

3 Casos de Estructuras Tensadas como estrategia de optimización estructural

Felipe ALVARADO ¹

¹ESPACIO CUBIERTO S.A
Janequeo 2331, Concepcion, Region del Bio Bio, Chile
felipe@espaciocubierto.com

Abstract

This study aims to include some relevant structural criteria at the beginning of design process, trying to compare structural sections, structural density and nodal support forces in order to find lighter cover solutions and appropriate or, at least, less volume of materials and energy to conceive tensile structures

Keywords: Optimización, comportamiento estructural, cubicación, herramientas computacionales, estructuras de forma activa, estrategias de intervención.

1. Introducción

La presente investigación se desarrolla con la intención de encontrar ciertos criterios que permitan evaluar y optimizar el comportamiento estructural de un proyecto de Tenso estructuras, lo cual además de tener impacto en la rentabilidad o costos económicos tiene impacto en el volumen de los materiales o costos energéticos en general. Para esto utilizaremos softwares de cálculo que permiten evaluar rápidamente distintas configuraciones estructurales y simular su comportamiento frente a ciertas condiciones de carga, es decir, los esfuerzos generados a partir de la interacción entre estructura y las fuerzas dinámicas del entorno.

Al momento de evaluar los requerimientos de nuestros clientes hemos podido identificar distintos factores que son determinantes para la factibilidad de cada proyecto, que dependiendo de sus particularidades o prioridades, hemos visto la necesidad de optimizar. Desde la estandarización de piezas hasta el impacto material de la estructura y fundaciones.

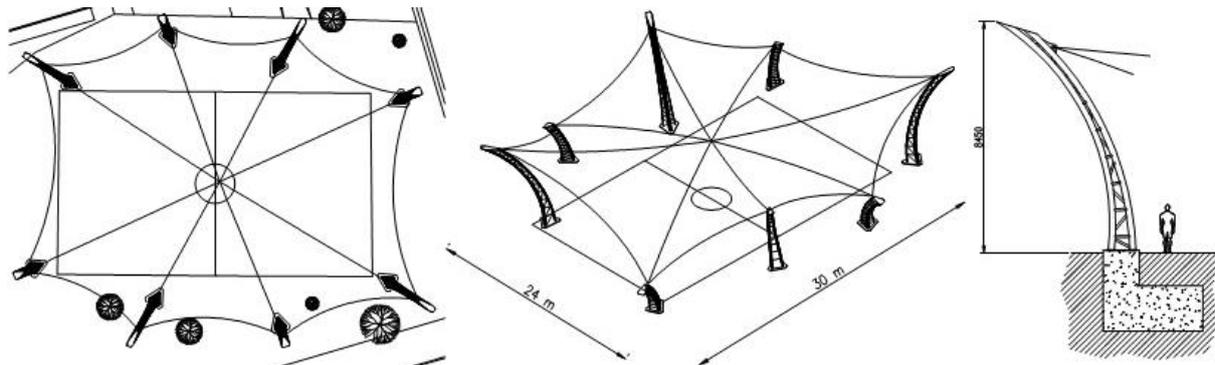
De esta forma presentaremos 3 Tenso Estructuras desarrolladas por Espacio Cubierto S.A, desde el rediseño de la estrategia original, cálculo, fabricación y montaje. Si bien es cierto que cada proyecto ha sido encargado por distintos clientes, en distintas situaciones geográficas y para distintos usos, tienen en común haber sido conceptualizados originalmente como estructuras rígidas resistentes al Momento, las cuales posteriormente fueron optimizadas mediante un cambio de estrategia estructural, descomponiendo y transmitiendo axialmente las fuerzas generadas por la interacción de la cubierta textil.

2. Casos de Estudio

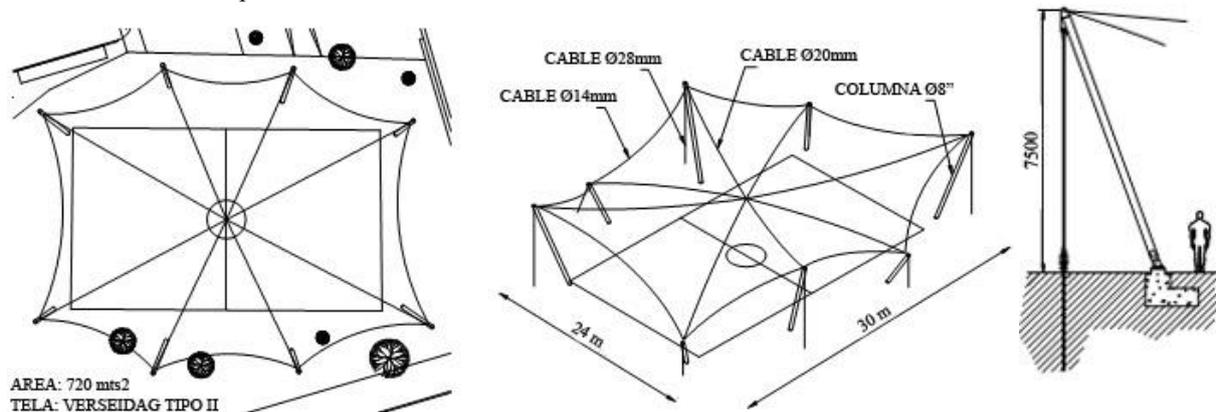
De acuerdo a los Sistemas Estructurales descritos por Heino Engel [1], cada caso fue propuesto originalmente como una estructura de Sección Activa, es decir, donde la estabilidad del sistema depende principalmente del Momento de inercia de su secciones estructurales, luego cada caso fue posteriormente optimizado como Estructura de Forma Activa por Espacio Cubierto S.A, incluyendo el diseño de la estrategia de cubierta, calculo, ingeniería de detalles, fabricación y montaje, tanto de la estructura soportante como de la membrana textil.

2.1. Cubierta Colegio Leonardo Da Vinci: La propuesta inicial del fue desarrollada por una oficina de Arquitectura no especializada en Tensoestructuras en conjunto con los requerimientos del propio cliente. La propuesta consiste en cubrir el patio interior del Colegio con una tensoestructura de 720 m² soportada con una serie de mástiles dispuestos perimetralmente permitiendo actividades recreacionales durante todo el año. Posteriormente, en la etapa de licitación para su construcción, fue necesario el rediseño estructural con el fin de minimizar el impacto de las fundaciones en un patio interior consolidado y rodeado por distintos edificios, evitar el estancamiento de aguas lluvia y minimizar las deformaciones de la cubierta en interacción con el viento.

2.1.1. Cubierta Colegio Leonardo Da Vinci – Propuesta Original: Consiste en la implementación de 8 pilares perimetrales empotrados cada uno de forma independiente, generando de esta forma 4 puntos altos y 4 bajos que pretenden dar estructura a la cubierta mediante la generación de dobles curvaturas.

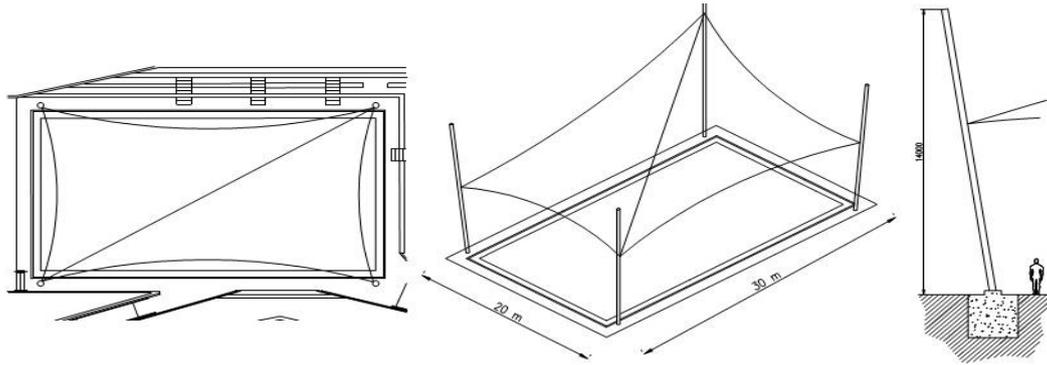


2.1.2. Cubierta Colegio Leonardo Da Vinci – Propuesta Espacio Cubierto: Nuestra propuesta plantea mantener las diferencias de altura con tal de lograr una imagen similar a la ya asimilada por el Cliente, sin embargo con el fin de optimizar el impacto material de la estructura y fundaciones, modificamos la forma en que la estructura soporta o transfiere las cargas generadas desde la cubierta tensada. Para ello, descomponemos las fuerzas generadas desde la cubierta en elementos estructurales de tracción y compresión pura, tanto en estructura soportante mediante cables y columnas de acero como en fundaciones mediante la utilización de micro pilotes de acero en los nodos soportantes a modo de "fundaciones axiales".

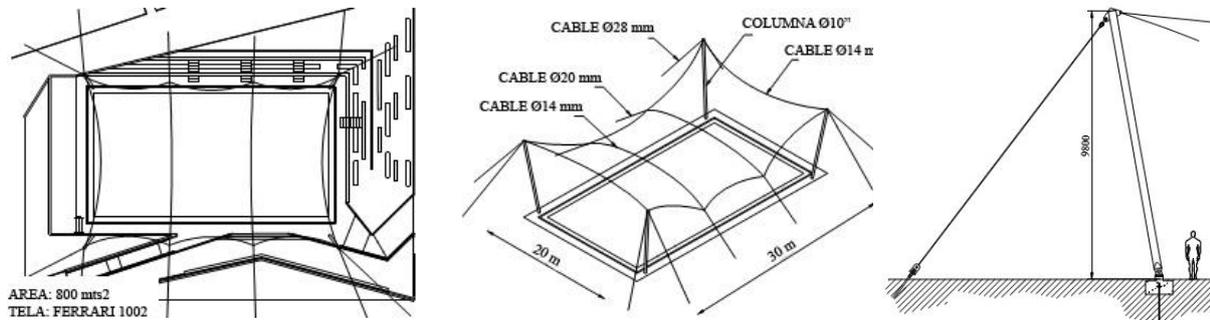


2.2 Anfiteatro Universidad de la Frontera: El proyecto fue encargado por el Departamento de Infraestructura de la Universidad con el fin de dar protección de lluvia a las actividades de la Federación de Estudiantes y patio de invierno para el comedor del campus.

2.2.1 Anfiteatro Universidad de la Frontera – Propuesta Original: La idea original consistía en implementar un gran paraboloides hiperbólico cubriendo los 800m² proyectados en planta. La principal desventaja es la altura necesaria que pretenden alcanzar para dar cabida a las actividades bajo la cubierta además de la utilización de 4 pilares empotrados unidos con vigas, generando de esta forma un gran marco rígido que debe soportar las cargas desde la cubierta.

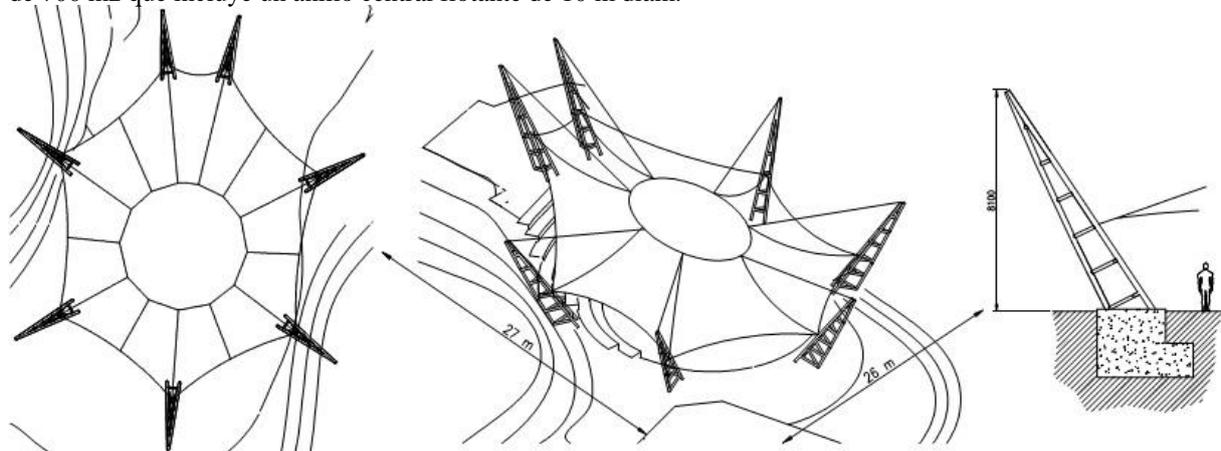


2.2.2 Anfiteatro Universidad de la Frontera – Propuesta Espacio Cubierto: Nuestra alternativa de cubierta rescata la mínima condición de contacto con el suelo que da un aspecto de cubierta flotante de la idea original, pero que al estar condicionado por factores de carga reales del lugar fue necesario reducir la distancia libre entre apoyos, incorporando 4 cables directamente anclados en el terreno y manteniendo los puntos altos hacia los extremos. Esta configuración de cables y columnas funcionando solamente de manera axial, generando una especie de barril flotante, nos permitió una vez más reducir el impacto en fundaciones, minimizar la densidad de estructura y hacer viable su ejecución de acuerdo al presupuesto del proyecto. 0

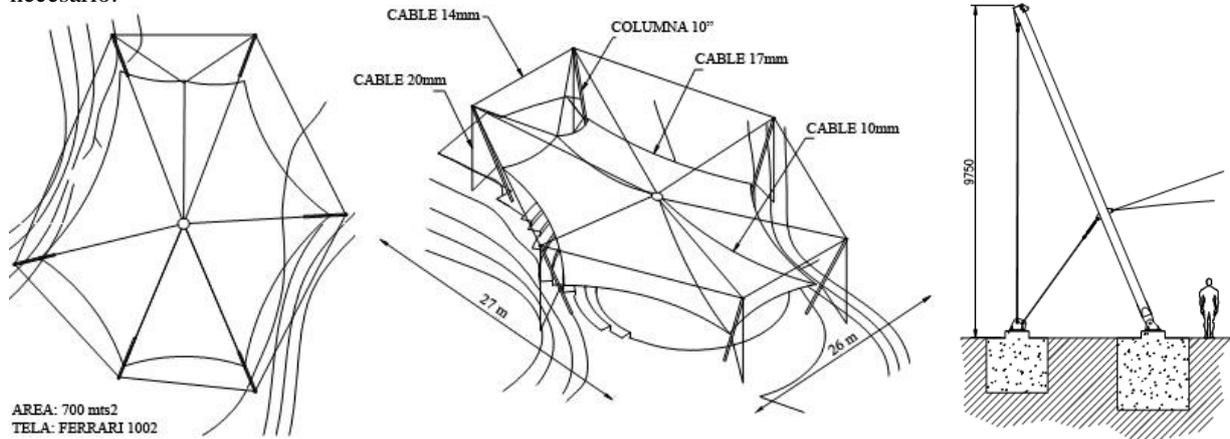


2.3 Anfiteatro Municipal de Navidad: El proyecto busca proporcionar protección permanente al anfiteatro local que esta ubicado al borde de un pequeño rio. Se plantea una solución de cubierta de tipo conoidal suspendida por una serie de columnas perimetrales que se adaptan los niveles de escalamiento natural del terreno donde se ubican las gradas.

2.3.1 Anfiteatro Municipal de Navidad – Propuesta Original: De manera similar a los casos anteriores el proyecto fue encargado por la compañía constructora a cargo de la ejecución de las obras, la propuesta original consistía en un conjunto de 7 grandes columnas estereométricas organizadas perimetralmente y de manera descendente de acuerdo a la ladera del rio, este conjunto de estructuras rígidas debe soportar una cubierta textil de 700 m² que incluye un anillo central flotante de 10 m diám.



2.3.2 *Anfiteatro Municipal de Navidad – Propuesta Espacio Cubierto*: Nuestra estrategia se basa en enfrentar los aspectos constructivos de adaptabilidad al terreno existente, nuevamente intentando minimizar la densidad de la Estructura Soportante descomponiendo las cargas desde la cubierta en un conjunto componentes axiales puros (Columnas, Cables, Membrana). Esto nos permite minimizar el impacto en los nodos soportantes (*) reduciendo de manera importante los costos en fundaciones, y movimiento de materiales, por lo tanto, las condiciones topográficas y la logística propia de zonas rurales hacen que la optimización estructural sea un proceso necesario.



3. Parámetros de Carga

Con el fin de situar los 3 proyectos presentados en un escenario común, hemos omitido las condiciones geográficas y de entorno para determinar las cargas succión de viento y carga de nieve, por lo tanto, se utilizaran los siguientes parámetros de carga:

- Peso Propio de la Estructura
- Succión de Viento (0.4 kPa)
- Carga de Nieve (0.25 kPa).

Además, con el fin de evaluar los 3 proyectos en un escenario critico o más desfavorable, hemos utilizados los parámetros de carga sin combinaciones, ponderaciones o sumas vectoriales de ningún tipo. Es decir, en el presente estudio serán omitidos criterios de normativa o códigos locales de combinación de carga para desarrollar de alguna forma modelos de interacción de fuerzas en estado puro o que tiendan a ello.[3]

4. Criterios de Evaluación

Por cada caso presentaremos 2 modelos estructurales distintos evaluados con las mismas condiciones de carga. Sin embargo, debemos establecer criterios de comparación que puedan ser influyentes en ambas estrategias estructurales. De esta forma, los criterios de evaluación son:

4.1 Sección Estructural \varnothing_{max} : La sección estructural máxima será expresada según los resultados obtenidos mediante la simulación de las cargas de viento, nieve y peso propio usando el software para cálculo de estructuras livianas Easy Technet + Rstab [2]. Cada configuración estructural será sometida a 3 iteraciones, permitiendo que todos los esfuerzos sean inferior al 100 %.

4.2 Densidad de la Estructura soportante Kg/m^2 : Sera determinada como el peso total de la estructura soportante dividida por los metros cuadrados de membrana.

4.3 Fuerza y Momento en nodos soportantes kN: Sera determinada mediante la suma vectorial de las fuerzas soportantes en cada nodo soportante o apoyo y presentadas según tracción, compresión y momento flector.

5. Resultados

5.1. Cubierta Colegio Leonardo Da Vinci

5.1.1. Sección Estructural (ϕ_{max})

Propuesta Original

1.3 Cross-Sections			
Section No.	A	B	C
	Material No.	Cross-Section Description	Max. Design Ratio
1	1	RO 813x10.31 ANSI B 36.10M	0.98
2	1	RO 762x7.92 ANSI B 36.19M	0.95
3	1	Cable PV 150 Pfeifer	0.88
4	4	? Cross Section 4	
5	3	? Cross Section 5	
6	2	Cable PG 40 Pfeifer	0.72

$$\phi_{max} = 813 \times 10.31$$

Resultado: Sección estructural minimizada **79%**

5.1.2. Densidad de Estructura Soportante (Kg/m²)

Propuesta Original

Peso Estructura Soportante: 9,510 Kg
 Superficie membrana fabricada: 598 m²

Densidad Estructural: 15.90 Kg/m²

Resultado: Densidad estructural minimizada **81%**

5.1.3. Fuerza en Nodos Soportantes (kN)

Propuesta Original

Max. Support Force: Node 364
 204 kN
 LC2
 Tipo: Fundacion Columna Menor

Max. Support Moment: Nodo 361
 1598 kNm
 LC2
 Tipo: Fundacion Columna Mayor

Resultado: Fuerza Soportante incrementada **4.4%**
Sin Momento flector en nodos soportantes

Propuesta Espacio Cubierto

1.3 Cross-Sections			
Section No.	A	B	C
	Material No.	Cross-Section Description	Max. Design Ratio
1	1	RO 168.3x7.11 ASTM A 53	0.41
2	2	Cable PG 40 Pfeifer	0.79
3	2	Cable PG 70 Pfeifer	0.79
4	4	? Cross Section 4	
5	3	? Cross Section 5	
6	2	Cable PG 15 Pfeifer	0.78
7	2	Cable PG 20 Pfeifer	0.98

$$\phi_{max} = 168.3 \times 7.11$$

Propuesta Espacio Cubierto

Peso Estructura Soportante: 1,639 Kg
 Superficie membrana fabricada: 531 m²

Densidad Estructural: 3.08 Kg/m²

Propuesta Espacio Cubierto

Max. Support Force: Node 361
 213 kN
 LC3
 Tipo: Fundacion Columna Menor

5.2 Anfiteatro Universidad de la Frontera

5.2.1. Sección Estructural (ϕ_{min})

Propuesta Original

1.3 Cross-Sections			
Section No.	A Material No.	B Cross-Section Description	C Max. Design Ratio
1	1	RO 21.3x7.47 ASTM A 53	0.38
2	1	RO 168.3x10.97 ASTM A 53	0.68
3	1	RO 168.3x10.97 ASTM A 53	0.69
4	2	Cable PG 70 Pfeifer	0.94
5	4	? Cross Section 5	
6	3	? Cross Section 6	
7	2	Cable PG 55 Pfeifer	0.80

$$\phi_{max} = 168.3 \times 10.97$$

Propuesta Espacio Cubierto

1.3 Cross-Sections			
Section No.	A Material No.	B Cross-Section Description	C Max. Design Ratio
1	1	RO 101.6x8.08 ASTM A 53	0.40
2	2	Cable PG 40 Pfeifer	0.71
3	2	Cable PG 55 Pfeifer	0.45
4	2	Cable PG 55 Pfeifer	0.44
5	4	? Cross Section 5	
6	3	? Cross Section 6	
7	2	Cable PG 55 Pfeifer	0.40
8	2	Cable PG 55 Pfeifer	0.17

$$\phi_{max} = 101.6 \times 8.08$$

Resultado: La sección máxima es optimizada **40%**

5.2.2. Densidad de la Estructura Soportante (Kg/m^2)

Propuesta Original

Peso Estructura Soportante: 6,297 Kg
 Superficie membrana fabricada: 407 m²

Densidad Estructural: 15.47 Kg/m²

Propuesta Espacio Cubierto

Peso Estructura Soportante: 1,544 Kg
 Superficie membrana fabricada: 524 m²

Densidad Estructural: 2.95 Kg/m²

Resultado: La densidad estructural es optimizada **81%**

5.2.3. Fuerza de nodos soportantes (kN)

Propuesta Original

Max. Support Force: Node 110
 61 kN
 LC3
 Tipo: Fundacion Columna Mayor

Max. Support Moment: Node 108
 31 kNm
 LC2
 Tipo: Fundación opuesta al Node 110

Propuesta Espacio Cubierto

Max. Support Force: Node 136
 204 kN
 LC3
 Tipo: Fundación Columna Única

Resultado: Fuerza Soportante incrementada **293%**
Sin Momento flector en nodos soportantes

5.3 Anfiteatro Municipal de Navidad

5.3.1 Sección Estructural (ϕ_{min})

Propuesta Original

1.3 Cross-Sections			
Section No.	A Material No.	B Cross-Section Description	C Max. Design Ratio
1	1	RO 141.3x9.52 ASTM A 53	0.84
2	1	RO 323.9x25.4 ASTM A 53	0.61
3	1	RO 114.3x8.56 ASTM A 53	0.93
4	1	RO 141.3x19.05 ASTM A 53	0.73
5	2	* Cable PG 15 Pfeifer	0.67
6	2	* Cable PG 25 Pfeifer	0.83
7	4	? Cross Section 7	
8	3	? Cross Section 8	
9	2	* Cable PG 25 Pfeifer	0.51

$$\phi_{max} = 323.9 \times 25.4$$

Resultado: La sección máxima es optimizada **16%**

5.3.2. Densidad de la Estructura Soportante (Kg/m²)

Peso Estructura Soportante: 18,272 Kg
 Superficie membrana fabricada: 319 m²

Densidad Estructural: 57.27 Kg/m²

Resultado: La densidad estructural es optimizada **86%**

5.3.3. Fuerza de nodos soportantes (kN)

Propuesta Original

Max. Support Force: Node 201
 292 kN
 LC2
 Tipo: Fundacion Columna Mayor

Max. Support Moment: Node 209
 54 kNm
 LC3
 Tipo: Fundacion Columna Mayor

Resultado: Fuerza Soportante incrementada **13%**
Sin Momento flector en nodos soportantes

Propuesta Espacio Cubierto

1.3 Cross-Sections			
Section No.	A Material No.	B Cross-Section Description	C Max. Design Ratio
1	1	RO 273x6.3 (Cold Formed)	0.64
2	1	RO 273x10 (Cold Formed)	0.66
3	1	L L 5x5x0.4375 AISC 13	0.94
4	2	* Cable PG 10 Pfeifer	0.40
5	1	* RD 36 DIN 1013-1	0.83
6	2	* Cable PG 40 Pfeifer	0.92
7	2	* Cable PG 40 Pfeifer	0.87
8	2	* Cable PG 10 Pfeifer	0.55
9	2	* Cable PG 20 Pfeifer	0.75
10	4	? Cross Section 10	
11	3	? Cross Section 11	
12	2	* Cable PG 10 Pfeifer	0.45
13	2	* Cable PG 15 Pfeifer	0.78
14	2	* Cable PG 25 Pfeifer	0.82
15	2	* Cable PG 25 Pfeifer	0.83
16	2	* Cable PG 15 Pfeifer	0.87

$$\phi_{max} = 273 \times 10$$

Peso Estructura Soportante: 3,563 Kg
 Superficie membrana fabricada: 450 m²

Densidad Estructural: 7.92 Kg/m²

Propuesta Espacio Cubierto

Max. Support Force: Node 704
 330 kN
 LC2
 Tipo: Fundación superior

5. Conclusiones

Es indiscutible que uso de herramientas computacionales es una práctica esencial y evidentemente útil en distintas disciplinas, más aún, en las áreas relacionadas con el diseño en todas las escalas. Sin embargo, al momento de incrementar la complejidad de formas utilizando plataformas de diseño más poderosas y a la vez más intuitivas se genera condiciones propicias para expandir su uso a distintos niveles de usuario, por lo tanto, es necesario incluir herramientas de cálculo avanzado de estructuras en etapas iniciales de diseño y evaluación permitan proporcionar respuestas ajustadas a comportamientos físicos reales en que será

Sin embargo, de acuerdo a nuestra experiencia en las distintas etapas del proyecto, cabe destacar que la utilización de esta herramienta nos permite evaluar, como ya hemos visto, distintas condiciones de borde o estructuras primarias, análisis de cargas y fuerzas soportantes, además de patronaje y herramientas de confección, nos permite el levantamiento de información de forma implícita como topografías, condiciones de entorno, elementos auxiliares para la instalación, modelos intermedios, casos con cargas especiales, etc.

Es importante reconocer que los criterios de evaluación detallados en el presente estudio son representativos solo de algunos aspectos parciales pero que en estricto rigor no son los únicos que pueden determinar el diseño factible de una Tenso estructura.

Sin embargo, los criterios analizados bajo las condiciones descritas en el presente estudio, respecto a la sección, la densidad y el soporte estructural son claros al momento de mostrar resultados altamente contrastantes, que pueden ser utilizados como indicadores preliminares para la toma de decisiones en las etapas de diseño y presupuesto, ante lo cual posteriormente deberían continuar un proceso más riguroso de cálculo y diseño definitivo.

Dependiendo de los métodos utilizados en la implementación de esta etapa de análisis preliminar, determinar de la factibilidad estructural en un proyecto de tenso estructuras relativamente simple si lo comparamos con obras de Arquitectura e Ingeniería que involucran miles de especialidades, sistemas y coordinaciones varias. Acá se trata simplemente de lograr cierta coherencia en sistemas muy acotados.

Primero, Equilibrio interno del sistema estructural que, generalmente, es representado como un Modelo topológico estable de elementos axiales en tensión y compresión.

Segundo, como estos modelos en equilibrio son afectados por su interacción con las fuerzas físicas de su entorno, los cuales básicamente se reducen a gravedad, succión y carga.

Tercero, de algunos sistemas de logística, como escalas de fabricación, estandarización de piezas, maquinarias y transporte entre otros sistemas que vinculen la producción y final instalación del proyecto.

Por supuesto, también existen ciertos criterios subjetivos, como valores estéticos, culturales o expresivos, que sin ser menos importantes no fueron aplicados en el presente análisis.

References

- [1] Engel H., *Structure Systems* (1nd ed.), GG, 2006.
- [2] Ströbel, D., Singer P. and Holl J. Holistic Calculation of (Multi)-Chambered ETFE-Cushions, *[RE]Thinking Lightweight Structure*, Tensinet 2013
- [3] Foster B., Mollaert M., *European Design Guide for Tensile Structures*, Tensinet, 2004