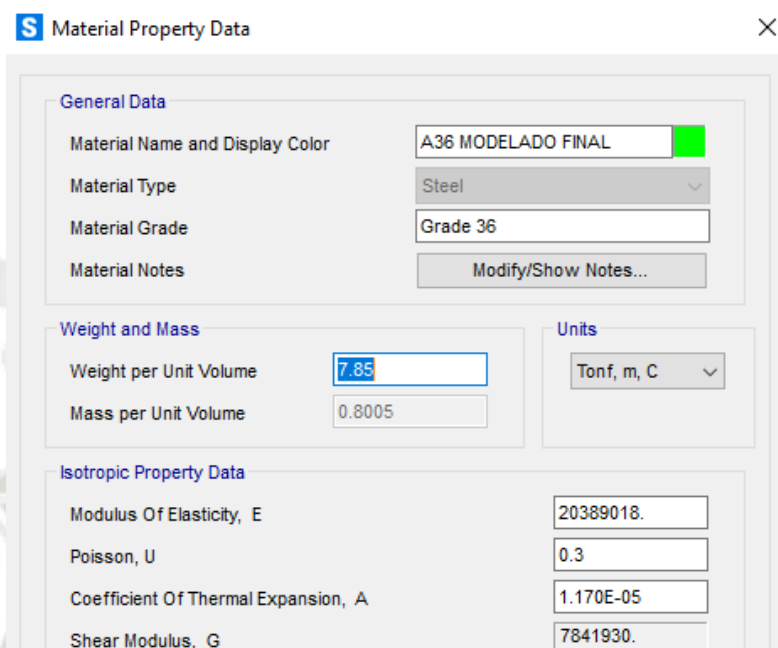


The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box in SAP2000. The 'General Data' section includes: Material Name and Display Color: Cable ASTM 416 FINAL; Material Type: Tendon; Material Grade: Grade 270; and a button for 'Modify/Show Notes...'. The 'Weight and Mass' section includes: Weight per Unit Volume: 4.4074; Mass per Unit Volume: 0.4494; and Units: Tonf, m, C. The 'Uniaxial Property Data' section includes: Modulus Of Elasticity, E: 20037484.; Poisson, U: 0.; Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05; and Shear Modulus, G: (empty field).

Nota: Elaboración propia.

Figura 159

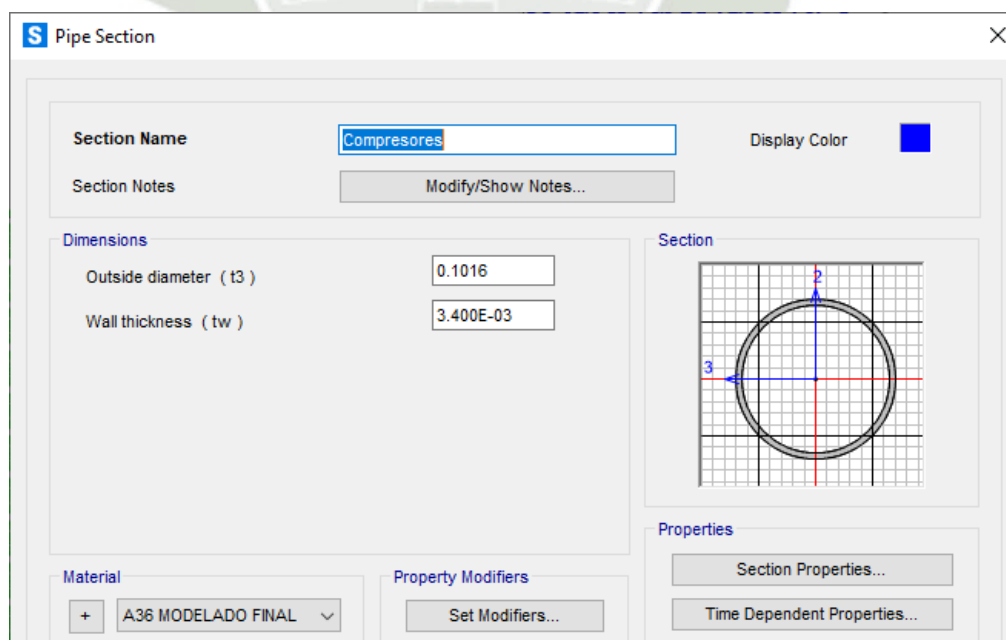
Definición de material para barras en programa SAP2000 (1er diseño).



Nota: Elaboración propia.

Figura 160

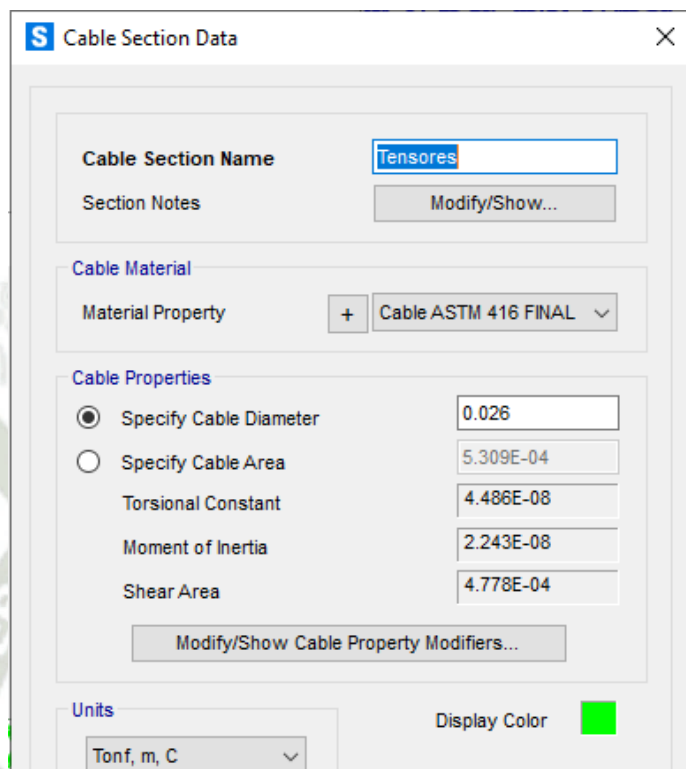
Definición de propiedades geométricas para barras en programa SAP2000 (1er diseño).



Nota: Elaboración propia.

Figura 161

Definición de propiedades geométricas para cables en programa SAP2000 (1er diseño).



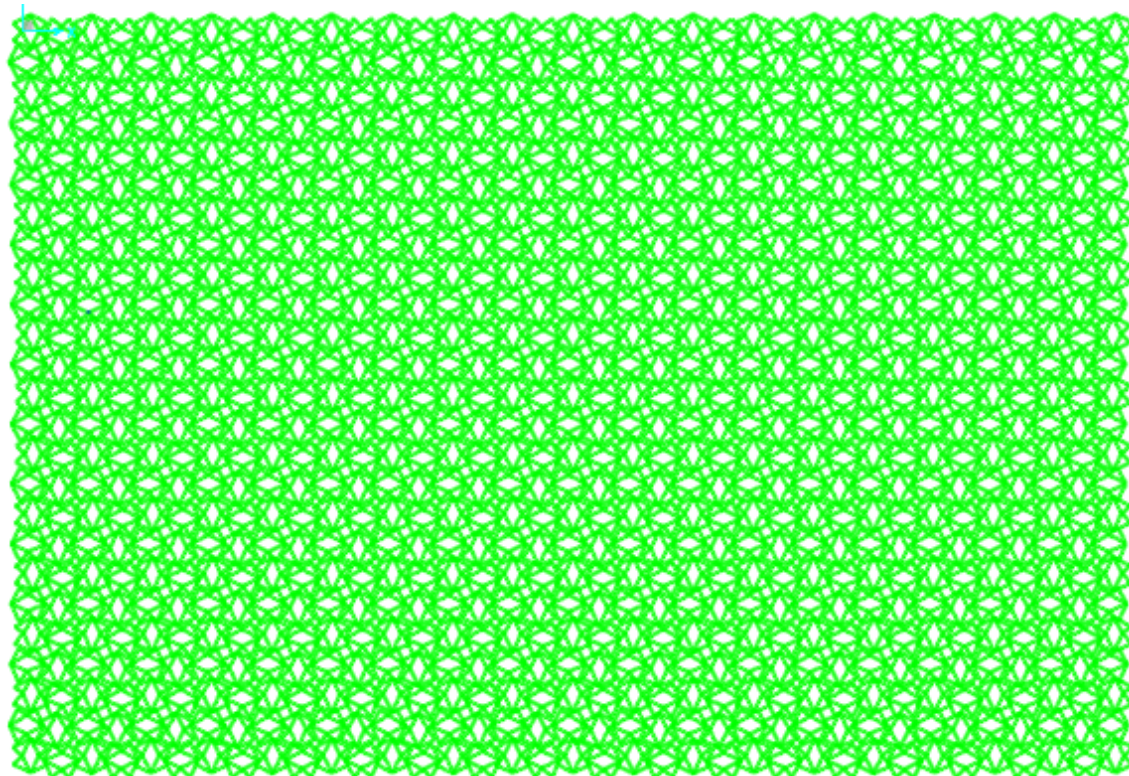
Nota: Elaboración propia.

Después de tener los elementos con sus respectivos materiales, se procede a modelar la estructura en su totalidad, uniendo cada uno de los módulos en el programa SAP2000, cuidando que en cada uno de ellos halla una conexión pura entre cables y barras, evitando que en el programa haya conexiones fallidas, de lo contrario, la malla sería inestable y presentaría fallas rápidamente.

En las figuras 162 y 163 se puede observar una vista isométrica y una vista en planta del resultado final tras modelar esta malla tensegrítica final representativa en el programa SAP2000, lista para cargarla con fuerzas y compararla estructuralmente con la cobertura metálica convencional.

Figura 162

*Modelado Final de Malla tensegrítica final representativa, modelada en el programa
SAP2000 en una vista en planta (1er diseño).*



*Nota: Vista en planta del modelado final de la malla tensegrítica representativa para la
comparación, adaptada a condiciones equitativas. Elaboración propia.*

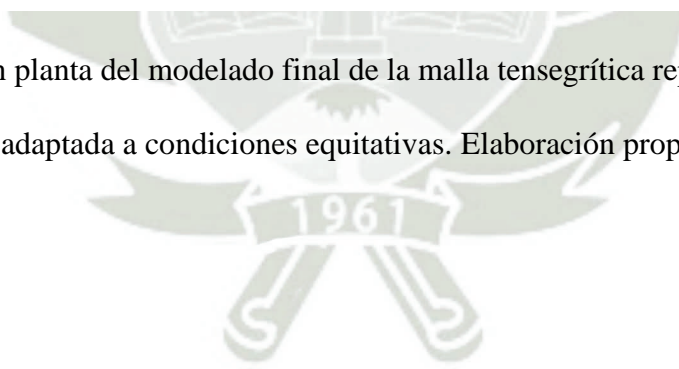
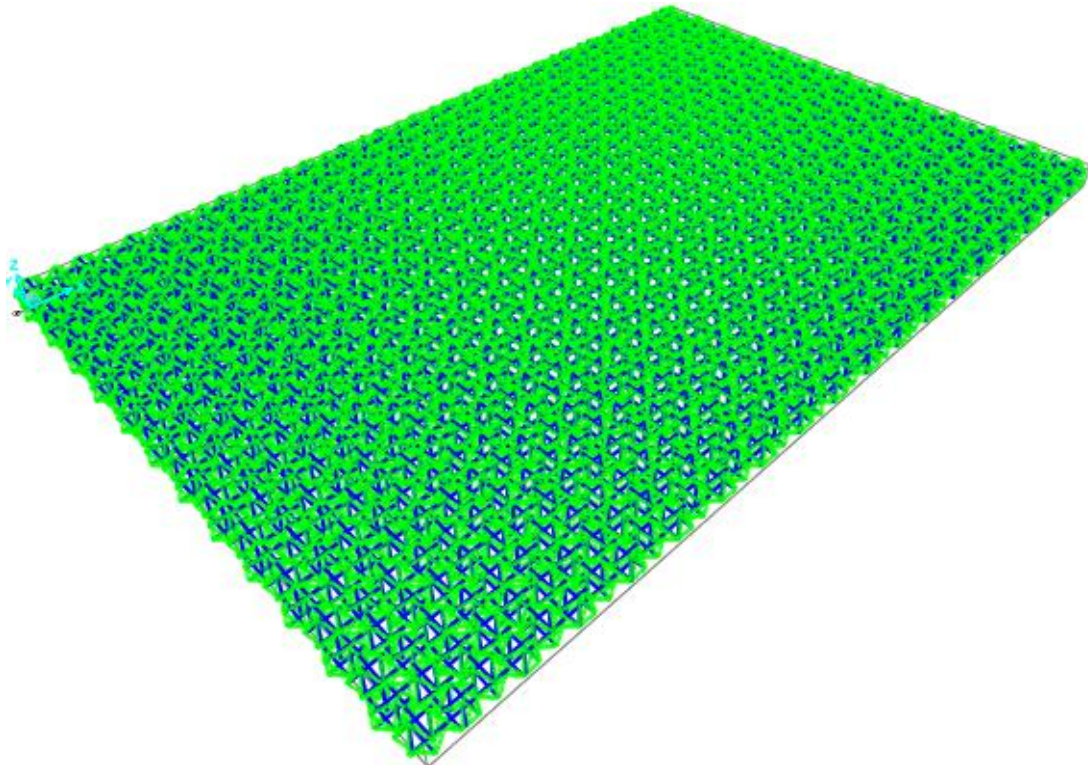


Figura 163

Modelado Final de Malla tensegrítica final representativa, modelada en el programa SAP2000 en una vista isométrica (1er diseño).

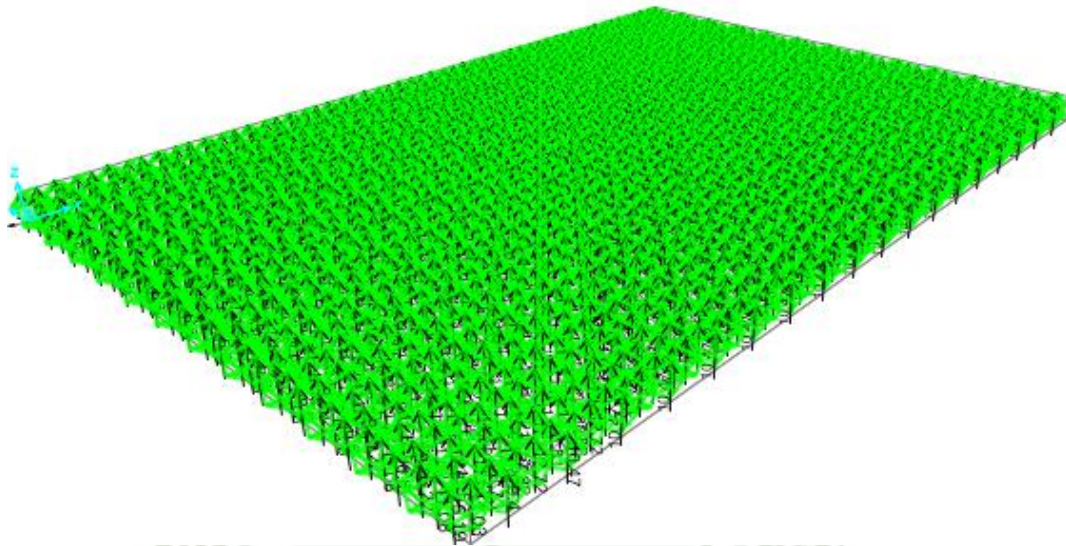


Nota: Vista isométrica del modelado final de la malla tensegrítica representativa para la comparación, adaptada a condiciones equitativas. Elaboración propia.

Ya modelada la estructura, se procede a cargar cada punto de la capa superior con sus valores respectivos de fuerzas (figura 164), multiplicando cada área tributaria de cada punto por el valor de 30.345 kgf/m², procedimiento ya visto en capítulos previos; todo esto se realiza para el análisis elástico, donde se determina cual es la fuerza axial mínima que debe obtener el primer elemento en fallar, en este caso será una fuerza mínima de compresión porque primero debe fallar un compresor; este análisis es conocido porque es el que se viene haciendo durante toda la investigación, en cada una de las mallas tensegríticas del capítulo 6 y 7.

Figura 164

Asignación de cargas en cada nudo de la capa superior de la malla tensegrítica representativa, en el programa de análisis SAP2000 (1er diseño).



Nota: Vista isométrica de la asignación de fuerzas en la malla tensegrítica final.

Elaboración propia.

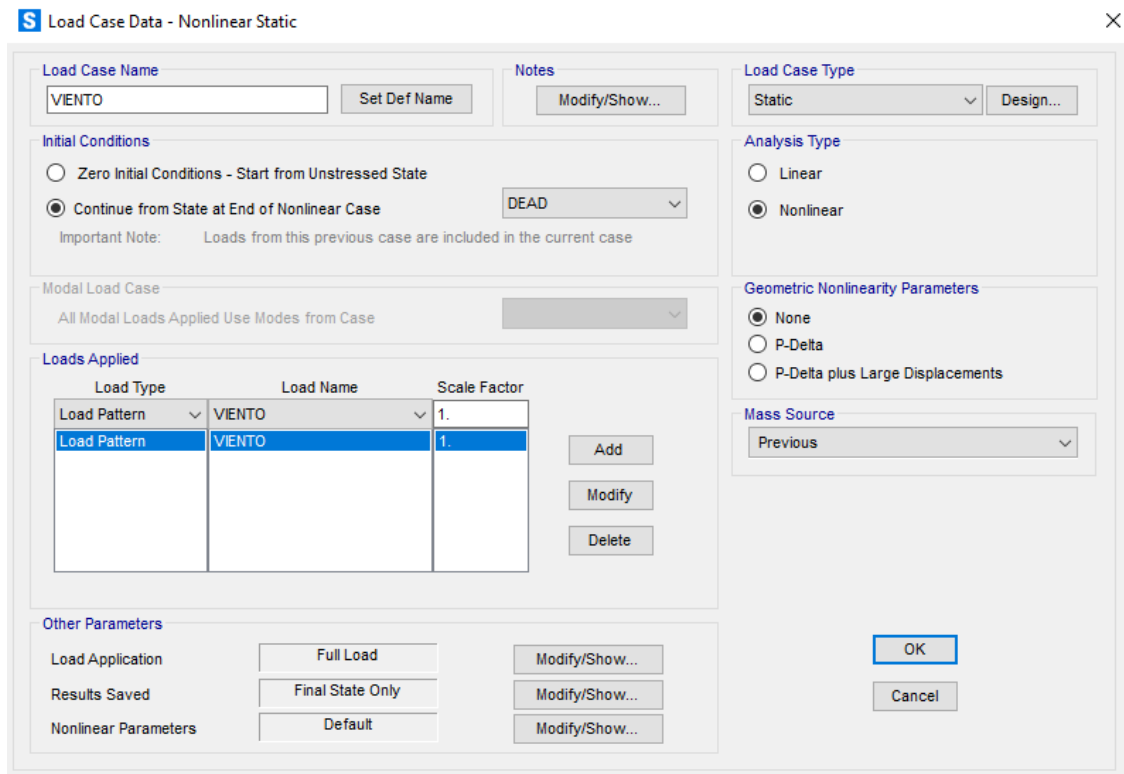
Estas cargas asignadas en la parte superior se colocan para poder realizar primero el análisis elástico, donde se medirá la respuesta de la estructura ante los 20877.36 kgf que genera el viento. Cabe resaltar que para este análisis se colocaron las fuerzas respectivas de cada nudo en el sentido “z positivo”, ya que se está considerando como fuerzas predominantes el caso de fuerzas por succión, donde la fuerza del viento se ejerce por adentro de la cobertura, tratando de levantarla, tal cual como se considera en el trabajo de Morón y Milón (mismas condiciones para la comparación).

11.1.1. Análisis elástico (1er diseño)

Para poder correr el programa, se definirá por último el estado de cargas, analizando primero a la estructura bajo la carga muerta de los elementos, y después bajo la fuerza del viento.

Figura 165

Definición del estado de cargas para el análisis elástico, en el programa SAP2000 (1er diseño).



S Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: VIENTO [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Nonlinear Case [DEAD] [v]
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [v]

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern [v]	VIENTO [v]	1.
Load Pattern	VIENTO	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Geometric Nonlinearity Parameters:
 None
 P-Delta
 P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: Previous [v]

Other Parameters:
 Load Application: Full Load [Modify/Show...]
 Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
 Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

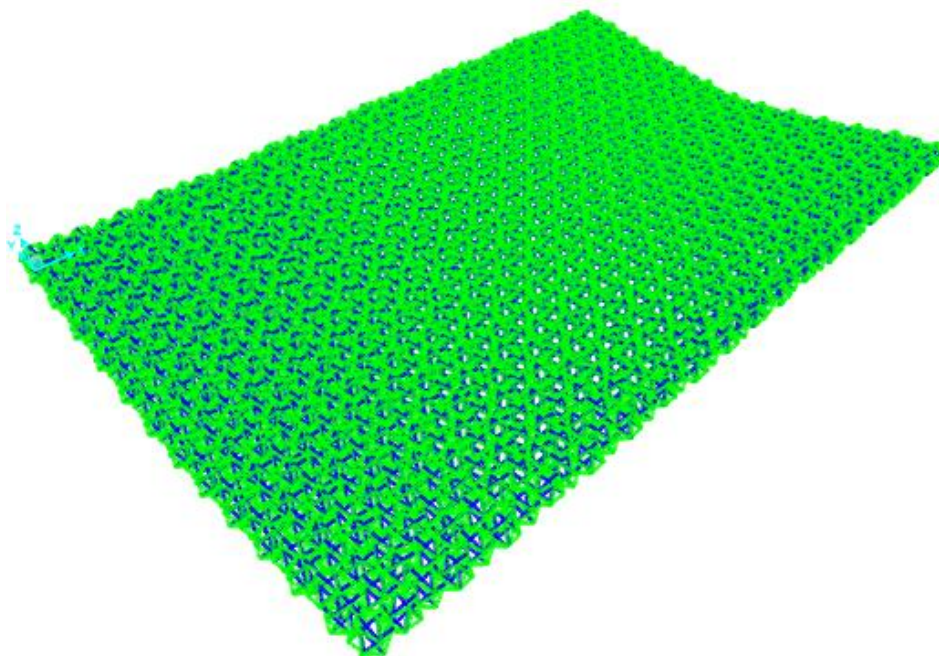
[OK] [Cancel]

Nota: Estado de cargas para el análisis elástico. Elaboración propia.

Tras el análisis del programa (sistema corrido), se puede apreciar la deformada de la estructura (figura 166), que adopta una forma convexa en vez de una forma cóncava, lo que significa que las fuerzas de viento no son las que predominaron en este análisis, sino más bien fueron las fuerzas del peso propio de la estructura, y esto se puede deducir fácilmente tras una inspección visual de la deformada de la estructura.

Figura 166

Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis elástico bajo cargas de viento (1er diseño).



Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Los resultados de cada elemento y de cada punto en la estructura son bastantes, tratándose de 5550 compresores y 25776 cables en total, por lo que, para no extender esta tesis con demasiados datos, solamente se mostrarán los valores máximos y mínimos, tanto para las fuerzas como para los desplazamientos; en la tabla 29 se mostrarán estos valores.

Tabla 29

Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis elástico (1er diseño de malla).

Fuerza Axial Máxima (kgf)	Fuerza Axial Mínima (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Desplazamiento máximo (cm)	Desplazamiento mínimo (cm)
5049.74	-8971.59	4557.26	-2283.59	1.180418	-24.789918

Como se puede observar, los compresores reciben un valor de 8971 kgf, indicando que es la fuerza mínima que debe resistir un elemento a compresión para que la estructura sea segura según la norma.

Como ya se mencionó antes, con estos elementos (compresores de 4" de pulgada y cables de 2.6 cm de diámetro) la estructura se ve mucho más influenciada por el peso muerto que por la carga de viento, debido a la gran densidad de acero que se tiene (dimensiones de los elementos), algo que no está bien tratándose de un análisis enfocado a las cargas de viento.

11.1.2. Análisis estático no lineal (1er diseño)

Tras ya haber realizado el análisis elástico, se procede ahora a realizar el análisis estático no lineal, donde se llevará la estructura al fallo, permitiendo saber hasta que fuerza de viento logran resistir los elementos antes de colapsar la estructura; y tras haber realizado ambos análisis, se podrá hallar finalmente la velocidad de viento con la que falla la malla tensegrítica.

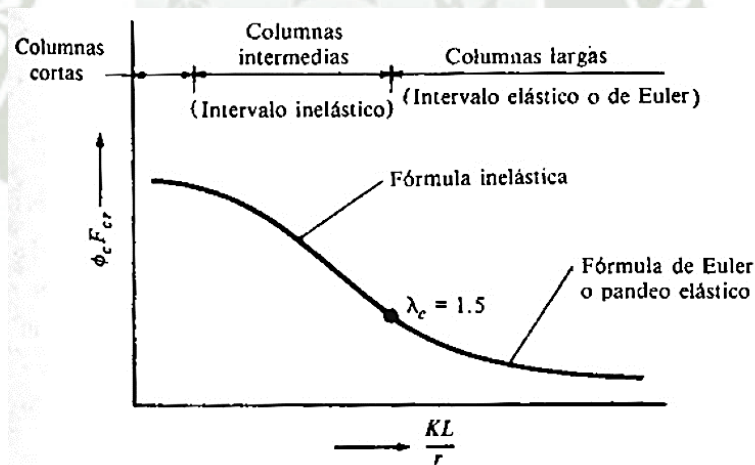
Las dimensiones de los elementos y sus propiedades ya fueron insertadas previamente en el análisis elástico, por lo que no es necesario volverlas a insertar. Lo que si se requiere es la inserción de las rótulas plásticas, tal cual como se hizo con el trabajo de investigación de donde se extrajo la cobertura metálica convencional. Las rótulas plásticas se colocarán en los elementos compresores ya que son los elementos que deben fallar primero, en los tensores no porque sus esfuerzos máximos los proporciona la empresa de fabricación, con lo cual no es necesario añadirle rótulas plásticas porque ya se sabe cuál será la carga última antes del fallo, incluso la estructura se diseña previamente para que no se alcance la rotura en los cables. Las rótulas a colocar deberían ser las mismas a las colocadas durante el trabajo citado de coberturas metálicas, ya que son del mismo material (acero A36),

sin embargo, varían ligeramente en el diagrama de fuerza-desplazamiento, ya que las barras presentan longitudes diferentes a los elementos metálicos; lo que si pueden tener igual es el diagrama de esfuerzo-deformación porque eso depende de las propiedades del material, mas no de la geometría.

Las rótulas para los elementos en compresión se hallan a través del esfuerzo crítico (F_{cr}) que produce el pandeo de los elementos, el cual viene influenciado por la esbeltez efectiva (KL/r) que permite determinar si un elemento a compresión fallará por pandeo en el intervalo elástico o inelástico; en la figura 167, se puede observar una gráfica donde se clasifica a los elementos en compresión de acuerdo a su esbeltez.

Figura 167

Clasificación de elementos a compresión de acuerdo a su relación de esbeltez.



Nota. Adaptada de *Diseño de Estructuras de Acero* (p. 149), por Jack C. McCormac & Stephen F. Csernak, 2013, Alfaomega Grupo Editor.

Con esta teoría, se pueden usar ecuaciones para formar la curva de la figura anterior; según la misma fuente de la figura 167 se muestran las Ecuaciones 22, 23 y 24.

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (22)$$

$$F_{cr} = (0.658\lambda_c^2) F_y \text{ para } \lambda_c \leq 1.5 \quad (23)$$

$$F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) F_y \text{ para } \lambda_c > 1.5 \quad (24)$$

Así pues, con estas fórmulas (Ecuaciones 23, 24 y 25) se puede hallar también la fuerza última con la que un elemento falla, valor necesario para introducir las rótulas en el sistema; a continuación, se verán las propiedades que tienen las barras de nuestra malla tensegrítica, siendo todas iguales, con un diámetro exterior de 4 pulgadas y espesor de 3mm y una longitud de 1m.

$$\text{Radio1} = 5.08 \text{ cm} \quad (25)$$

$$\text{Radio2} = 4.78 \text{ cm} \quad (26)$$

$$\text{Longitud} = 100 \text{ cm} \quad (27)$$

$$\text{Inercia} = 126.59 \text{ cm}^4 \quad (28)$$

$$\text{Área} = 10.49 \text{ cm}^2 \quad (29)$$

$$\text{Radio de giro } (r) = 3.47 \text{ cm} \quad (30)$$

$$\text{Factor } K = 1 \quad (31)$$

$$L/r = 28.79 \quad (32)$$

Estas son las características geométricas, ahora se verán las características de los materiales, siendo 58ksi el valor para la tensión de fractura del acero A36 y 29000 ksi su módulo de elasticidad:

$$F_y = 4077.80 \text{ kgf/cm}_2 \quad (33)$$

$$\text{Relación límite ancho espesor } (\lambda_c) = 0.41 \quad (34)$$

$$\text{Relación de esbeltez } \left(\frac{kL}{r}\right) = 28.79 \quad (35)$$

Reemplazando estos datos en las Ecuaciones 23 y 24, se obtienen los valores de F_{cr} :

$$F_{cr} = 3801.06 \text{ kgf/cm}_2 \text{ para } \lambda_c \leq 1.5 \quad (36)$$

$$F_{cr} = 21298.50 \text{ kgf/cm}_2 \text{ para } \lambda_c > 1.5 \quad (37)$$

Como el valor de λ_c es menor a 1.5, se considera a las barras como columnas intermedias casi cortas, haciendo que no se vean muy influenciadas por el pandeo; así pues, se escoge el primer valor de F_{cr} (Ecuación 36), el cual si lo multiplicamos por el área de la sección nos dará como resultado la fuerza máxima que puede resistir el elemento antes de su falla (rótula plástica):

$$F = 39869.84 \text{ kgf} \quad (38)$$

Y si usamos la fórmula para la deformación, o conocida también como la fórmula de la “Pelea” (Ecuación 39), proveniente de $F=Ku$, obtendremos el desplazamiento máximo que permite el elemento antes de la falla (rótula plástica):

$$u = \frac{PL}{EA} \quad (39)$$

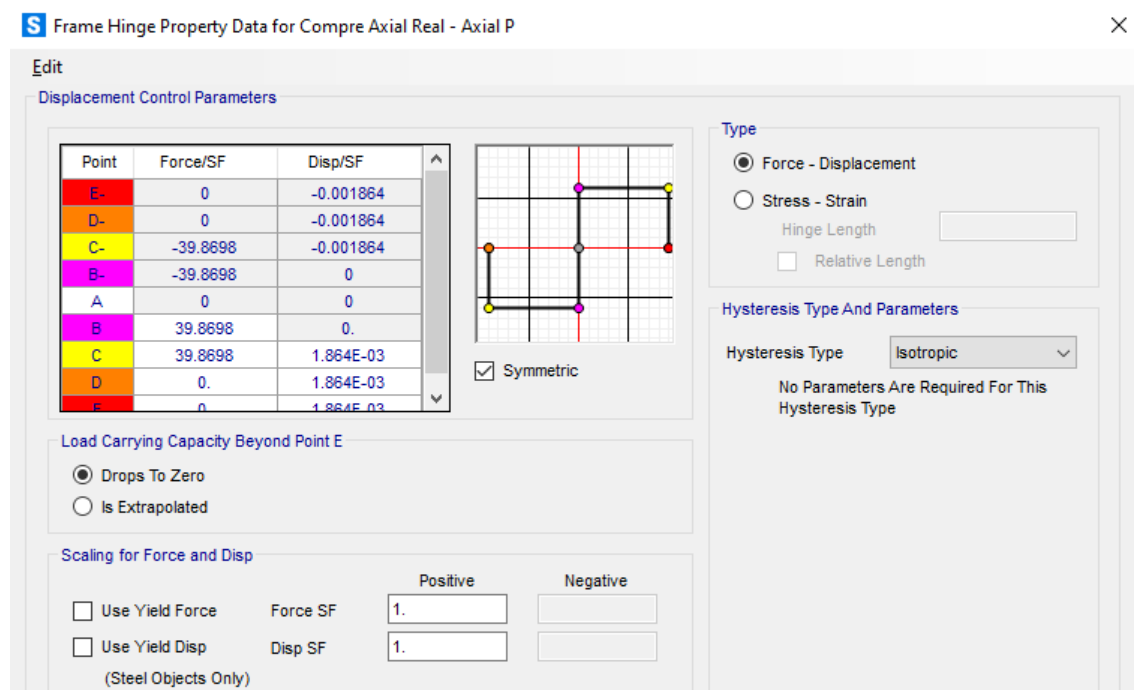
$$u = \frac{39869.84 \text{ kgf} \times 100 \text{ cm}}{2038901.80 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}_2} \times 10.50 \text{ cm}_2} \quad (40)$$

$$u = 0.1864 \text{ cm} \quad (41)$$

Así pues, para poder realizar este análisis estático no lineal es necesario insertar estos 2 valores en la curva de fuerza-desplazamiento de las rótulas del programa, como se muestra en la figura 168.

Figura 168

Inserción de datos para diagrama fuerza-desplazamiento de elementos compresores (1er diseño).

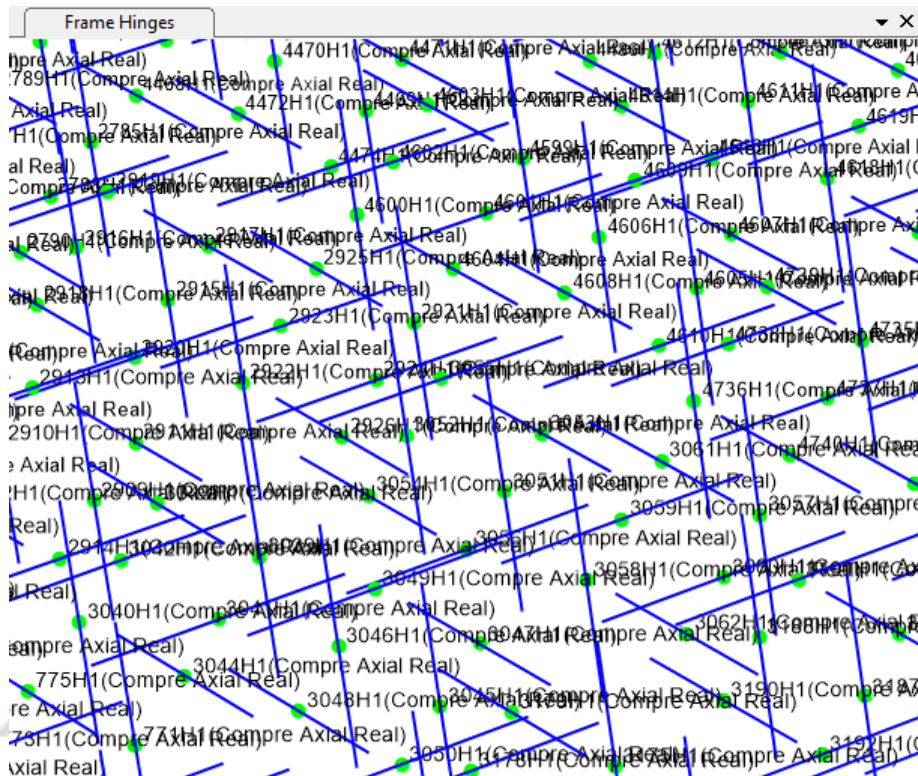


Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Esta gráfica se introduce en unidades de Tonf y m, y se les asigna las rótulas a todos los elementos compresores de la malla, ya que todas las barras presentan el mismo material, la misma longitud, y la misma área, por lo que sus propiedades físicas deben ser las mismas; esta introducción de las rótulas en las barras se muestra en la figura 169.

Figura 169

Inserción de rótulas plásticas en elementos compresores de malla Tensegrítica final (1er diseño).



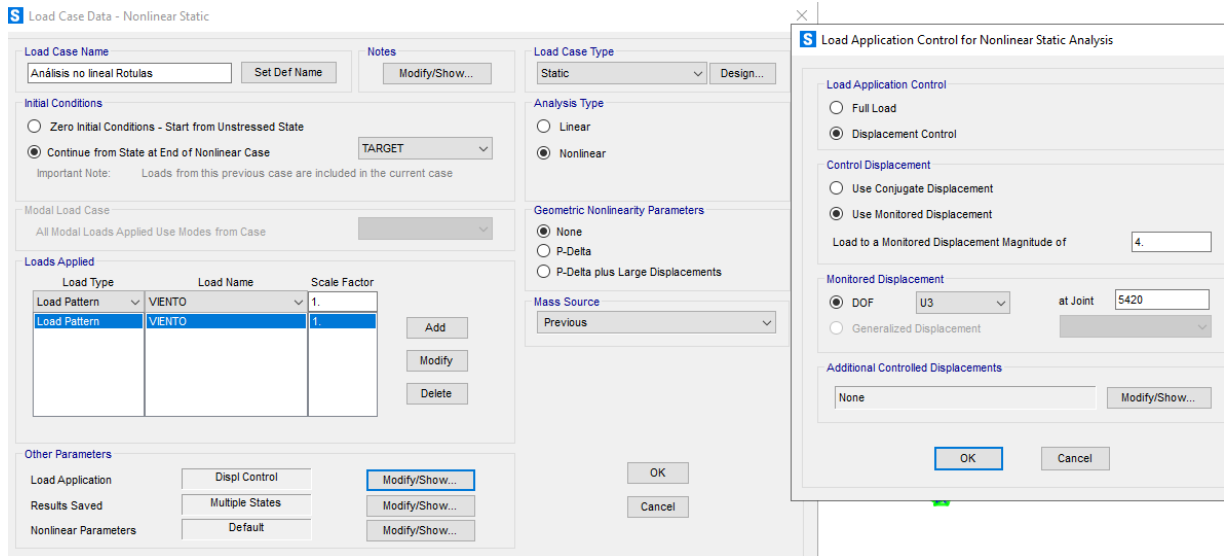
Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Por último toca definir el estado de carga, colocando como punto de control como se mencionó antes, al punto ubicado más al centro de la capa superior en la malla tensegrítica (figura 170); esto debido a que se trabajó finalmente con fuerzas a succión, siendo el estado más crítico de cargas que se evidenció antes (datos de la norma); además previamente se hizo un análisis con cargas a succión y otro con cargas a presión, ambos para una misma malla, evidenciando así que las fuerzas a succión ligeramente hace que las fuerzas internas y las reacciones sean mayores, por lo que se considera como estado crítico.

Figura 170

Definición del estado de cargas para el análisis estático no lineal, en el programa

SAP2000 (1er diseño).



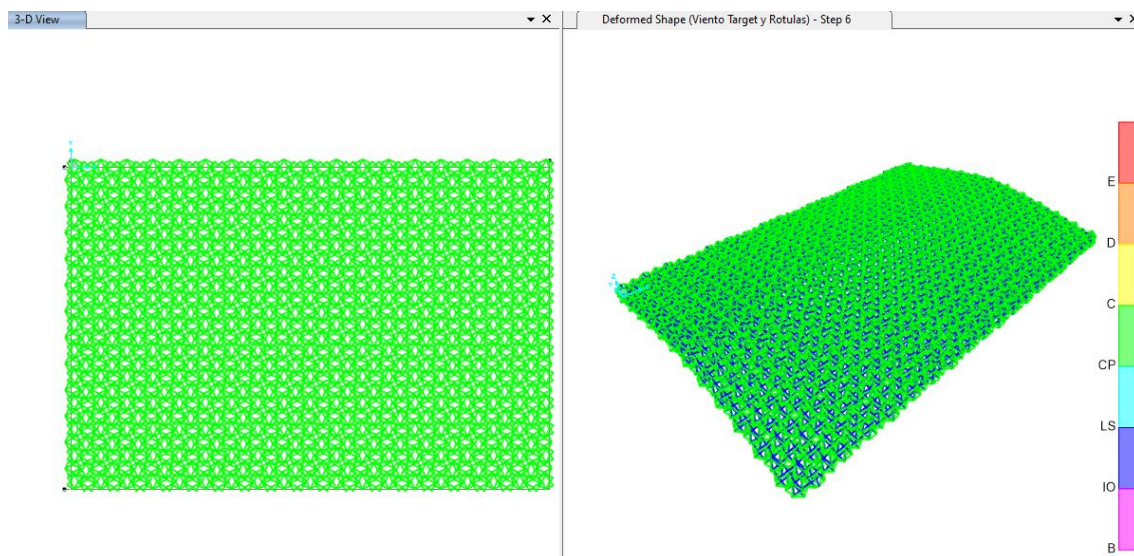
Nota: Estado de cargas para el análisis estático no lineal. Elaboración propia.

Luego de tener todo listo, se procede a correr el programa, obteniendo los resultados respectivos; hay que aclarar que en la figura 171 se puede ver como la estructura recién toma una forma cóncava, gracias a las fuerzas de succión del viento que incrementan hasta que algún elemento falla, a diferencia del análisis elástico, donde se obtiene una deformada convexa.

Como se puede ver en la figura 172, tras el análisis estático no lineal, la malla tensegrática falla en el step 6, evidenciando a los elementos compresores que presentan rotulación, los cuales han llegado a su fuerza axial máxima.

Figura 171

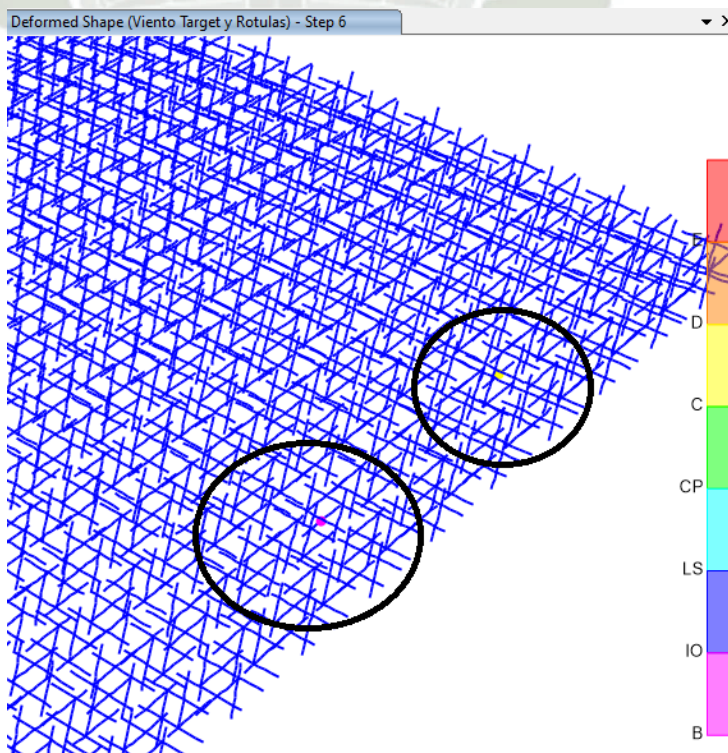
Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis estático no lineal bajo cargas de viento (1er diseño).



Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 172

Step 6 de falla de malla tensegrítica tras el análisis estático no lineal (1er diseño).

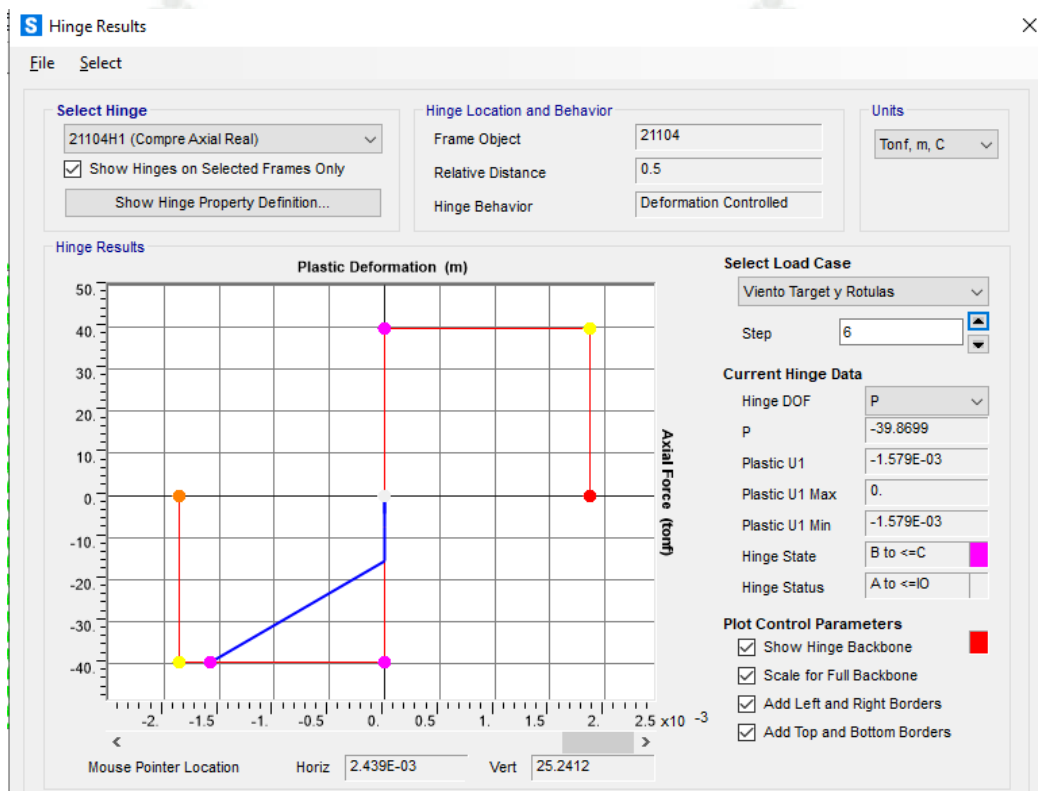


Nota: Elementos rotulados, mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Observando los resultados de la rótula del primer elemento en fallar (elemento con círculo de color rosado en figura 172), podemos evidenciar que efectivamente alcanzó la falla (figura 173).

Figura 173

Resultados de la Rótula del primer elemento en fallar tras el análisis estático no lineal (1er diseño).



Nota: Gráfica de fuerzas internas del elemento con rotulación, fallando en el step 6, alcanzando su fuerza máxima, mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Al fallar este elemento, toda la estructura también falla, y esto se deduce fácilmente ya que en un sistema tensegrítico, si un elemento falla, toda la estructura lo hace también, porque las fuerzas axiales entran en desequilibrio rápidamente, haciendo imposible a la malla alcanzar el equilibrio nuevamente.

Los resultados alcanzados de la malla tensegrítica antes de lograr este fallo son los que se muestran en la tabla 30.

Tabla 30

Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis estático no lineal (1er diseño de malla).

Fuerza Axial Máxima (kgf)	Fuerza Axial Mínima (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Desplazamiento máximo (cm)	Desplazamiento mínimo (cm)
27884.47	-39869.88	10605.59	362.16	55.114002	-27.672312

Para obtener finalmente la velocidad de viento con la que falla la estructura se debe determinar un factor de escala (tabla 31), dividiendo los valores de fuerzas de ambos análisis realizados (análisis elástico y análisis estático no lineal); estas fuerzas lógicamente son de las fuerzas axiales mínimas que alcanzaron los compresores, ya que fuerzas negativas nos indican compresión.

Tabla 31

Determinación del factor de escala para la velocidad de viento (1er diseño).

Malla tensegrítica	Step de falla	Resistencia a Compresión (kgf)	Fuerza Axial (A. elástico) (kgf)	Factor de escala
Compresores 4" e=2mm Cables 2.6 cm	6	-39869.88	-8971.59	4.44

Este factor se multiplicará con la presión inicial de viento de diseño que se viene usando en todo el trabajo (30.345 kgf/cm²), considerada así para una velocidad de diseño de 85 km/h; esta operación genera una nueva presión de viento (presión de falla de la estructura), a la cual si se le amplifica un 20% por efectos dinámicos y si se le hace un

proceso inverso a como se determina inicialmente, se obtiene la velocidad de falla. A continuación, se muestran estos cálculos correspondientes:

- El proceso normal para determinar la presión del viento es mediante la fórmula de la Ecuación 2.

Considerando 85 km/h la velocidad de viento y $c = 0.7$ (factor de forma).

Amplificando esta presión de viento se tiene:

$$P = 1.2 P_h \quad (42)$$

Dando como resultado:

$$P = 30.345 \text{ kgf/m}^2 \quad (43)$$

Este es el valor de la presión de viento usada durante toda la investigación.

- Se procede ahora a multiplicar ese valor por nuestro factor de escala:

$$P_{falla} = 4.44 P \quad (44)$$

$$P_{falla} = 4.44 (30.345 \text{ kgf/m}^2) \quad (45)$$

$$P_{falla} = 134.85 \text{ kgf/m}^2 \quad (46)$$

- Con esta presión de falla de la estructura, se hace el proceso inverso que se mencionó, para obtener el valor de la velocidad:

$$P_{falla} = (1.2)0.005 c V_{falla}^2 \quad (47)$$

$$\frac{P_{falla}}{(1.2)(0.005)(0.7)} = V_{falla}^2 \quad (48)$$

$$\sqrt{\frac{P_{falla}}{(1.2)(0.005)(0.7)}} = V_{falla} \quad (49)$$

$$\sqrt{\frac{134.85}{(1.2)(0.005)(0.7)}} = V_{falla} \quad (50)$$

$$V_{falla} = 179.19 \text{ km/h} \quad (51)$$

El valor de la Ecuación 51 nos muestra finalmente que la malla tensegrítica resiste velocidades de viento mucho más altas de las que nos puede ofrecer una cobertura metálica convencional, sin embargo, gracias al análisis elástico realizado, podemos saber que el peso de la estructura es demasiado grande, al igual que la densidad de acero usada en la malla, un aspecto muy importante que no se está considerando en la investigación. Para poder verificar dicha hipótesis se realizará un metrado de acero de ambas estructuras, los cuales se detallarán en la tabla 32 y en la tabla 33.

Tabla 32

Metrado de acero de Estructura metálica convencional.

Elemento	Cantidad	Longitud (m)	Área (m ²)	Total (m ³)	Peso (kg)
Columna 4pulg 3mm Lado izquierdo	7	8.00000	0.00093	0.05204	408.51285
Columna 4pulg 3mm Lado derecho	7	8.00000	0.00093	0.05204	408.51285
Tubo superior Viga 4pulg 2.5mm	7	21.46000	0.00078	0.11692	917.82726
Tubo inferior Viga 4pulg 2.5mm	7	21.46000	0.00078	0.11692	917.82726
Tubos intermedios 1 1/2 pulg 2.5 mm	14	30.54701	0.00028	0.11957	938.65570
Tubos largos medio 2 pulg 2.5mm	12	32.71491	0.00038	0.14892	1169.05165
Acero total=				0.6064	4760.3876

Nota. Todos estos datos se obtuvieron considerando un peso de 7850 kgf/cm³ para el acero A36, material usado en esta cobertura.

Tabla 33

Metrado de acero de Malla tensegrítica final (1er diseño).

Elementos	Cant. De elementos	Long. X elemento	Long Total	Área (m2)	Total (m3)	Peso Acero usado (kg/m3)	Peso (kg)
Tensores 2.6 cm	22200	0.6124	13595.28	0.000530929	7.2181	4407.3677	31812.9552
Compresores 4" e=2mm	5550	1	5550	0.001048915	5.8215	7850.0000	45698.6023
Acero total =							77511.5575

Nota. Todos estos datos se obtuvieron también considerando las propiedades de cada material usado

Como se puede observar en las tablas de metrados, la malla tensegrítica tiene aproximadamente 16 veces la cantidad de acero que tiene la cobertura metálica convencional, algo muy desproporcional considerando que se busca hacer una comparación pareja, sin embargo, esto evidencia que usando los mismos elementos no se logra una comparación equitativa.

Es por esta razón que se volverá a realizar todo este procedimiento, tanto el análisis elástico como el análisis estático no lineal, pero ahora se realizará considerando la densidad de acero, ya no el área ni los materiales de los elementos.

11.2. Análisis elástico y análisis estático no lineal de malla tensegrítica final (2do diseño)

Para poder guiarnos ahora de la densidad de acero en las estructuras, el primer paso para rediseñar la malla tensegrítica en base a Octaedros expandidos, será escoger materiales y secciones que nos permitan igualar el peso total de acero, y para ello se escogió un material diferente al acero A36 para los compresores, el cual es un acero ASTM A500, que lo

proporciona una empresa conocida en nuestra ciudad: “Aceros Arequipa”. El catálogo de esta empresa nos proporciona distintas secciones de tuberías estructurales, desde rectangulares hasta circulares; para este caso se escogerá el tubo más pequeño que nos puede ofrecer, siendo de 1/4” de diámetro con un espesor de 1.8 mm.

Figura 174

Segunda selección de Barra a usar, mediante un catálogo de Compresores (Barras).

DESIGNACIONES Y PESOS NOMINALES en Kg/m											
Designación Nominal	Dimensión exterior (mm)	Espesores (mm)									
		1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	3.0	3.3	4.0	4.5	6.0
REDONDO NOMINAL	1/4"	13.70	0.53	0.58	0.65						
	3/8"	17.10	0.68	0.75	0.84						
	1/2"	21.30	0.87	0.95	1.08	1.16	1.35				
	3/4"	26.70	1.11	1.22	1.38	1.49	1.75				
	1"	33.40	1.40	1.55	1.76	1.91	2.25				
	1 1/4"	42.20	1.79	1.98	2.26	2.45	2.90				
	1 1/2"	48.30	2.06	2.28	2.61	2.82	3.35	3.66	4.37		
	2"	60.30	2.60	2.88	3.29	3.56	4.24	4.64	5.56		
	2 1/2"	73.00		3.50		4.35	5.18	5.67	6.81		
	3"	88.90		4.29		5.33	6.36	6.97	8.38		
4"	114.30		5.54		6.90	8.24	9.04	10.88			

Nota. Adaptada de *Catálogo de productos y servicios* (p. 8), por Aceros Arequipa, 2023, Aceros Arequipa.

Para los cables, se seguirá usando el catálogo que se usó para el primer diseño de malla tensegrítica, incluso se seguirá usando el mismo tipo de cable, pero esta vez se seleccionará el de menor dimensión, de 5mm, ofreciéndonos un peso mucho menor al de antes (figura 175), siendo de 0.0865 kg/m, y ofreciéndonos también una menor capacidad de carga antes de su rotura, una carga de 13 kN, equivalente a 1325.63 kgf.

Figura 175

Segunda Selección de Cable a usar, mediante un catálogo de Tensores (cables).

Ø 5 a 50 mm

6 x 37 + 1

CABLE 6x37 STANDARD (1+6+12+18)+FE = 222 HILOS

Gris engrasado		Galvanizado	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Carga de rotura calculada		Carga de rotura mínima	
CD	CI	CD			(kN)	(kp)	(kN)	(kp)
9380500	9380501	9380502	5	0,0865	15,8	1610	13	1330
9380600	9380601	9380602	6	0,125	22.8	2320	18.8	1910
9380700	9380701	9380702	7	0,170	31.0	3150	25.6	2600
9380800	9380801	9380802	8	0,221	40.5	4120	33.4	3400
9380900	9380901	9380902	9	0,280	51.2	5210	42.3	4300
9381000	9381001	9381002	10	0,346	63.3	6430	52.2	5310
9381100	9381101	9381102	11	0,419	76.5	7780	63.1	6420
9381200	9381201	9381202	12	0,498	91.1	9260	75.1	7640
9381300	9381301	9381302	13	0,585	107	10900	88.2	8970
9381400	9381401	9381402	14	0,678	124	12600	102	10400
9381600	9381601	9381602	16	0,886	162	16500	134	13600
9381800	9381801	9381802	18	1,120	205	20800	169	17200
9382000	9382001	9382002	20	1,380	253	25700	209	21200
9382200	9382201	9382202	22	1,670	306	31100	253	25700
9382400	9382401	9382402	24	1,990	364	37100	301	30600
9382600	9382601	9382602	26	2,340	428	43500	353	35900
9382800	9382801	9382802	28	2,710	496	50400	409	41600
9383200	9383201	9383202	32	3,540	648	65900	534	54300
9383600	9383601	9383602	36	4,480	820	83400	676	68800
9384000	9384001	9384002	40	5,540	1010	103000	835	84900
9384400	9384401	9384402	44	6,700	1220	125000	1010	103000
9384800	9384801	9384802	48	7,970	1460	148000	1200	122000
9385000	9385001	9385002	50	8,560	1580	161000	1300	133000

Nota. Adaptada de *CABLE* (p. 9), por CargoFlet Blasant, s.f., CargoFlet Blasant.

Así pues, metrando la malla con estos nuevos elementos (tabla 34) se obtiene un total de 4117.49 kg de acero, un valor muy similar al que se usa en la cobertura metálica convencional, siendo de 4760.39 kg, incluso es ligeramente menor.

Tabla 34

Metrado de acero de Malla tensegrítica final (2do diseño).

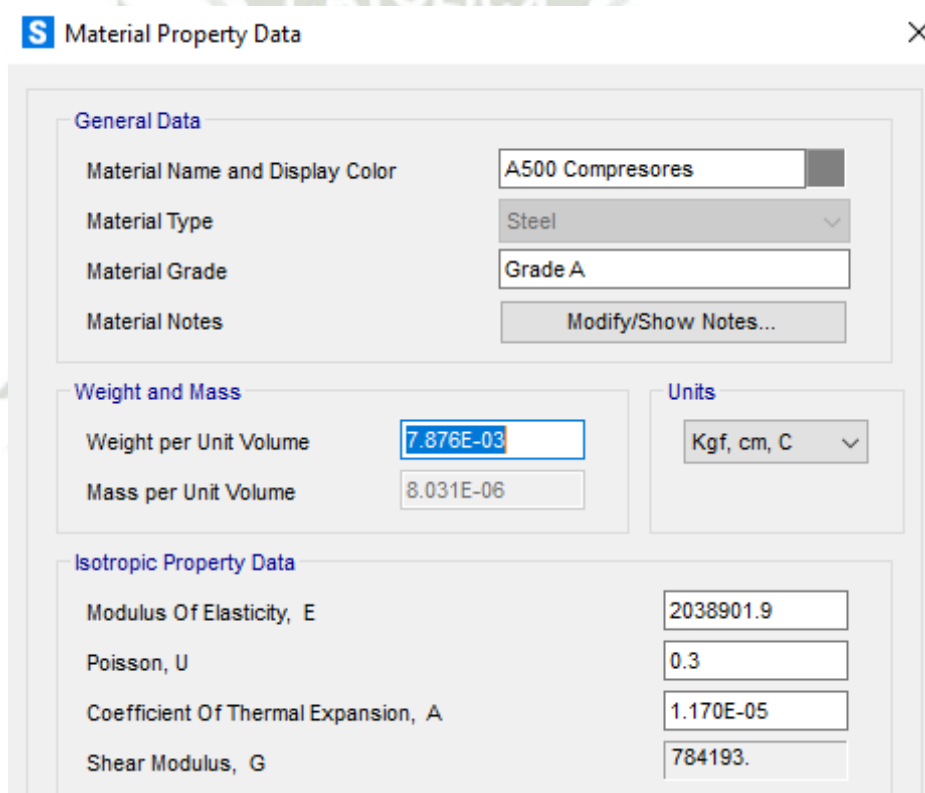
Elementos	Cant. De elementos	Long. x elemento	Long Total	Área (m2)	Total (m3)	Peso Acero usado (kg/m3)	Peso (kg)
Tensores 5mm	22200	0.6124	13595.28	1.9635E-05	0.2669	4405.4088	1175.9917
Compresores 1/4"	5550	1	5550	6.72929E-05	0.3735	7876.0149	2941.5
Acero total =							4117.4917

Se modelará entonces a la malla tensegrítica con estos nuevos materiales y elementos en el programa SAP2000.

Primero se mostrará el material del Acero A500 (figura 176) y la sección de los compresores (figura 177), y luego se mostrará el material del cable que es el mismo de antes (figura 178), y la nueva sección del cable (figura 179).

Figura 176

Definición de material para barras en programa SAP2000 (2do diseño).



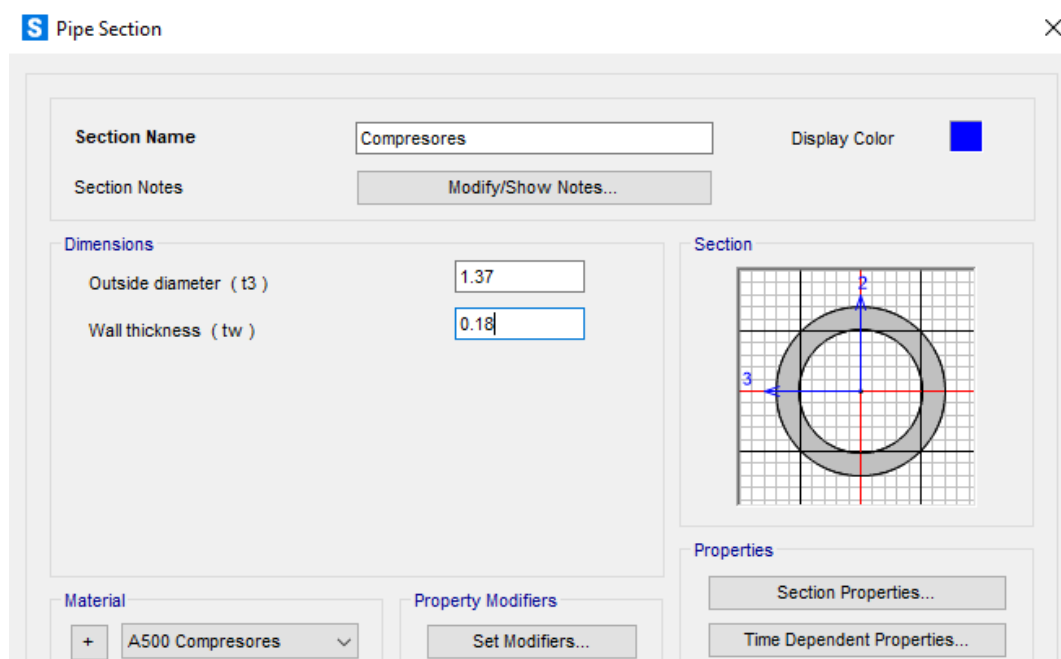
The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box in SAP2000. The material is named 'A500 Compresores' and is classified as 'Steel' with 'Grade A'. The 'Weight and Mass' section shows a weight per unit volume of $7.876E-03$ and a mass per unit volume of $8.031E-06$. The 'Isotropic Property Data' section lists the Modulus Of Elasticity, E as 2038901.9, Poisson, U as 0.3, Coefficient Of Thermal Expansion, A as $1.170E-05$, and Shear Modulus, G as 784193. The units are set to 'Kgf, cm, C'.

Property	Value
Material Name and Display Color	A500 Compresores
Material Type	Steel
Material Grade	Grade A
Weight per Unit Volume	$7.876E-03$
Mass per Unit Volume	$8.031E-06$
Modulus Of Elasticity, E	2038901.9
Poisson, U	0.3
Coefficient Of Thermal Expansion, A	$1.170E-05$
Shear Modulus, G	784193.

Nota: Elaboración propia.

Figura 177

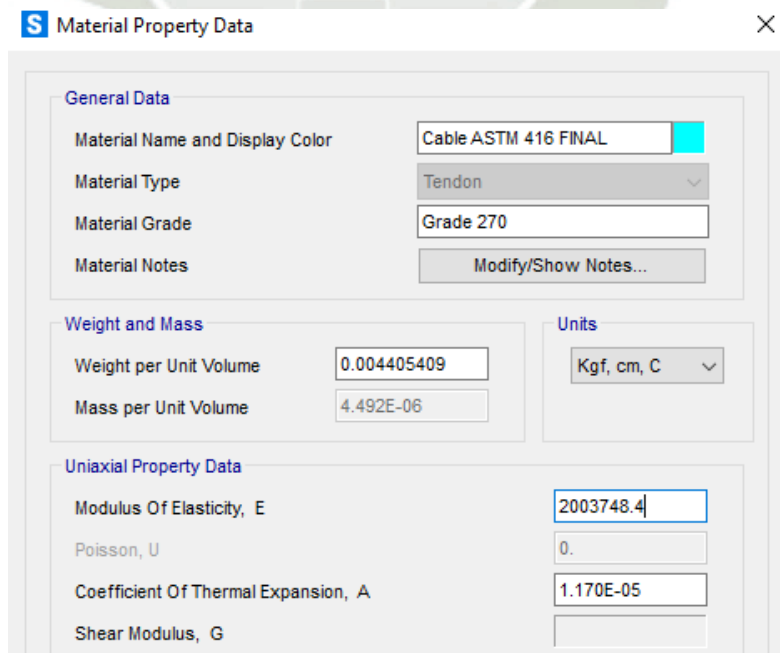
Definición de propiedades geométricas para barras en programa SAP2000 (2do diseño).



Nota: Elaboración propia.

Figura 178

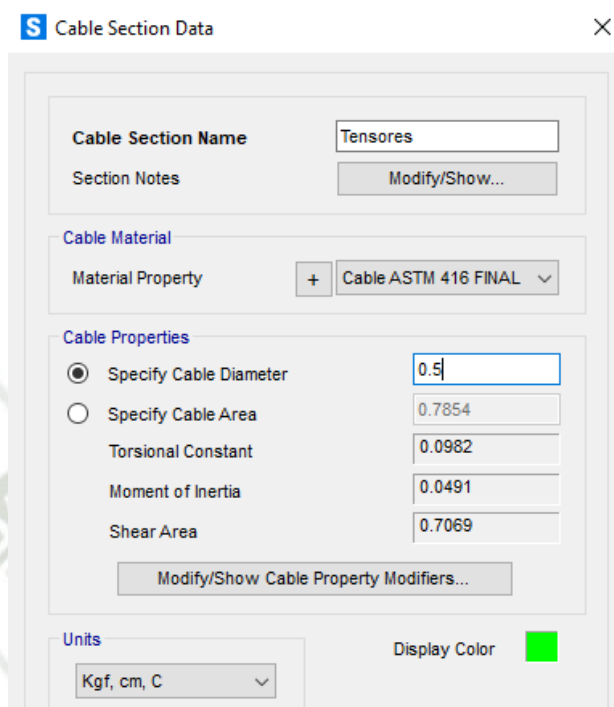
Definición de material para cables en programa SAP2000 (2do diseño).



Nota: Elaboración propia.

Figura 179

Definición de propiedades geométricas para cables en programa SAP2000 (2do diseño).

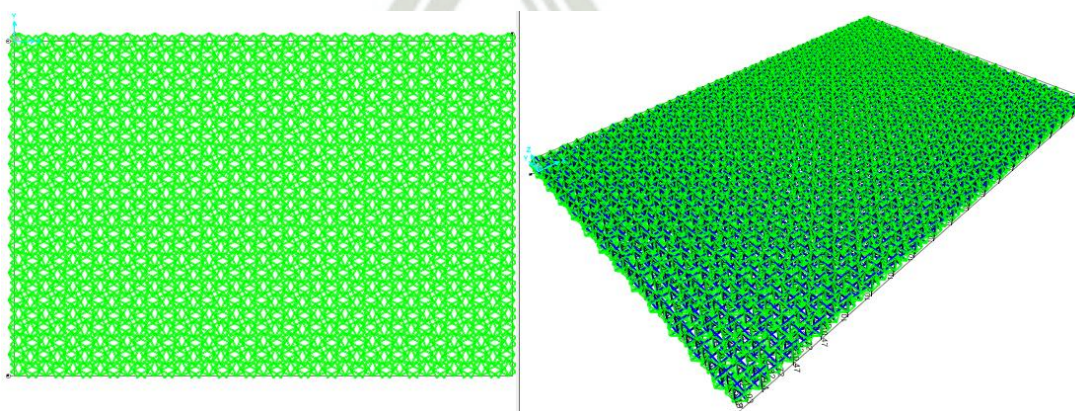


Nota: Elaboración propia.

Como ya se tiene modelada la malla tensegrítica y se la tiene cargada con fuerzas de viento en cada punto (método de área tributaria), ya se tiene la malla lista para analizar.

Figura 180

Malla tensegrítica final, previamente modelada en SAP2000 (2do diseño).



Nota: Vista en planta y vista isométrica de Malla Tensegrítica final. Elaboración propia.

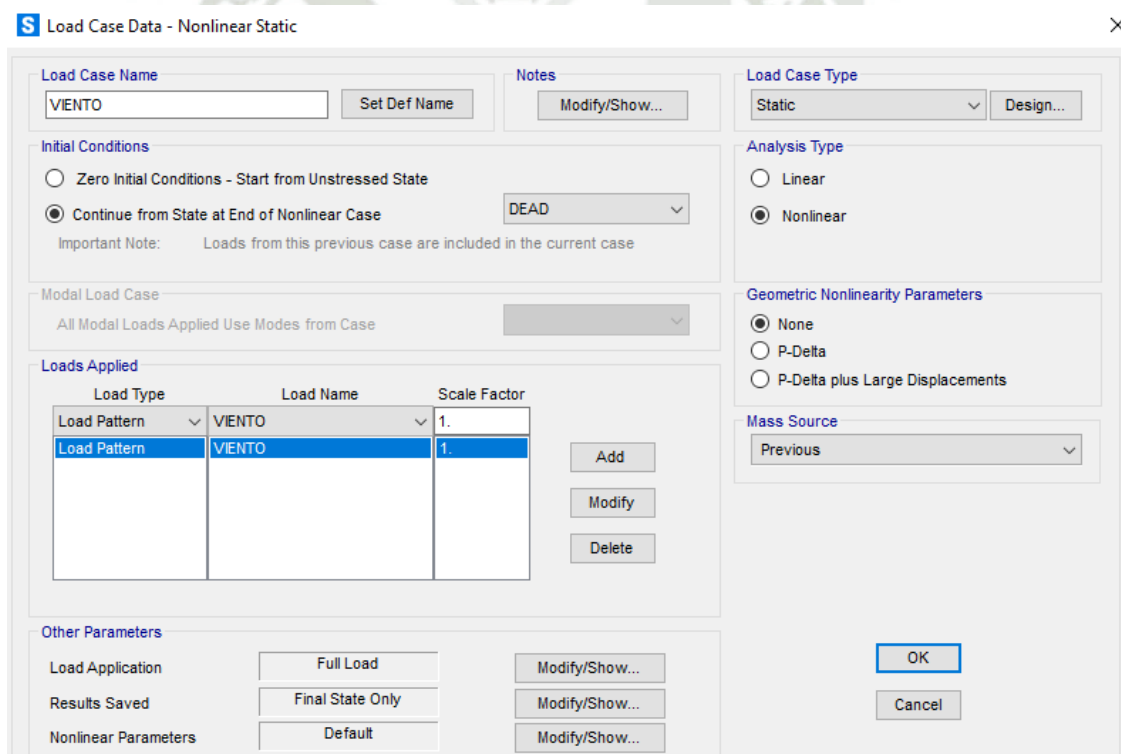
Solo queda definir los casos de carga y colocar las rótulas respectivas para el análisis elástico y el estático no lineal.

11.2.1. Análisis elástico (2do diseño)

Tal cual como se hizo en el diseño de la primera malla tensegrítica, se define el estado de cargas de viento, analizando primero la carga muerta de la estructura y luego las cargas de viento (figura 181).

Figura 181

Definición del estado de cargas para el análisis elástico, en el programa SAP2000 (2do diseño).



S Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: VIENTO [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Nonlinear Case [DEAD] [v]
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [v]

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	VIENTO	1.
Load Pattern	VIENTO	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Other Parameters:
 Load Application: Full Load [Modify/Show...]
 Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
 Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

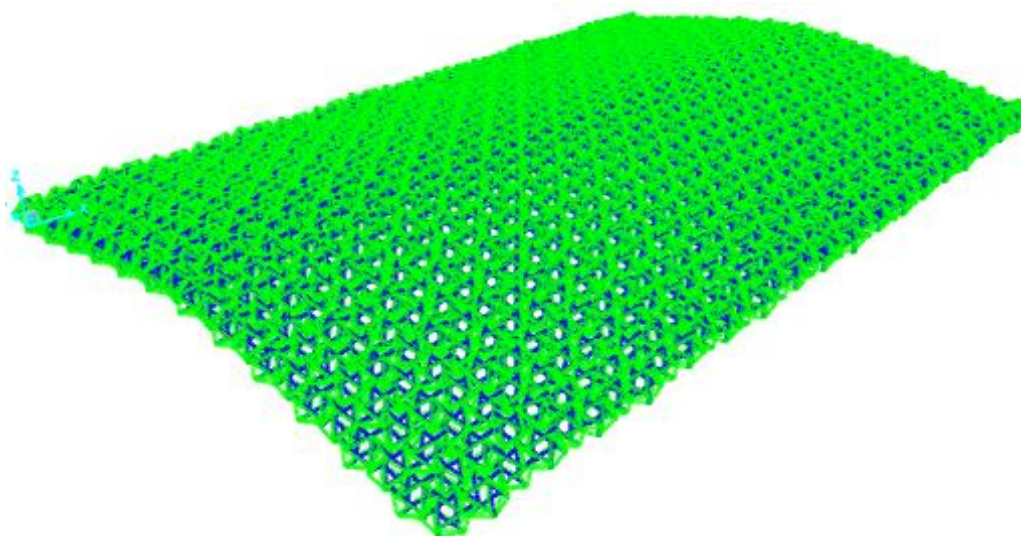
[OK] [Cancel]

Nota: Estado de cargas para el análisis elástico. Elaboración propia.

Tras el análisis de este estado de carga, se puede apreciar la deformada que toma la estructura en la figura 182.

Figura 182

Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis elástico bajo cargas de viento (2do diseño).



Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Como sucedió con el diseño anterior, solo se mostrarán los resultados máximos y mínimos de las fuerzas y los desplazamientos, ya que son demasiados elementos y demasiados puntos.

Tabla 35

Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis elástico (2do diseño de malla).

Fuerza Axial Máxima (kgf)	Fuerza Axial Mínima (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Desplazamiento máximo (cm)	Desplazamiento mínimo (cm)
984.44	-1492.2	391.24	-1155.85	47.193964	-2.087108

Los resultados de la tabla 35 muestran que la fuerza de compresión mínima de cada elemento compresor del sistema debe ser de 1492 kgf para que la estructura resista una velocidad de 85 km/h.

Observando la deformada de la malla (figura 182), se puede apreciar que, como se está usando elementos mucho más pequeños, este segundo diseño de malla se rige por las fuerzas externas del viento y no por el peso propio de la estructura, adoptando la forma cóncava que se debe formar normalmente, afirmando así que el primer diseño de malla tensegrítica estaba excesivamente sobredimensionado, por lo que no era correcto. Este segundo diseño si esta apto para una comparación adecuada, sin embargo, aún falta obtener los resultados del análisis estático no lineal.

11.2.2. Análisis estático no lineal (2do diseño)

Para el análisis estático no lineal de este segundo diseño, se debe hacer lo mismo que se hizo en el primero, obtener las rótulas plásticas de los compresores, los cuales tendrán un nuevo diagrama de Fuerza-Desplazamiento ya que las áreas de los compresores son más pequeñas, y no solo eso, sino que también el material usado es diferente (ASTM A500), por lo que el diagrama de Esfuerzo-Deformación en este caso también será diferente; como ya se mencionó antes, al cambiar de formas geométricas, las rótulas cambian, y más aún si el material también.

Tras el uso de las fórmulas usadas en el primer diseño de la malla tensegrítica (Ecuaciones 22, 23 y 24), se consigue un esfuerzo crítico (F_{cr}) de 83.72 kgf/cm² con un valor de 2.95 para la relación límite ancho espesor, indicando que las barras con 1/4" de diámetro con espesor de 1.8 mm funcionan como columnas largas, y llegan a la rotulación con una fuerza interna de 215.03 kgf.

Tras el análisis estático no lineal en el programa SAP2000, no se consiguen resultados positivos, directamente el programa no puede analizar la estructura ya que la fuerza que soportan los elementos compresores antes de fallar es muy baja, y ni siquiera pueden soportar el peso propio de la estructura; y todo esto es fácil de observar, ya que en

el análisis elástico, el valor mínimo de los compresores es de 1492 kgf, y el elemento presenta rotulación con 215.03 kgf, esto quiere decir que jamás alcanzará los 85 km/h que alcanza el viento en nuestra ciudad.

Por esta razón este diseño para la malla tensegrítica es inviable; en el siguiente apartado se procederá a encontrar un diseño apto para la comparación.

11.3. Análisis elástico y análisis estático no lineal de malla tensegrítica final (3er diseño)

Guiándonos nuevamente por la densidad de acero, se diseñará por tercera vez la malla tensegrítica final obtenida en el capítulo anterior. Para este caso se escogerá nuevamente un compresor brindado por “Aceros Arequipa”, formado con acero ASTM500; la barra escogida será de 1” con un espesor de 2mm (figura 183).

Figura 183

Tercera selección de Barra a usar, mediante un catálogo de Compresores (Barras).

DESIGNACIONES Y PESOS NOMINALES en Kg/m											
Designación Nominal	Dimensión exterior (mm)	Espesores (mm)									
		1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	3.0	3.3	4.0	4.5	6.0
REDONDO NOMINAL	1/4"	13.70	0.53	0.58	0.65						
	3/8"	17.10	0.68	0.75	0.84						
	1/2"	21.30	0.87	0.95	1.08	1.16	1.35				
	3/4"	26.70	1.11	1.22	1.38	1.49	1.75				
	1"	33.40	1.40	1.55	1.76	1.91	2.25				
	1 1/4"	42.20	1.79	1.98	2.26	2.45	2.90				
	1 1/2"	48.30	2.06	2.28	2.61	2.82	3.35	3.66	4.37		
	2"	60.30	2.60	2.88	3.29	3.56	4.24	4.64	5.56		
	□ 2 1/2"	73.00		3.50		4.35	5.18	5.67	6.81		
	3"	88.90		4.29		5.33	6.36	6.97	8.38		
4"	114.30		5.54		6.90	8.24	9.04	10.88			
CUADRADO L.E.	-	25 x 25	1.06	1.46							
	-	30 x 30	1.30	1.70							
	-	40 x 40	1.78	2.24			3.32				
	-	50 x 50	2.25	3.12		3.87	4.32				
	-	2"	50,8		3.12		3.87	4.32			
	-	75 x 75		4.50		5.56	6.81				
	-	100 x 100		6.17		7.68	9.17		12.13	13.59	16.98

Nota. Adaptada de *Catálogo de productos y servicios* (p. 8), por Aceros Arequipa, 2023,


Aceros Arequipa.

La elección del cable, se hace nuevamente del catálogo usado en los demás diseños, usando también el mismo tipo de cable, pero para esta ocasión se seleccionará un diámetro de 10mm o 1cm, ofreciéndonos un peso de 0.346 kg/m y una capacidad de carga de 52.2 kN o 5322.92 kgf antes de fracturarse (figura 184).

Figura 184

Tercera Selección de Cable a usar, mediante un catálogo de Tensores (cables).

Ø 5 a 50 mm



6 x 37 + 1

CABLE 6x37 STANDARD (1+6+12+18)+FE = 222 HILOS

Gris engrasado		Galvanizado	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Carga de rotura calculada		Carga de rotura mínima	
CD	CI	CD			(kN)	(kp)	(kN)	(kp)
9380500	9380501	9380502	5	0,0865	15,8	1610	13	1330
9380600	9380601	9380602	6	0,125	22.8	2320	18.8	1910
9380700	9380701	9380702	7	0,170	31.0	3150	25.6	2600
9380800	9380801	9380802	8	0,221	40.5	4120	33.4	3400
9380900	9380901	9380902	9	0,280	51.2	5210	42.3	4300
9381000	9381001	9381002	10	0,346	63.3	6430	52.2	5310
9381100	9381101	9381102	11	0,419	76.5	7780	63.1	6420
9381200	9381201	9381202	12	0,498	91.1	9260	75.1	7640
9381300	9381301	9381302	13	0,585	107	10900	88.2	8970
9381400	9381401	9381402	14	0,678	124	12600	102	10400
9381600	9381601	9381602	16	0,886	162	16500	134	13600
9381800	9381801	9381802	18	1,120	205	20800	169	17200
9382000	9382001	9382002	20	1,380	253	25700	209	21200
9382200	9382201	9382202	22	1,670	306	31100	253	25700
9382400	9382401	9382402	24	1,990	364	37100	301	30600
9382600	9382601	9382602	26	2,340	428	43500	353	35900
9382800	9382801	9382802	28	2,710	496	50400	409	41600
9383200	9383201	9383202	32	3,540	648	65900	534	54300
9383600	9383601	9383602	36	4,480	820	83400	676	68800
9384000	9384001	9384002	40	5,540	1010	103000	835	84900
9384400	9384401	9384402	44	6,700	1220	125000	1010	103000
9384800	9384801	9384802	48	7,970	1460	148000	1200	122000
9385000	9385001	9385002	50	8,560	1580	161000	1300	133000

Nota. Adaptada de *CABLE* (p. 9), por CargoFlet Blasant, s.f., CargoFlet Blasant.

Metrando la estructura con estos elementos y materiales se obtiene un total de 13306.47 kg de acero (Tabla 36), triplicando aproximadamente la cantidad de acero usada en la cobertura metálica convencional, siendo un valor aceptable para la comparación final.

Tabla 36

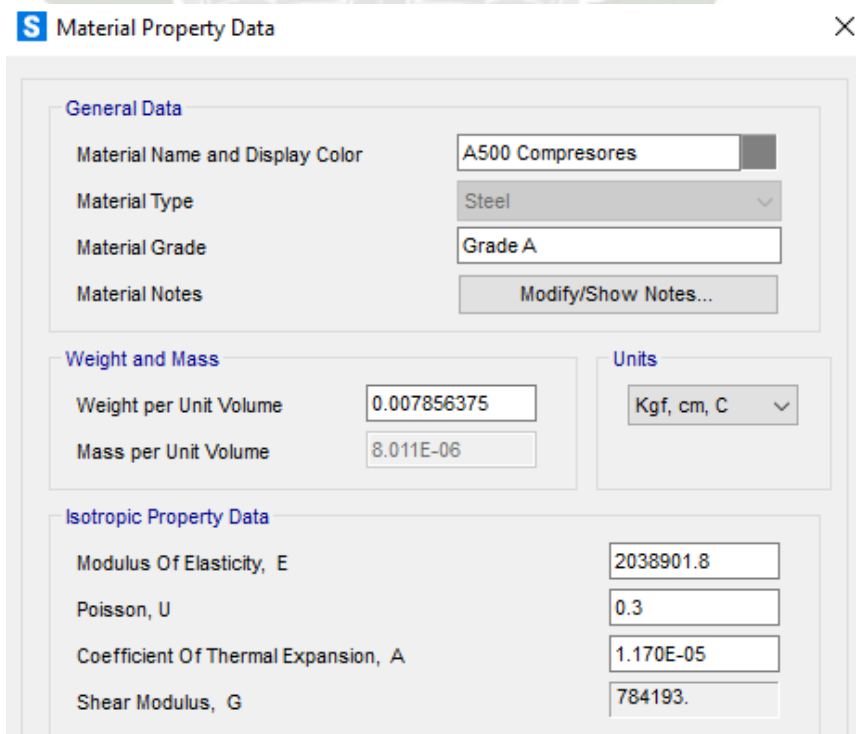
Metrado de acero de Malla tensegrítica final (3er diseño).

Elementos	Cant. De elementos	Long. x elemento	Long Total	Área (m2)	Total (m3)	Peso Acero usado (kg/m3)	Peso (kg)
Tensores 10mm	22200	0.6124	13595.28	7.85398E-05	1.0678	4405.4088	4703.9669
Compresores 1"	5550	1	5550	0.000197292	1.0950	7856.3746	8602.5
Acero total=							13306.4669

Sabiendo que el peso de la estructura es aceptable, se procede a modelar la estructura en el programa SAP; primero se mostrará la inserción del Acero ASTM A500 con las propiedades geométricas de las barras compresores (figuras 185 y 186) y luego se mostrará la inserción de los cables con su respectivo material (187 y 188).

Figura 185

Definición de material para barras en programa SAP2000 (3er diseño).



S Material Property Data ×

General Data

Material Name and Display Color: A500 Compresores

Material Type: Steel

Material Grade: Grade A

Material Notes: [Modify/Show Notes...](#)

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 0.007856375

Mass per Unit Volume: 8.011E-06

Units

Kgf, cm, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 2038901.8

Poisson, U: 0.3

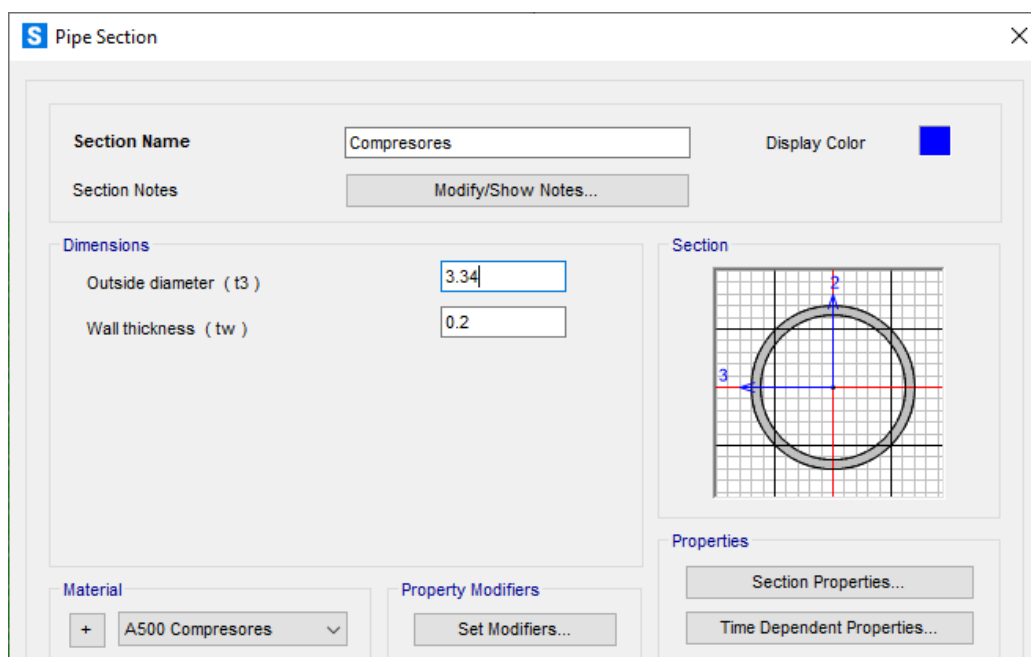
Coefficient Of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 784193.

Nota: Elaboración propia.

Figura 186

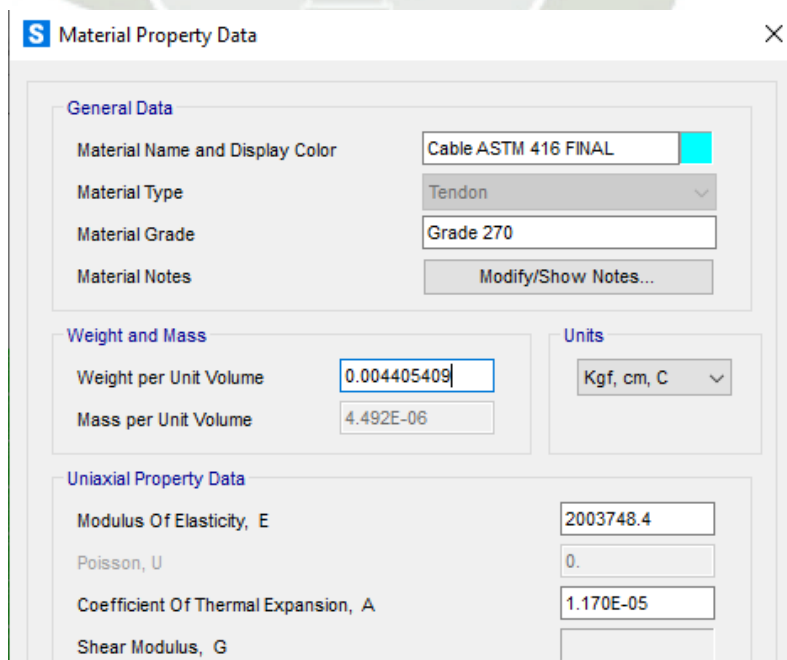
Definición de propiedades geométricas para barras en programa SAP2000 (3er diseño).



Nota: Elaboración propia.

Figura 187

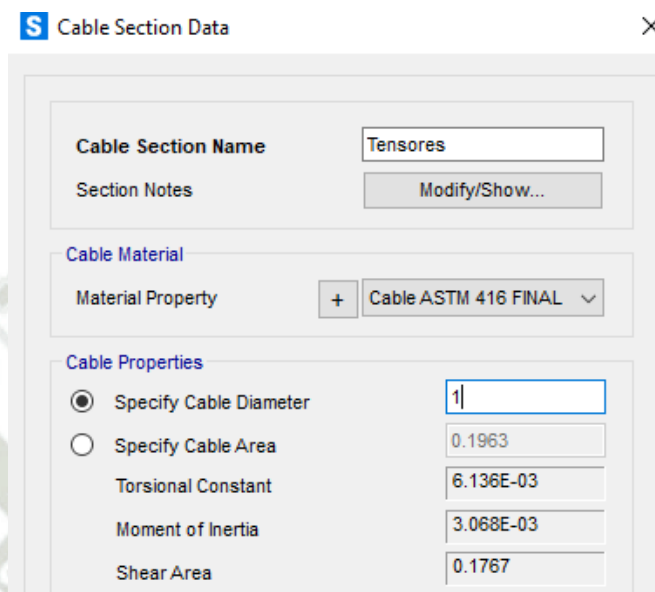
Definición de material para cables en programa SAP2000 (3er diseño).



Nota: Elaboración propia.

Figura 188

Definición de propiedades geométricas para cables en programa SAP2000 (3er diseño).

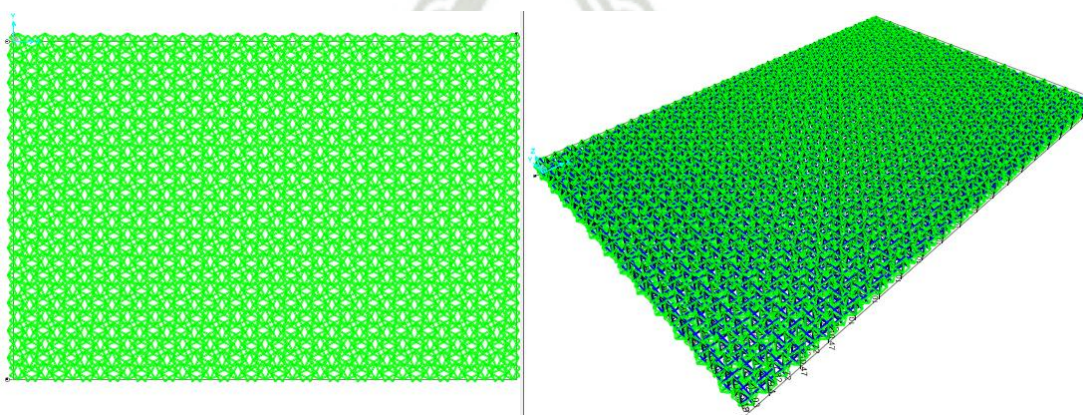


Nota: Elaboración propia.

Al igual que con el anterior diseño, como la malla ya se tiene modelada, simplemente se actualiza la estructura con los nuevos elementos y materiales que se modificaron; incluso ya se tienen cargadas todas las fuerzas de viento en cada punto respectivo de la capa superior, por lo que no es necesario volver a hacerlo.

Figura 189

Malla tensegrítica final, previamente modelada en SAP2000 (3er diseño).



Nota: Vista en planta y vista isométrica de Malla Tensegrítica final. Elaboración propia.

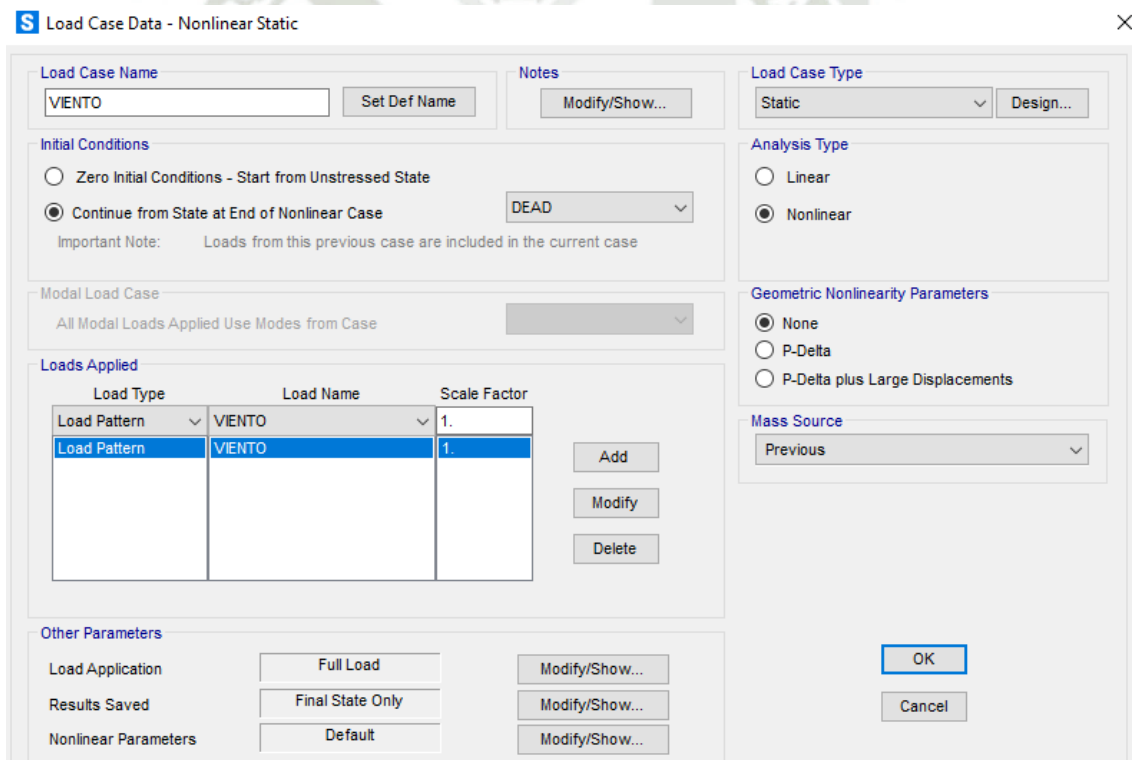
Únicamente falta definir los estados de carga y colocar las rótulas plásticas respectivas para el análisis elástico y para el análisis estático no lineal.

11.3.1. Análisis Elástico (3er diseño)

Como se viene haciendo en los diseños anteriores, se define el mismo estado de cargas de viento, analizando previamente la carga muerta de la estructura antes de pasar a analizar las fuerzas de viento.

Figura 190

Definición del estado de cargas para el análisis elástico, en el programa SAP2000 (3er diseño).



S Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: VIENTO [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case [DEAD]

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case []

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	VIENTO	1.
Load Pattern	VIENTO	1.

Buttons: Add, Modify, Delete

Other Parameters:

- Load Application: Full Load [Modify/Show...]
- Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

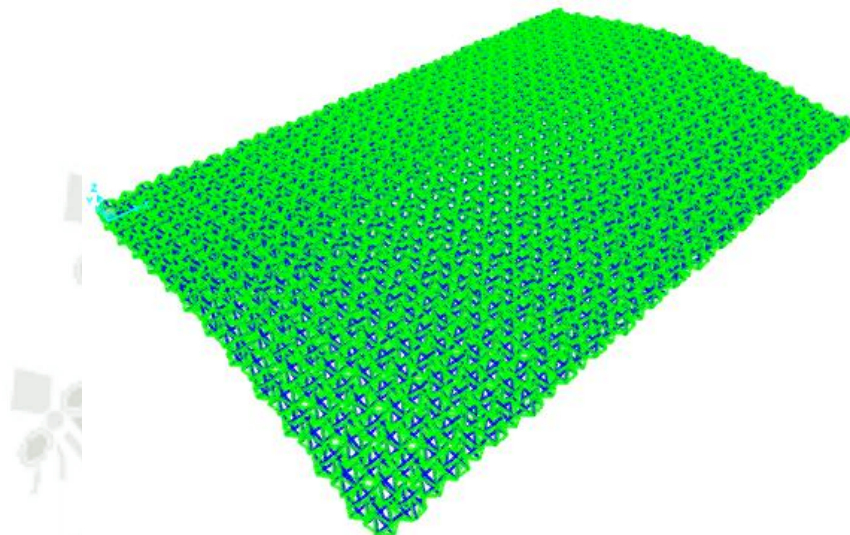
Buttons: OK, Cancel

Nota: Estado de cargas para el análisis elástico. Elaboración propia.

Tras el análisis de este estado de carga mostrado en la figura 190, se puede apreciar la deformada que toma la estructura en la figura 191.

Figura 191

Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis elástico bajo cargas de viento (3er diseño).



Nota: Estado de cargas para el análisis elástico. Elaboración propia.

Nuevamente, solo se mostrará un cuadro con los desplazamientos máximos y mínimos, al igual que las fuerzas internas máximas y mínimas.

Tabla 37

Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis elástico (3er diseño de malla).

Fuerza Axial Máxima (kgf)	Fuerza Axial Mínima (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Desplazamiento máximo (cm)	Desplazamiento mínimo (cm)
1657.75	-2463.83	721.37	-1548.8	33.060731	-1.560564

Estos resultados muestran que la fuerza de compresión mínima de cada compresor del sistema debe ser de 2462.83 kgf como mínimo para que la estructura sea segura según la norma.

La deformada de la malla en la figura 191, permite observar la concavidad, la cual conduce a afirmar que este tercer diseño es adecuado para una comparación final con la cobertura convencional, ya que nos demuestra que está primando las fuerzas de viento antes que la fuerza del peso de la estructura.

Solo falta encontrar el valor alcanzado con la rotulación de los elementos para poder encontrar la velocidad de viento con la que falla este diseño de estructura.

11.3.2. Análisis Estático no Lineal (3er diseño)

Las dimensiones de los elementos y sus propiedades para este tercer diseño ya fueron insertadas previamente en el análisis elástico.

Las rótulas a insertar en este diseño como se mencionó antes, son muy diferentes a las que se usaron en el primer diseño, ya que los elementos tienen geometrías distintas y propiedades mecánicas diferentes también, variando los diagramas de Esfuerzo-Deformación y de Fuerza-Desplazamiento.

Tras el uso de las Ecuaciones 22, 23 y 24, para las fuerzas de pandeo en elementos que sufren compresión, se tienen las siguientes características y propiedades:

$$Radio1 = 1.67 \text{ cm} \quad (52)$$

$$Radio2 = 1.47 \text{ cm} \quad (53)$$

$$Longitud = 100 \text{ cm} \quad (54)$$

$$Inercia = 2.44 \text{ cm}^4 \quad (55)$$

$$Área = 1.97 \text{ cm}^2 \quad (56)$$

$$Radio \text{ de giro } (r) = 1.11 \text{ cm} \quad (57)$$

$$Factor K = 1 \quad (58)$$

$$L/r = 89.90 \quad (59)$$

Usando un valor de 310 Mpa para la tensión de fractura de este acero (tipo ASTM A500), y un valor de 29000 ksi para el módulo de elasticidad se tiene:

$$F_y = 3161.12 \text{ kgf/cm}_2 \quad (60)$$

$$E = 2038901.8 \text{ kgf/cm}_2 \quad (61)$$

$$Relación\ límite\ ancho\ espesor(\lambda_c) = 1.13 \quad (62)$$

$$Relación\ de\ esbeltez\ \left(\frac{kL}{r}\right) = 89.90 \quad (63)$$

Así pues, reemplazando estos valores en las Ecuaciones 23 y 24, explicadas antes, se tiene:

$$F_{cr} = 1858.18 \text{ kgf/cm}_2 \text{ para } \lambda_c \leq 1.5 \quad (64)$$

$$F_{cr} = 2183.85 \text{ kgf/cm}_2 \text{ para } \lambda_c > 1.5 \quad (65)$$

Como en este caso el valor de λ_c es menor a 1.5 también, se considera a las barras como columnas intermedias, siendo poco influenciadas por el pandeo; se escoge el primer valor de F_{cr} (Ecuación 64), el cual multiplicado por el área de la sección se convierte en la fuerza máxima antes de la rotulación:

$$F = 3666.03 \text{ kgf} \quad (66)$$

Usando la Ley de Hooke (Ecuación 3), se obtiene el desplazamiento máximo del elemento para la rotulación, a través de la Ecuación 39.

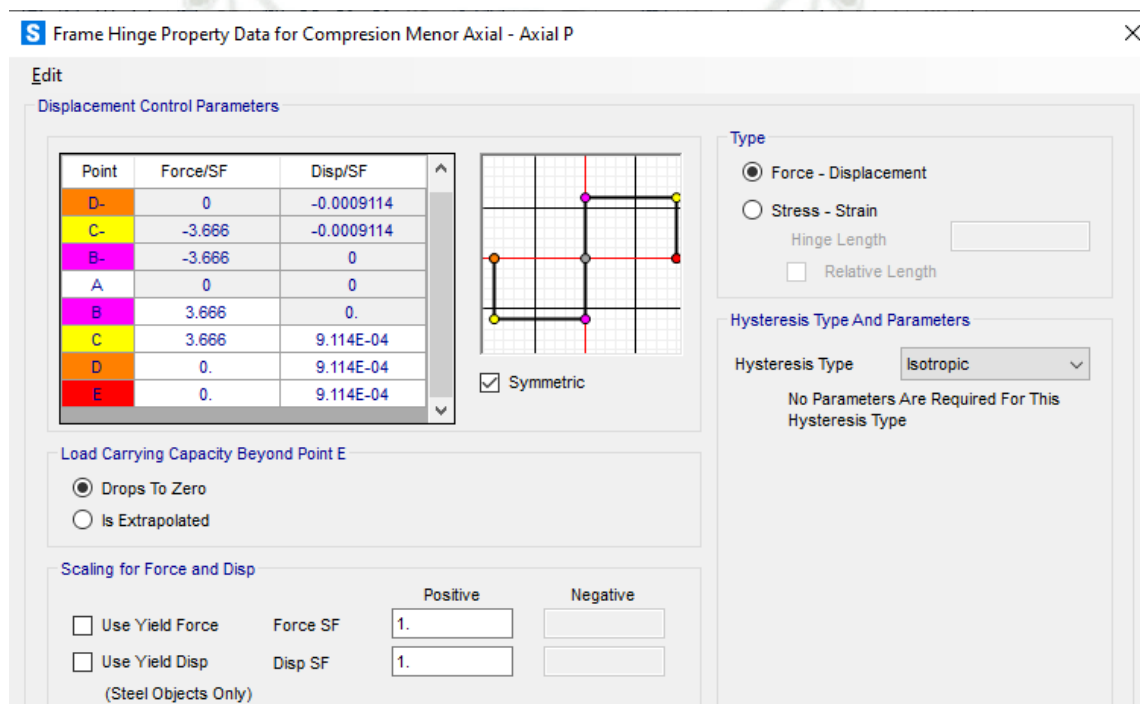
$$u = \frac{3666.03 \text{ kgf} \times 100 \text{ cm}}{2038901.80 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}_2} \times 1.97 \text{ cm}^2} \quad (67)$$

$$u = 0.0911 \text{ cm} \quad (68)$$

Así pues, para poder realizar este análisis estático no lineal es necesario insertar estos 2 valores (Ecuaciones 66 y 68) en la curva de fuerza-desplazamiento en las rótulas del programa, como se muestra en la figura 192.

Figura 192

Inserción de datos para diagrama fuerza-desplazamiento de elementos compresores (3er diseño).

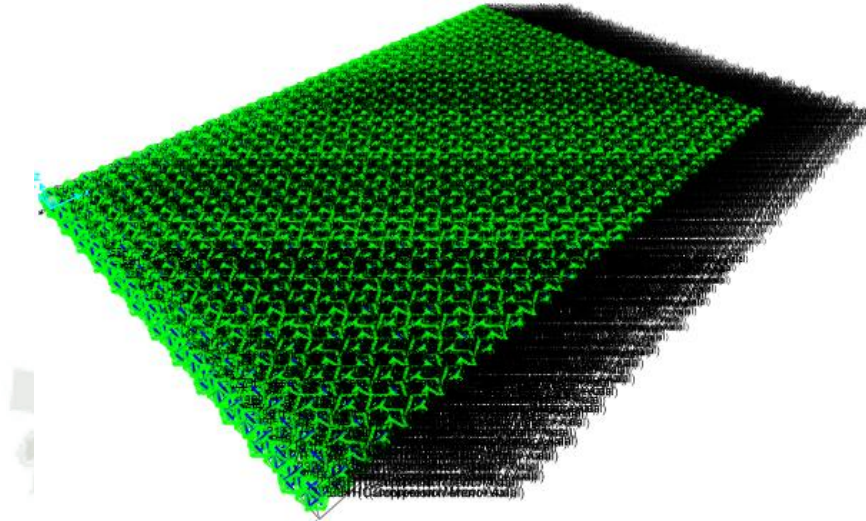


Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Estos datos en el programa, se introducen en unidades de Tonf y m, y luego se asignan las rótulas en cada uno de los elementos compresores de la malla, al ser todos iguales, tal cual como se observa en la figura 193.

Figura 193

Inserción de rótulas plásticas en elementos compresores de malla Tensegrítica final (3er diseño).



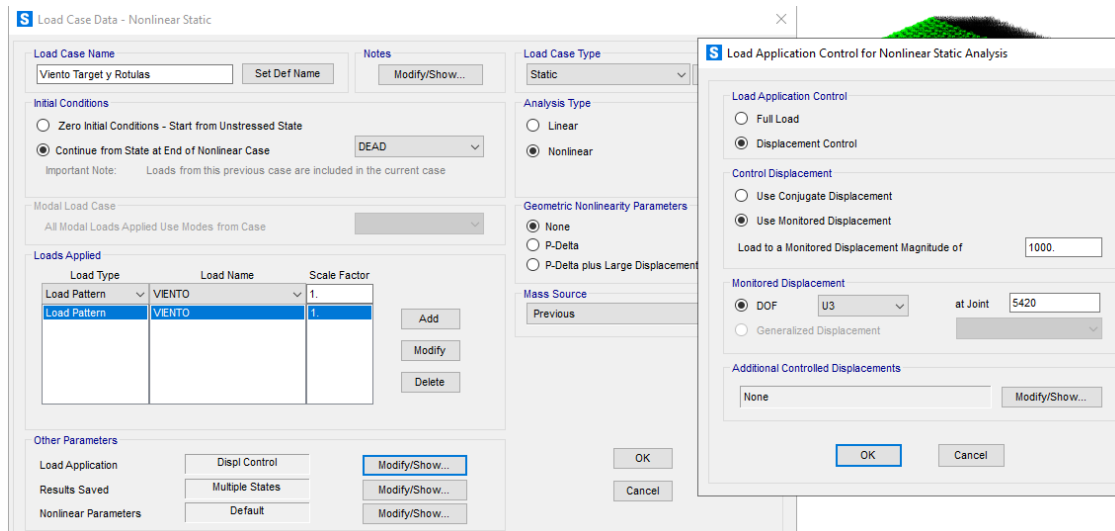
Nota: Vista Isométrica mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Para terminar, se define el estado de cargas, colocando como punto de control al punto más ubicado al centro de la capa superior en la malla, en este caso es al punto 5420, considerando nuevamente a las fuerzas de viento como succión (caso crítico); este paso se puede observar en la figura 194.

Con los elementos y sus propiedades definidas, se procede finalmente a correr el programa, obteniendo en el step 5 a los primeros compresores en fallar, como se observa en la figura 195 con la malla tensegrítica general modelada en el programa; en las figuras 196 y 197 se puede evidenciar mejor a los elementos rotulados, mostrando únicamente cierta parte de la malla tensegrítica.

Figura 194

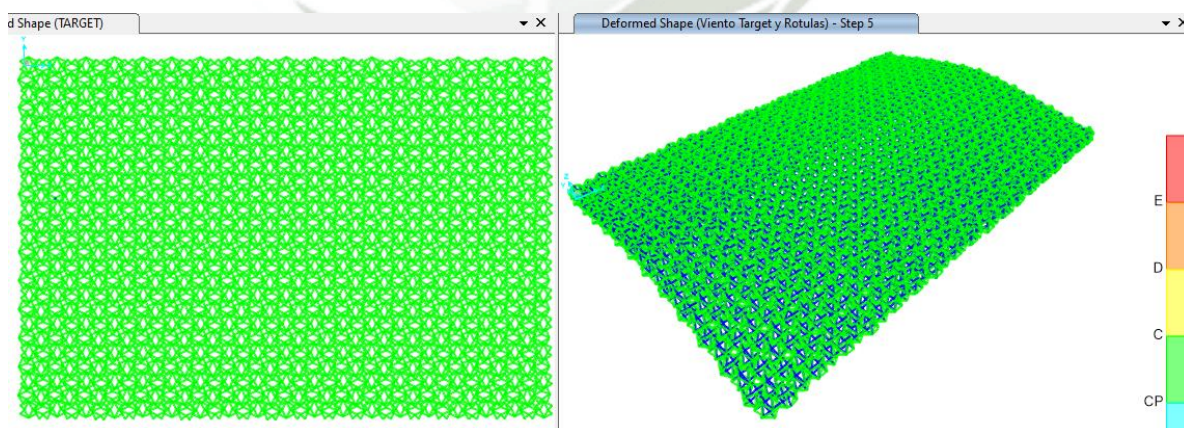
Definición del estado de cargas para el análisis estático no lineal, en el programa SAP2000 (3er diseño).



Nota: Estado de cargas para el análisis estático no lineal. Elaboración propia.

Figura 195

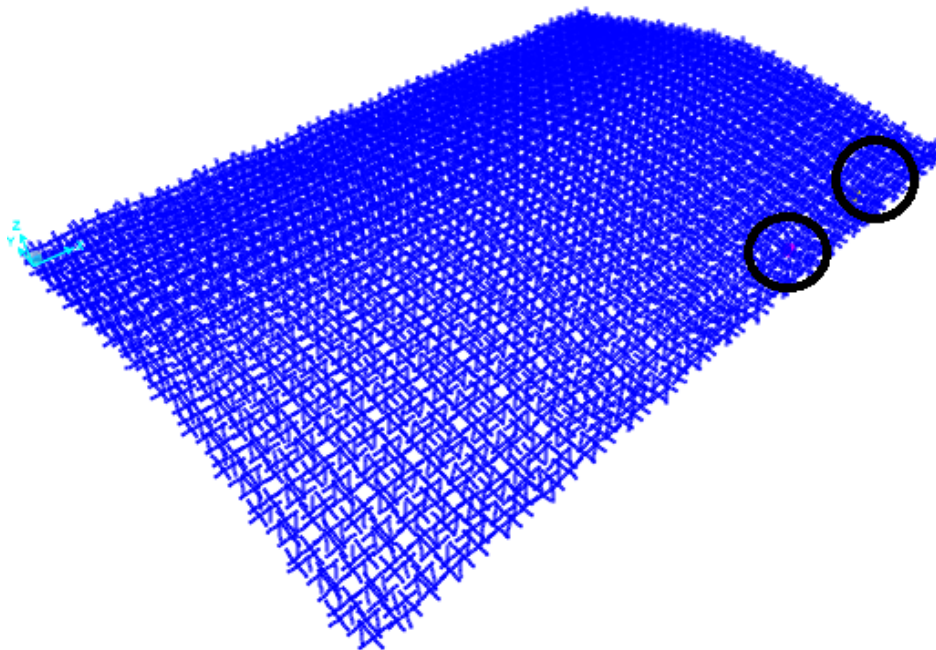
Deformada de Malla tensegrítica Final Representativa tras el análisis estático no lineal bajo cargas de viento (3er diseño).



Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 196

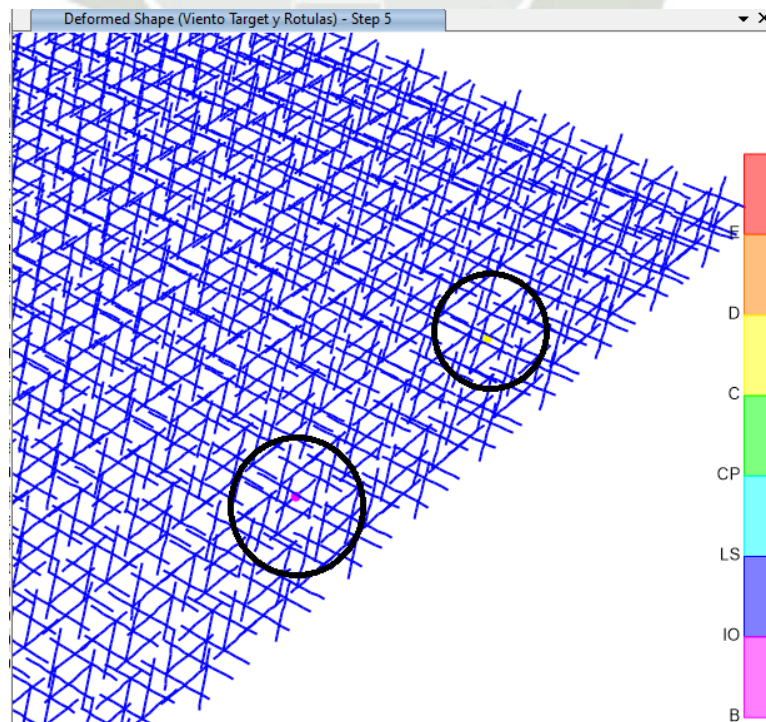
Ubicación exacta de los compresores rotulados en la Malla Tensegrítica.



Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 197

Ubicación a detalle de los compresores rotulados en la Malla Tensegrítica.



Nota: Mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

En esta malla tensegrítica dos elementos a la vez alcanzan la rotulación, estos son los que se señalan en las figuras 196 y 197; en las figuras 198 y 199, se mostrará a detalle los resultados de las rótulas de ambos elementos señalados.

Figura 198

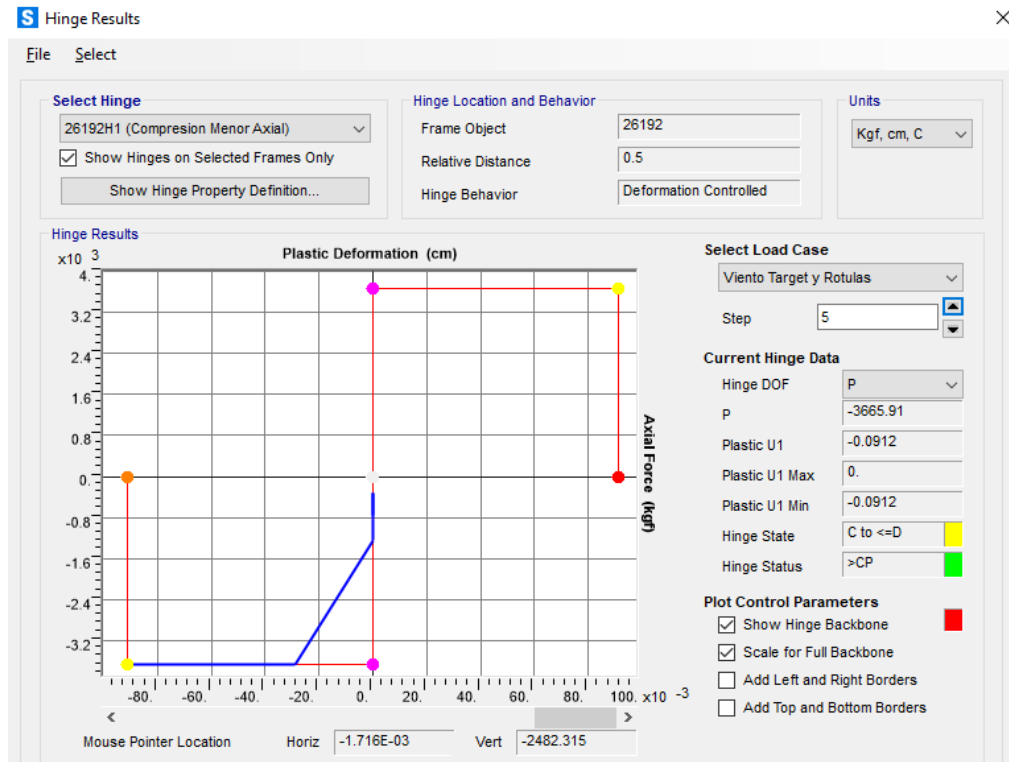
Resultados de la Rótula del primer elemento en fallar tras el análisis estático no lineal (3er diseño).



Nota: Gráfica de fuerzas internas de uno de los 2 elementos con rotulación, fallando en el step 6, alcanzando su fuerza máxima, mediante programa SAP2000. Elaboración propia.

Figura 199

Resultados de la Rótula del segundo elemento en fallar tras el análisis estático no lineal (3er diseño).



Nota: Gráfica de fuerzas internas de uno de los 2 elementos con rotulación, fallando en el step 6, alcanzando su fuerza máxima, mediante SAP2000. Elaboración propia.

Así pues, al fallar 2 elementos, la estructura falla también; los resultados obtenidos de la malla tensegrítica antes de lograr esta rotulación son los mostrados en la tabla 38.

Tabla 38

Resultados Generales de Fuerzas, Reacciones y Desplazamientos máximos y mínimos de la malla tensegrítica final tras el análisis estático no lineal (3er diseño de malla).

Fuerza Axial Máxima (kgf)	Fuerza Axial Mínima (kgf)	Reacción Máxima (kgf)	Reacción Mínima (kgf)	Desplazamiento máximo (cm)	Desplazamiento mínimo (cm)
2556.68	-3665.91	1065.57	-2732.62	40.820819	-1.869313

Para determinar finalmente la velocidad de viento con la que falla esta estructura se debe hacer el mismo procedimiento realizado en el primer diseño, determinando primero nuestro factor de escala (tabla 39).

Tabla 39

Determinación del factor de escala para la velocidad de viento (3er diseño).

Malla tensegrítica	Step de falla	Resistencia a Compresión (kgf)	Fuerza Axial (A. elástico) (kgf)	Factor de escala
Compresores 1" e=2mm Cables 1 cm	5	-3665.91	-2463.86	1.49

Este factor de escala se multiplica por la presión inicial de viento y se realiza el mismo proceso inverso realizado en el primer diseño de la malla tensegrítica final:

- El proceso normal para determinar la presión del viento es el mismo al que se usa en la Ecuación 2, para el valor de P_h .

Considerando nuevamente 85 km/h la velocidad de viento y $c = 0.7$ (factor de forma), y amplificando la presión del viento en un 20% se obtiene una presión de $P = 30.345 \text{ kgf/m}^2$, tal cual como en la ecuación 43.

- Se procede a multiplicar ese valor por el factor de escala:

$$P_{falla} = 1.49 P \quad (69)$$

$$P_{falla} = 1.49 (30.345 \text{ kgf/m}^2) \quad (70)$$

$$P_{falla} = 45.15 \text{ kgf/m}^2 \quad (71)$$

- Con esta presión de falla, se hace el proceso inverso para obtener el valor de la velocidad, mismo procedimiento al realizado en la Ecuación 47, 48 y 49; así pues, reemplazando los datos de este 3er diseño en la Ecuación 49 se tiene:

$$\sqrt{\frac{45.15}{(1.2)(0.005)(0.7)}} = V_{falla} \quad (72)$$

$$V_{falla} = 103.69 \text{ km/h} \quad (73)$$

Esta es la velocidad de viento que alcanza este tercer diseño de la malla tensegrítica final, con compresores de 1" de diámetro con 2mm de espesor, usando acero ASTM A500, y con cables de 10 mm de diámetro. La densidad de acero de esta malla es aproximadamente el triple al usado en la cobertura metálica convencional.

11.4. Comparación final entre diseños de Malla tensegrítica final con la Cobertura metálica convencional

En la tabla 40 se puede apreciar un resumen de todo lo obtenido en este capítulo 11, considerando las velocidades halladas y la cantidad de acero usada en cada uno de los 3 diseños de la malla tensegrítica final; esta tabla también permite apreciar fácilmente cual es la malla tensegrítica más razonable al momento de comparar.

Tabla 40

Resumen y Comparación Final entre diseños de Mallas tensegríticas finales.

COMPARACIÓN FINAL		
Estructura	Velocidad de falla (km/h)	Cantidad de acero utilizado (kg)
Cobertura metálica convencional	98.50	4760.39
Malla tensegrítica (1er diseño)	179.19	77511.56
Malla tensegrítica (2do diseño)	---	4117.49
Malla tensegrítica (3er diseño)	103.69	13306.47

CAPÍTULO XII

12. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

12.1. Interpretación de Resultados

Tras la comparación hecha en el capítulo anterior, los resultados son fácilmente deducibles, pues la malla tensegrítica final diseñada con los mismos elementos de la cobertura convencional, es más resistente estructuralmente, soportando velocidades mucho mayores que la cobertura metálica, velocidades de hasta 179.19 km/h contra velocidades de 98.5 km/h, siendo casi el doble de velocidad de viento que puede resistir antes de fallar; esta gran diferencia de velocidades se ve influenciada por la cantidad de acero que usa cada estructura, siendo de aproximadamente 16 veces la cantidad de acero usada en la malla tensegrítica con respecto a la cobertura convencional, y es normal porque se sabe que si alguna estructura usa una mayor cantidad de elementos o un mejor material, el desempeño o resistencia ante cualquier fuerza o evento será siempre mejor, por obvias razones. Por esta razón a pesar de que la comparación se haya hecho con el mismo tipo de elementos y los mismos materiales, no refleja sistemas similares; por lo que, en la primera comparación, a pesar de haber sido mejor la malla tensegrítica, no se refleja una igualdad en cuanto a la cantidad de acero usada.

Para la segunda comparación se empezó por igualar la cantidad de acero en ambas estructuras, diseñando con una diferente calidad de acero los elementos compresores de la malla tensegrítica (ASTM A500) y una menor área, al igual que con los cables. La segunda comparación es la correcta para ambas coberturas, siendo mejor estructuralmente la cobertura metálica convencional, soportando una velocidad de 98.5 km/h, contra una velocidad de 0km/h por parte de la malla tensegrítica; esta malla no obtiene buenos resultados ya que los elementos usados para el sistema tensegrítico son muy débiles, siendo

de áreas muy pequeñas, soportando cargas muy bajas, tan bajas que apenas puede soportar su propio peso y ser estable.

A pesar de ya haber obtenido una correcta comparación, igualando la misma cantidad de acero en ambos sistemas, se cree que la malla tensegrítica usada con el segundo diseño no refleja lo que puede ofrecer como sistema, ya que en la primera comparación se pudo observar que si son buenas estructuras, pese a tener un peso excesivo; tras un buen diseño de la malla tensegrítica final, se puede alcanzar una buena relación entre cantidad de acero usada, y una aceptable velocidad de viento alcanzada, es por eso que se hace un tercer diseño para explotar el principio físico de la tensegridad. El tercer diseño de la malla tensegrítica, solo usa un poco menos del triple de la cantidad de acero usado en la cobertura convencional, y logra una mayor velocidad de viento, siendo de 103.69 km/h contra 98.5 km/h que alcanza la estructura metálica, evidenciando así un mejor desempeño en cuanto a cargas de viento.

Durante los diseños aceptables en cuanto a velocidades de viento (1ro y 3ro), se observó que, al fallar un elemento, seguidamente falla máximo uno o dos más, y el programa deja de analizarlo, demostrando así que estos sistemas tensegríticos dependen mucho de la integridad de los elementos, si un elemento falla, toda la estructura también lo hace ya que aparece un desequilibrio de fuerzas, incapaz de equilibrarlo, especialmente en los compresores, ya que si estos fallan, los tensores no tienen un punto fijo de apoyo para trabajar, por lo que la estructura se vuelve inestable y falla. Por otro lado, si un tensor falla, no es 100% seguro que la estructura sea incapaz de equilibrarse nuevamente, ya que ante determinados diseños, si algunos tensores fallan, los demás cables podrían asumir las fuerzas extras; todo esto se podría siempre y cuando la disposición de los cables lo permita, ya que si solo hay un cable en determinada dirección, si fallase, no podría ser reemplazado por otro cable, por eso depende mucho de la geometría de la malla tensegrítica.

Cabe resaltar también que los desplazamientos generados por el viento son un poco grandes, demostrando así una falta de rigidez en la estructura, incluso el programa SAP2000 manda mensajes de advertencia al momento de correr el programa informando que el sistema es un poco inestable, y se recomienda adicionarle mayor rigidez; y esta advertencia es muy cierta, ya que una malla tensegrítica siempre tiende a equilibrar las fuerzas externas rápidamente entre sus elementos, y cuando lo hace, genera mucho movimiento, demorándose incluso un poco en estabilizarse hasta encontrar el equilibrio de fuerzas, oscilando un poco en la dirección vertical.

12.2. Discusión

Ante cantidades iguales de acero, la cobertura metálica convencional es mejor que la malla tensegrítica, sin embargo la estructura metálica tiene un diseño que ya se ha usado infinidad de veces en proyectos de este tipo de infraestructuras, maximizando así su sistema basado en fuerzas axiales, momentos y torsiones; por otro lado, el sistema tensegrítico basado únicamente en fuerzas axiales, es un sistema que aún no se ha estudiado ni usado lo suficiente, y menos en este tipo de infraestructuras, por lo que los resultados obtenidos en esta investigación no reflejan en su totalidad el alcance y la capacidad que pueden llegar a tener las mallas tensegríticas; si se dieran más investigaciones al respecto, se pueden alcanzar mejores diseños que los obtenidos en este trabajo, incluso usando menores cantidades de acero a las que se usa en el tercer diseño del capítulo 11. Además, tras el capítulo 10, donde se selecciona a la mejor opción de malla tensegrítica, solo se analizan 35 mallas posibles, de las cuales solo 20 son buenas, así pues, si se analizaran más opciones de mallas, y se añadieran a la comparación general, se podrían obtener estructuras mucho mejores a la usada con módulos de Octaedros expandidos; cabe resaltar que solo se han usado unos cuantos módulos tensegríticos, los más conocidos, sin embargo, existen más, los cuales pueden dar mejores resultados; se pueden hacer también mejores manipulaciones

Rot-Umbela, obteniendo más mallas tensegríticas con buenos resultados y mejorando así la elección final.

El tercer diseño de malla tensegrítica con módulos de Octaedro expandido, refleja que la malla tensegrítica es capaz de ser mejor que una cobertura metálica convencional usada en nuestra ciudad, usando una mayor cantidad de acero, sin embargo este aspecto se puede minorizar si consideramos quizás los costos de construcción, costos de mantenimiento, o algunos otros aspectos fuera de los que se consideran en esta investigación, siendo solo la cantidad de acero, y la resistencia estructural como objetivo principal. Todo esto muestra que, para alcanzar una comparación muy buena entre ambos tipos de estructura, se debería considerar no solo la cantidad de acero, sino también muchos otros aspectos, como conexiones, etc, ya que el tema del acero es un tema que se ve muy reflejado con el tema del costo, y para la ejecución de un proyecto, entre dos tipos de estructuras, la mayoría de veces se escoge la que tenga mejor relación de costo-beneficio.

Cabe resaltar que esta investigación es netamente estructural, y se tomó para la comparación únicamente las características necesarias para el modelado de las estructuras, considerando a la cantidad de acero como el tema más delicado en la comparación.

El segundo diseño no logra obtener resultados positivos ya que las secciones de los elementos son muy pequeñas, mientras que el primer diseño tiene dimensiones excesivas, haciendo que la estructura pese demasiado y se vea muy influenciada por el peso muerto del sistema; con el tercer diseño recién se pudo lograr un equilibrio entre ambos aspectos (peso adecuado y buenos resultados); todo esto evidencia que este sistema requiere de una adecuada elección de materiales, por lo que su posible uso depende de un buen diseño.

Las coberturas metálicas convencionales usadas en la ciudad de Arequipa son muy buenas, y son mejores que las mallas tensegríticas, sin embargo, gracias a esta investigación

se cree que las mallas tensegríticas pueden llegar a tener más potencial con mayores investigaciones al respecto; si bien las estructuras metálicas también se pueden optimizar, las mallas tensegríticas tienen un campo mucho más grande para maximizarlas, desde su diseño hasta incluso el posible uso de pretensiones. Los resultados de este trabajo dejan un poco abierta la comparación decisiva entre estas dos estructuras, a pesar de que en esta tesis sea mejor la cobertura metálica convencional.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se analizó y comparó estructuralmente una malla tensegrítica de doble capa con una cobertura metálica convencional, para el uso de una infraestructura deportiva menor en la ciudad de Arequipa; ante el uso de iguales cantidades de acero, la cobertura convencional es mejor estructuralmente, obteniendo resultados óptimos, resistiendo velocidades mínimas de viento y siendo segura para su uso; la malla tensegrítica por su lado, no alcanza dicha velocidad de viento ni obtiene resultados positivos, siendo totalmente insegura para nuestra sociedad, sin embargo, ante el uso de materiales y secciones iguales, la malla tensegrítica es mejor estructuralmente.
- El mejor procedimiento para generar mallas tensegríticas de doble capa con resultados estructurales positivos, es mediante la unión de varios módulos tensegríticos iguales, logrando tener 19 mallas aceptables de 21 creadas, contra 1 malla aceptable de 14, generadas por la manipulación Rot-Umbela.
- La cobertura convencional representativa para la comparación fue la estructura de la “Urb. Juan XXIII” en el distrito de Yanahuara.
- La malla tensegrítica representativa para la comparación fue la malla formada por módulos “Octaedro Expandido”, a través del tipo de unión Unilateral.
- Se obtuvo una adecuada distribución de cargas de viento para el análisis de fuerzas en las mallas tensegríticas gracias al método de “áreas tributarias”.
- Se obtuvo el mecanismo de falla de la cobertura convencional, extraído de otro trabajo citado, al igual que también se obtuvo el mecanismo de falla de la malla

tensegrítica, el cual está regido por la falla de algún compresor (si algún compresor falla, toda la estructura deja de funcionar y se vuelve inestable, siendo incapaz de equilibrar sus fuerzas nuevamente entre sus elementos).

- Se logró determinar la velocidad de viento con la que llega al colapso la cobertura metálica convencional, siendo de 98.5 km/h (extraído de la bibliografía); por su lado, la velocidad de viento con la que llega al colapso la malla tensegrítica, es de 0 km/h usando la misma cantidad de acero, y de 179.19 km/h usando los mismos materiales y secciones en sus elementos.
- Se logró identificar y entender el comportamiento general de ambas estructuras, una funciona con fuerzas axiales, momentos y torsiones, mientras que la otra funciona únicamente con fuerzas axiales; una usa diagramas de esfuerzo-deformación y momento-curvatura para las rótulas en sus elementos, mientras que la otra únicamente usa diagramas de esfuerzo-deformación (mallas tensegríticas de doble capa).
- Se conoció el alcance y la utilidad que tiene una malla tensegrítica de doble capa, especialmente en una infraestructura deportiva menor, la cual, si está bien diseñada en cuanto a secciones y acero usado, es capaz de soportar su propio peso y de resistir la velocidad de viento mínima dada por la norma.
- Las mallas tensegríticas formadas por módulos, tienen mejores resultados cuando los módulos son más pequeños y cuando guardan simetría en la geometría de sus capas, tanto superior como inferior, demostrando así que la simetría y la geometría en una estructura tensegrítica es de vital importancia para que se útil y funcional estructuralmente.

Recomendaciones

- Se recomienda usar métodos más exactos para la comparación, como el de elementos finitos o análisis dinámicos, dado que a través del análisis estático no lineal se observan algunas inestabilidades.
- Se aconseja que, en futuras investigaciones, se haga un mayor enfoque con el control de desplazamientos máximos de la malla y no solo priorizar las fuerzas internas de los elementos para la comparación.
- Se sugiere en investigaciones futuras, abrir paso al tema de la pre tensión, porque durante la realización del trabajo se pudo observar que con la aplicación de la pre tensión en los cables, los desplazamientos máximos se reducen, al igual que las reacciones en los apoyos, incluso se logra reducir la fuerza interna en los compresores, aumentando la carga en los tensores.
- Se recomienda en un futuro, tomar esta investigación como punto de partida y como información básica necesaria para ahondar en temas de tensegridad, mallas tensegrítica y de módulos tensegríticos, ya que estos módulos tienen grandes usos, no solo en temas estructurales.
- Se aconseja realizar experimentalmente mallas tensegríticas (a escala) para obtener resultados de prueba y error, obteniendo así no solo resultados teóricos, sino también resultados prácticos que permitan observaciones de como realmente funciona este sistema; además esto ayudaría a ver el tema de la construcción de estas estructuras, siendo un tema importante si se quisieran aplicar estas mallas en la realidad. Es un tema muy amplio que requiere de muchas investigaciones aún para su aplicación.

REFERENCIAS

- Arequipa, A. (2023). *Catálogo de Productos y Servicios*. Valle del Cauca: Aceros Arequipa.
- Averseng, J., Quirant, J., & Dubé, J.-F. (2012). *Interactive Dynamic Design and Analysis of Tensegrity Systems*. Montpellier.
- Blasant, C. (s.f.). *Cables*. Cargofletblasant.
- Cadoni, D., & Micheletti, A. (2012). *Structural Performances of Single-layer Tensegrity Domes*. Roma.
- Cobos Cobos, J. (2018). *Tensegridad como sistema estructural alternativo*. Cuenca.
- Gómez Jauregui, V. (2013). *TENSEGRIDAD, ESTRUCTURAS DE COMPRESIÓN FLOTANTE*. Obtenido de <http://www.tensegridad.es/publicaciones.html>
- Gomez Jauregui, V., Arias, R., Otero, C., & Manchado, C. (2012). *Novel Technique for Obtaining Double-Layer Tensegrity Grids*. Cantabria.
- Gomez Jauregui, V., Quilligan, M., Manchado, C., & Otero, C. (2018). *Design, Fabrication and Construction of a Deployable Double-Layer Tensegrity Grid*. Santander.
- Gómez-Jáuregui, V. (2008). *Estructuras Tensegríticas: ingeniería y arquitectura novedosas*. Santander.
- Gómez-Jáuregui, V. (2012). *Mallas tensegríticas de doble capa y manipulaciones de Rot-Umbela*. Santander.
- Gómez-Jáuregui, V. (2015). *Métodos CAD/CAE Aplicados a la generación de nuevas mallas tensegríticas de doble capa*. Santander.

Gomez-Jauregui, V., Manchado, C., & Otero, C. (2013). Comparison between new families of Double-Layer Tensegrity Grids. En F. Escrig , & J. Sanchez , *Proceedings of the First Conference Transformables 2013*. Sevilla: EDITORIAL STARBOOKS.

Hahn, C. A. (2021). *Revisando el concepto de infraestructura deportiva: Diagnóstico de distribución y acceso de la conurbación Talca- Maule Norte*. Santiago.

Hanaor, A. (2012). Debunking “Tensegrity” - a Personal Perspective. En *International Journal of Space Structures* (págs. 179-183).

Heartney, E. (2013). *Kenneth Snelson; Art and Ideas*. Obtenido de Essay “Forces Made Visible” : <http://kennethsnelson.net/>

Hernandez Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigacion*. Mexico: Mac Graw Hill Education.

Hibbeler, R. C. (2010). *Ingeniería Mecánica Estática*. México: Prentice Hall.

Liapi, K., Kim, J., & Liu, R. (2004). Design and Fabrication of Tensegrity Structures a computer based system. En N. Y.-W. Philip Beesley, *Fabrication Examining the Digital Practice of Architecture* (págs. 100-109). Toronto, Cambridge.

McCorman, J. C., & Csernak, S. F. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero*. Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Norma E 020 Cargas*. Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Norma E 090 Estructuras Metálicas*. Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones.

Morón Flores, P. A., & Milón Zevallos, A. A. (2019). *Propuesta de Metodología para el Análisis y diseño ante cargas de viento de estructuras metálicas de cobertura en infraestructuras deportivas menores en la ciudad de Arequipa*. Arequipa.

Motro, R. (2003). *Tensegrity: Structural Systems for the Future*. London: Kogan Page Science.

Panigrahi, R., Gupta, A., & Bhalla, S. (2008). *Dismountable steel tensegrity grids as alternate*. Delhi, India.

Rhode-Barbarigos, L., Hadj Ali, N., Motro, R., & Smith, I. (2012). *Design Aspects of a Deployable Tensegrity-Hollow-rope Footbridge*. Lausanne.

Salom, L. B. (s.f.). *Mallas espaciales*. Valencia: Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

Seismic Safety Commission. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. California: ATC 40.

Skelton, R., & Nagase, K. (2012). *Tensile Tensegrity Structures*. La jolla.

Snelson, K. (2012). The Art of Tensegrity. En *International Journal of Space Structures Vol. 27 No. 2&3* (págs. 71-80).

Tang, R. (2018). *Tensegridad y arquitectura*. Madrid.

Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. México: McGraw-Hill Interamericana.