



**CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA LAS TENSOESTRUCTURAS: REVISIÓN
BIBLIOGRÁFICA Y CASO EJEMPLO DE APLICACIÓN BASADO EN LOS CÓDIGOS
ASCE 55-16 Y ASCE 19-16**

Ángel Horacio Ayala Martínez

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Ing. John Jairo Vélez Heredia

(MSc) en Educación, (Esp) en Análisis y diseño estructural, Traductor Inglés-francés-español

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Ayala Martínez, 2023)
Referencia	Ayala Martínez, Á (2022). <i>Consideraciones técnicas para las tenso estructuras: revisión bibliográfica y caso ejemplo de aplicación basado en las normas ASCE 55-16 y ASCE 19-16</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Juan Carlos Vélez C.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Contenido

Resumen	11
Introducción	12
Planteamiento del problema	14
1. Objetivos	16
1.1. Objetivo general	16
1.2. Objetivos específicos.....	16
2. Metodología	17
3. Marco teórico	18
3.1. Conceptualización sobre las estructuras.....	18
3.2. Forma activa.....	18
3.3. Relación entre dirección de esfuerzo y deformación para elementos no rígidos.	22
3.4. Análisis de cables	24
3.4.1. Curvas funiculares debido a cargas distribuidas	26
3.4.2. Curva catenaria.....	26
3.4.3. Vigas de cable (Cercha Jawerth).....	27
3.5. Análisis.....	28
3.6. Cables	29
3.6.1. Cables de alambre:	29
3.6.2. Fabricación de cables	30
3.6.3. Anclajes.....	31
3.7. Membranas estructurales.....	34
3.7.1. Búsqueda de la forma.....	35
3.7.2. Materiales para las membranas	39
3.7.3. Propiedades mecánicas.....	39

3.7.4.	Membranas de tejido Polyester y recubrimiento con PVC	41
3.8.	Consideraciones constructivas	41
3.8.1.	Resistencia y rigidez del tejido.....	41
3.8.2.	Resistencia a esfuerzos cortantes	42
3.8.3.	Fabricación de membrana	43
3.8.4.	Ensamble de superficies	47
3.8.5.	Resistencia y rigidez en las costuras de membranas	48
3.8.6.	Anclaje y transferencia de cargas	50
3.8.7.	Pre estiramiento:.....	52
3.8.8.	Protección anticorrosión:.....	52
3.8.9.	Conexiones en las esquinas	55
3.8.10.	Proceso constructivo.....	56
3.9.	Consideraciones normativas.....	63
3.9.1.	ASCE 55-16 estructuras de membrana tensadas.....	65
3.9.2.	ASCE 19-16 Aplicación en estructuras de cables de acero para estructuras	74
3.10.	Consideraciones básicas de una granja agroindustrial porcícola	80
3.10.1.	Dimensiones:	80
3.10.2.	Cubierta	80
3.10.3.	Recubrimiento lateral	82
3.10.4.	Otras consideraciones	82
3.11.	Propuesta de cubierta.	83
3.11.1.	Diseño original de referencia.....	83
3.11.2.	Emplazamiento	85
3.11.3.	Propuesta de diseño de cubierta.....	86
3.12.3.	Recubrimiento	94

3.12.4.	Membrana:.....	94
3.12.5.	Patronaje:.....	94
3.12.6.	Conexiones	96
3.12.7.	Proceso constructivo:.....	98
Conclusiones		99
Referencias		104

Tablas

Tabla 1 Resumen de mecanismos de transmisión de fuerzas.....	19
Tabla 2 Resumen de estructuras de forma activa.....	20
Tabla 3 Luces alcanzadas por los diferentes sistemas estructurales de forma activa.	21
Tabla 4 Métodos para la búsqueda de la forma física.....	35
Tabla 5 Materiales de recubrimiento y tenido para membranas	39
Tabla 6 Factores de ciclo de vida para tejidos y uniones.....	71
Tabla 7 Combinaciones de cargas para análisis de membranas.....	72
Tabla 8 Combinaciones de carga para análisis de estructuras tesada de cables.....	75
Tabla 9 Factores de educción de capacidad por efectos de temperatura.....	76
Tabla 10 Factores de reducción de capacidad por deflexión	76
Tabla 11Códigos para materiales para cables.	79
Tabla 12Resumen de características de estructura (Caso práctico)	86
Tabla 13 sección transversal del la estructrua tensada	88

Figuras

Figura 1 Reacción de cuerda a tensión.....	22
Figura 2 Deformación de cuerda libre y con carga concentrada.....	22
Figura 3 Deformación de cuerda bajo dos cargas concentradas.....	23
Figura 4 Deformación de cuerdas bajo carga distribuida uniforme.....	23
Figura 5 Diagrama de suma vectorial para cuerda bajo una carga puntual.....	25
Figura 6 Diagrama de suma vectorial para cuerda bajo dos cargas puntuales.....	25
Figura 7 Curva catenaria con altura de apoyos desiguales.....	26
Figura 8 Esquema de viga Jawerth.....	27
Figura 9 Deformación de cuerda sometida a carga distribuida.....	28
Figura 10 Viga Jawerth bajo carga distribuida.....	29
Figura 11 Detalle de estructura de cable.....	30
Figura 12 Detalle de diferentes formas de hilos de cables.....	31
Figura 13 Detalle de diferentes formas de cables.....	31
Figura 14 Detalle de conexión de cables.....	32
Figura 15 Detalle de conexión de cables mediante el uso de grapas.....	32
Figura 16 Detalle de conexión de cables mediante el uso de conectores en los extremos.....	33
Figura 17 Detalle de conexión de cables al suelo.....	33
Figura 18 Discretización de la membrana como red de cables.....	38
Figura 19 Modelo y análisis de membrana (esfuerzo deformaciones).....	38
Figura 20 Tejido de membrana sin recubrimiento.....	40
Figura 21 Tejido de membrana con recubrimiento.....	40
Figura 22 Ensayo a tensión biaxial y curva isterística.....	41
Figura 23 Perfil de carga para ensayo biaxial.....	42
Figura 24 Cizallamiento en las fibras del teejido.....	42

Figura 25 Proyección del plano mediante la longitud real sobre una lámina	43
Figura 26 Proyección del plano mediante el ángulo real sobre una lámina	43
Figura 27 Proyección de láminas para superficie cinclástica y anticlásticas.	44
Figura 28 Proyección de tiras para la forma de una superficie irregular.	44
Figura 29 Patrones de corte para la conformación de una tenso estructura tipo cometa	45
Figura 30 Generación de patrones de corte mediante el uso de software.	46
Figura 31 Rroceso resumido de diseño, patronaje y ensamblaje.	46
Figura 32 Detalle de conexiones entre membranas.....	47
Figura 33 Detalle de costura en conexiones entre membranas	48
Figura 34 Detalle de conexión de membrana mediante conectores mecánicos.....	48
Figura 35Dispoición de la costura con respecto a la dirección de las fuerzas de tensión.....	49
Figura 36 Inclinación de la costrua debido a esfuerzos trnasversales.....	49
Figura 37 Patrones de union de lpaminas.....	49
Figura 38 Ensayos de tracción en las costuras	50
Figura 39 Detalles de acoples entre membranas y cables.	50
Figura 40 Conexiones entre membranas y cables	51
Figura 41Planta de estriramiento de calbes.....	52
Figura 42 Proceso de recubrimiento mediante cuchillo de aire	54
Figura 43 Detalles de conexión en las esquinas (Abierto).....	55
Figura 44 Detalle de conexión en las esquinas (Cerrado).....	55

Imágenes

Imagen 1 Ejemplo de tensoestructura en la construcción de hospital de campaña durante la emergencia del Covid-19	34
Imagen 2 Ejemplos de láminas de jabón sobre diferentes superficies	36
Imagen 3 Modelo a escala de tenso estructura.....	37
Imagen 4 Inyección de lubricante	53
Imagen 5 Inyección de recubrimiento sobre tejido	54
Imagen 6 Trabajador suspendido durante la instalación de una membrana para cubierta	56
Imagen 7 Grúa empleada como elemento estabilizador temporal	57
Imagen 8 Dinamómetro manual digital y winche eléctrico para tensionamiento y tendido de cables.....	58
Imagen 9 Plataformas de trabajo para actividades en altura.	58
Imagen 10 Tensores temporales.....	59
Imagen 11 Bobina y desenrollado de cables	60
Imagen 12 Despliegue de membrana en etapa de premontaje	60
Imagen 13 Trabajo en altura durante la instalación de cubierta.....	61
Imagen 14 Despliegue en altura y transporte vertical de membranas.....	61
Imagen 15 Daño por viento en la cubierta del estadio único en Argentina.	62
Imagen 16 Daño por viento en la cubierta del estadio London O2 Arena-Londres.....	62
Imagen 17 Vista de una granja porcícola fuente: Manual construcciones porcícolas: Asociación PORKOLOMBIA.....	80
Imagen 18 Ejemplo de instalación de cubierta en granja porcícola, Fuente: Manual construcciones porcícolas: Asociación PORKOLOMBIA	81
Imagen 19 Ejemplo de cubierta usando membrana: Fuente: https://actualidadavipecuaria.com ..	81
Imagen 20 Ejemplo de cortinas en granjas, accionamiento mecánico con el uso de poleas; Fuente: https://www.aditmaq.com/southwestern/	82
Imagen 21 Fachada frontal del caso ejemplo, Fuente: Elaboración propia de autor.....	83

Imagen 22 Vista de sección transversal del caso de ejemplo, Fuente: Elaboración propia de autor.	84
Imagen 23 Planta general, Fuente: Elaboración propia de autor.....	84
Imagen 24 Emplazamiento de edificación, Fuente Google Earth.....	85
Imagen 25 Terreno de emplazamiento de edificación: Fuente: autor.	86
Imagen 26 Propuesta de estructura tensada: Fuente. Engel, H.	87
Imagen 27 Planta de ejes y distribución de cuerdas en paralelo.	89
Imagen 28 Propuesta de prototipo - Detalle 3D-conceptual; Fuente: Elaboración propia de autor.	90
Imagen 29 Propuesta de prototipo-Detalle 3D -realista; Fuente: Elaboración propia de autor.	90

Resumen

En este documento se realiza una revisión bibliográfica sobre el concepto de estructuras tensadas exponiendo de forma inicial el marco teórico que soporta este tipo de elementos desde el análisis matemático de estructuras tipo (vigas de cable o viga Jawerth); se presenta una serie de consideraciones constructivas abarcando temas como materiales, maquinaria y equipos de construcción y consideraciones para el diseño de acuerdo a los códigos ASCE 55-16 (Tensile Membrane Structure) y ASCE 19-16 (Structural applications of Steel cable for building), de las cuales se presenta un resumen en cada uno de estos realizando una transcripción de las consideraciones aplicables al caso práctico presentado en el documento. Posteriormente se desarrolla un caso ejemplo donde se aplican los conceptos fundamentales para el análisis de una cubierta empleado un modelo de tensa estructura.

Palabras clave: estructuras tensadas, membrana estructural, Viga Jawerth,

Abstract

In this paper a bibliographical review is carried out on the concept of tensioned structures, initially exposing the theoretical framework that supports this type of elements from the mathematical analysis of typical structures (cable beams or Jawerth beams); A series of constructive considerations is presented covering topics such as construction materials, machinery and equipment and considerations for design according to ASCE 55-16 (Tensile Membrane Structure) and ASCE 19-16 (Structural application of Steel cable for building) codes, of which a summary is presented in each of these, making a transcription of the considerations corresponding to the practical case presented in the document. Subsequently, an example case is developed where the fundamental concepts are applied for the analysis of a roof using a tense structure model.

key words: Tensile structure,

Introducción

Una de las actividades fundamentales en el oficio del diseño estructural es ofrecer diferentes alternativas para solucionar un problema determinado en las edificaciones; si se centra la atención en los sistemas de cubiertas vemos que en la actualidad existe gran oferta de sistemas y tipos de cubierta que se emplean de acuerdo a su conveniencia técnica y estética, para vivienda se acostumbra por cubiertas en barro o fibrocemento y cuyos materiales para la estructura de soporte puede variar entre madera o perfiles metálicos. Para edificaciones industriales en los últimos años se ha optado por cubrimientos en tejas termoacústicas en PVC, Standing Seam o similares gracias a la ventaja que ofrecen estas en cuanto a peso y luces de soporte y cuya estructura se construye generalmente con perfiles metálicos.

El acero está ligado fuertemente a la industria de la construcción en la actualidad y se ha creado una fuerte dependencia por este material a tal nivel que la variación en precios y en oferta de este insumo puede afectar gravemente la economía de un país, entendiéndose que la construcción es una de las actividades más importantes para el desarrollo económico; es por esto que no se puede escatimar esfuerzos para desarrollar sistemas estructurales y métodos constructivos que optimicen el uso del acero y permitan mitigar los altos costos derivados por el incremento de los insumos, lo cual ocurre a nivel mundial en este año 2022.

Las cubiertas con membranas flexibles hacen parte de las primeras soluciones que dio la humanidad para cubrir luces y generar sombra en los espacios abiertos y fueron muy útiles para las comunidades nómadas que aprovechaban la ligereza de las mismas y comodidad para transportarlas y armarlas en forma de tiendas es sus diferentes emplazamientos; incluso, hoy aún existen comunidades nómadas que siguen usando membranas naturales en sus viviendas, lo que demuestra que las membranas siguen siendo buena una solución para el cubrimiento de espacios.

Los tiempos modernos han traído consigo estudios y tecnologías que han permitido desarrollar fibras sintéticas que de acuerdo a sus componentes además de pesos ligeros, ofrecen ventajas para diferentes tipo de aplicaciones, como calor, luminosidad, flexibilidad, impermeabilidad entre otros y la industria de la construcción ha sabido aprovechar estas ventajas para desarrollar elementos

arquitectónicos de grandes dimensiones contando con cubrimiento completo sin exceder en las cargas por peso propio como lo son los estadios deportivos, pabellones de exposiciones e incluso el revestimiento de grandes edificaciones; aplicaciones más pequeñas se observan en pasarelas de aeropuertos, estaciones de trenes y en edificaciones más pequeñas se observan los cubrimientos de restaurantes, parqueadero y elementos urbanos.

La aplicación de membranas estructurales para el cubrimiento de luces en edificaciones industriales aún se encuentra muy limitado y es más común ver aplicaciones en hangares y algunas bodegas. En el contexto colombiano, se observa que estas estructuras no hacen parte del imaginario urbano, pues son muy pocas las estructuras relevantes que se han izado con este concepto arquitectónico, las aplicaciones más comunes son algunos estadios de futbol como el Metropolitano de Barranquilla, el Pascual Bravo de Cali y otros.

El presente documento propone una alternativa para el cubrimiento de grandes espacios mediante el uso de tenso estructuras para unas granjas agroindustriales, entendiendo que este tipo de edificaciones requiere cumplir con algunas condiciones técnicas de ventilación y temperatura, por lo tanto, cualquier propuesta debe cumplir con estos requisitos para poder ser considerada en su aplicación.

Para el desarrollo de esta propuesta se realizará una revisión bibliográfica sobre las consideraciones técnicas de acuerdo a los códigos ASCE 55-16 y ASCE 19-16 y se tomará un caso real de una edificación construida en un municipio de Antioquia donde analizará una membrana estructural para la cubierta de ésta.

Planteamiento del problema

Las tenso estructuras son elementos muy versátiles que permiten una gran variedad de configuraciones arquitectónicas, son estructuras livianas aptas para el cubrimiento de grandes superficies y en la actualidad podemos ver varios ejemplos alrededor del mundo como estadios, palacios de cultura, estaciones de metro, hospitales de campaña y muchas otras aplicaciones más sencillas donde se evidencia la creciente tendencia en la construcción de estos elementos a nivel internacional.

En Colombia no se observa un incremento considerable en la construcción de tenso estructuras, limitándose a dos tipos de aplicaciones convencionales (Escenarios deportivos y lugares de esparcimiento). Una de las razones que podría explicar el limitado uso de estas estructuras en Colombia podría ser la falta de una normativa nacional que plantee los lineamientos y consideraciones para el análisis, diseño y construcción de este tipo de estructuras. La NSR-10 distingue a este tipo de estructuras como estructuras especiales y en cuyo caso, se deben aplicar normas o códigos reconocidos para su concepción, lo que deja al libre criterio a los calculistas para la selección del código adecuado para su diseño. Los métodos de análisis y diseño de tenso estructuras varían de acuerdo al punto geográfico, aun no se ha establecido un método estándar a nivel mundial y en la actualidad se pueden identificar entre otros códigos como el estadounidense, el europeo, el francés, el alemán, japonés entre otros, lo que ofrece al ingeniero un abanico de posibilidades para su diseño y esto conlleva a que en Colombia no se haya adoptado una metodología establecida que guíe a los profesionales del área y se establezca un estándar nacional para este tipo de estructuras derivando en una falta de interés y por ende una limitada bibliografía que permita su entendimiento y aplicación.

Los códigos de diseño en Colombia están basados es los códigos estadounidenses, por lo que es una tendencia natural la adopción de estos códigos adaptándolos a las condiciones locales, es por esta razón, que este documento se propone exponer las consideraciones para el análisis y diseño de las tenso estructuras de acuerdo a los códigos estadounidenses ASCE 55-16 y ASCE 19-16 y una aplicación mediante un caso ejemplo donde se exponen las mimas en el análisis de una cubierta para el sector agroindustrial.

Las granjas agroindustriales tienden a tener superficies que puede oscilar entre 500m² y 2000m² y a pesar de que su sistema estructural es bastante simple, gran parte del costo de construcción de una granja se destina a la instalación de la cubierta, la cual por las condiciones atmosféricas al interior de ellas es necesario que sea en PVC y el acero de la estructura debe estar muy bien protegido. Las tejas en PVC son elementos livianos a comparación de otros sistemas de cubiertas como fibrocemento, barro, entre otros; sin embargo, dada las condiciones de distanciamiento urbano donde se suele construir estos espacios, las cargas de viento que gobiernan el diseño obligan a disponer de una considerable cantidad de acero para su estructura de cubierta para la cercha y las correas de apoyo de las tejas.

A raíz de los elevados precios y el aumento constante que registran las materias primas para la construcción en lo corrido de los últimos dos años (2021-2022), es pertinente indagar sobre los diferentes sistemas estructurales que permitan ofrecer soluciones económicas para los inversionistas en la agroindustria nacional.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Exponer las consideraciones técnicas para el análisis, diseño y construcción de tenso estructuras basado en los códigos ASCE 55-16 y ASCE 19-16 ejemplificando mediante un caso práctico de análisis de la cubierta de una granja agroindustrial

1.2. Objetivos específicos

- Documentar la teoría y que fundamentan el diseño de las tenso estructuras, desde la concepción geométrica para las formas y cálculo de fuerzas que interactúan en ella.
- Exponer las consideraciones de los códigos ASCE 55-16 y ASCE 19-16.
- Desarrollar un caso ejemplo de diseño de una tenso estructura basado en los códigos ASCE 55-16 y ASCE 19-16, mostrando los criterios de diseño más relevantes de acuerdo al tipo de estructura desarrollada.

2. Metodología

Para el desarrollo de este documento se realiza un revisión bibliográfica pertinente a todo lo relacionado con las tenso estructuras; de una serie de documentos seleccionados se extraen los conceptos que direccionen el desarrollo del mismo hacia la conceptualización de las consideraciones técnicas para el análisis , diseño y construcción de las estructuras tensadas.

Se consideran los códigos técnicos ASCE 55-16 y ASCE 19-16 de los cuales se extraen y se realiza una transcripción de aquellas consideraciones pertinentes al caso práctico, el cual corresponde a una cubierta para una granja porcícola, cuyo sistema estructural consisten normalmente en pórticos en estructura metálica y cubierta en teja PVC; la propuesta en este documento es la construcción de la cubierta de este tipo de galpones con una estructura tensada, la cual consiste en mástiles cada 10.2m, que soportan vigas de cable y la cubierta de membrana en PVC.

3. Marco teórico

3.1. Conceptualización sobre las estructuras.

(Engel, 2001). Las estructuras son mecanismos que se emplean para delimitar y conducir los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas y se definen en cuatro condiciones específicas de cada edificación:

1. Peso propio del edificio
2. Tipo de uso
3. Características y articulaciones del material del edificio
4. Influencias y particularidades del lugar y de su entorno.

Y existen dos conceptos fundamentales que cumplen las estructuras:

1. Las fuerzas aplicadas sobre las estructuras fluyen a través de ella y dirigen hacia la tierra.
2. Existe un equilibrio de fuerzas que mantiene la estructura fija por medio de fuerzas en sentido contrario.

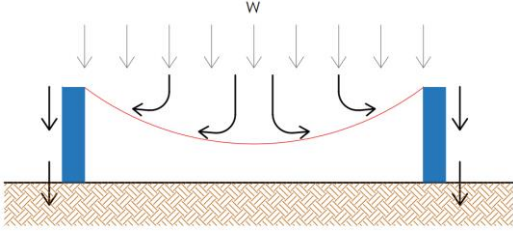
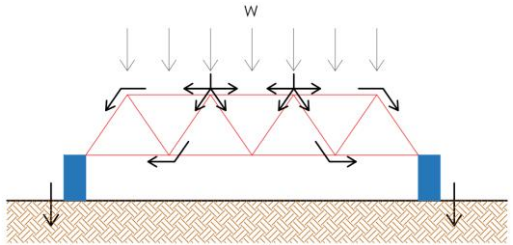
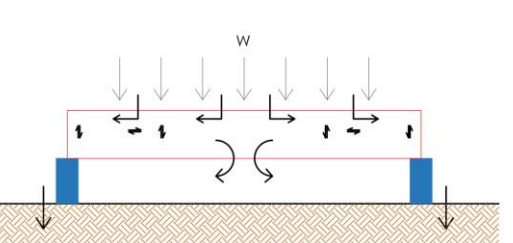
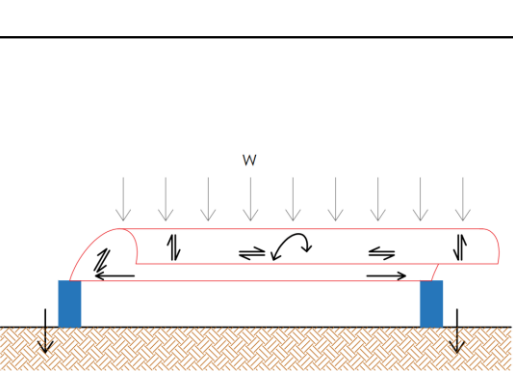
Existen cuatro mecanismos para la transmisión de cargas que actúan en la estructura, la tabla 1 muestra en resumen de estos.

El análisis de estructuras exige comprender el mecanismo de transmisión de cargas las cuales están relacionadas con los mecanismos de falla que se deben tener en consideración para un buen diseño.

3.2. Forma activa.

Un sistema estructural de forma activa es un elemento conformado por materiales flexibles que dispuestos de forma definida y soportados en sus extremidades fijas, puede soportarse a sí mismo y cubrir un vano; al tratarse de elementos con rigidez despreciable cualquier variación en las condiciones de apoyo afecta la forma del elemento. Si un cable tensado está trabajando en un sistema elástico, bajo nuevas cargas asume una nueva línea de tracción; si trabaja en un sistema inelástico, debe compensar la línea de presión transformada a través de su rigidez.

Tabla 1 Resumen de mecanismos de transmisión de fuerzas

MECANISMOS PARA LA TRANSMISIÓN DE CARGAS				
MECANISMO	ACCIÓN	EFEECTO	ESQUEMA	
1	Adaptación a las fuerzas	Forma	Los elementos se deforman de acuerdo a la aplicación y distribución de cargas.	
2	Subdivisión de fuerzas	Vectorial	Los elementos no presentan grandes deformaciones, las cargas se transmiten de forma axial en cada uno de ellos.	
3	Confinamiento de las fuerzas	Sección	Los elementos no sufren grandes deformaciones, se generan fuerzas internas de cortantes y momentos en todas las direcciones.	
4	Dispersión de las fuerzas	Superficies	Los elementos se deforman de acuerdo a la aplicación y distribución de cargas, no se generan momentos y las cargas viajan en todas direcciones sobre el plano de la superficie.	

fuelle: autor.

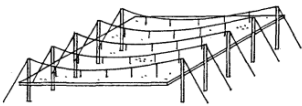
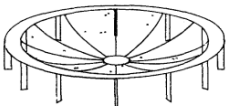
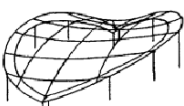
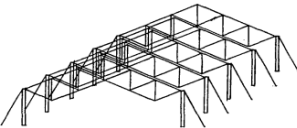

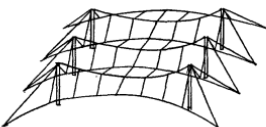

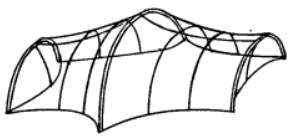
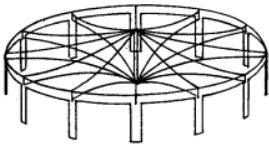
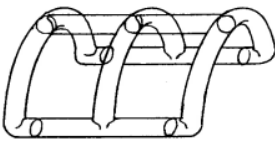
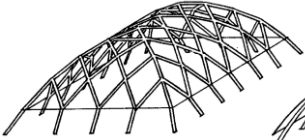
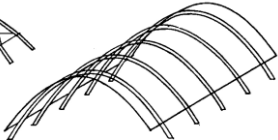

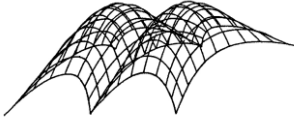
Los sistemas estructurales de forma activa debido a su alta dependencia de las condiciones de carga en su forma, están muy influenciados por el flujo natural de fuerzas, por lo tanto, los elementos no

pueden estar dispuestos en forma arbitraria en la estructura y es importante resaltar que los elementos de un sistema estructural de forma activa están sometidos a esfuerzos normales, tanto de tracción como compresión.(Engel, 2001).

Las estructuras que entran en este rango son (revisar tabla 2):

1. Estructuras de cables.
2. Estructuras en tiendas.
3. Estructuras neumáticas.
4. Estructuras de arcos.

Tabla 2 Resumen de estructuras de forma activa

SISTEMAS DE FORMA ACTIVA				
Sistemas de cables	 Cables paralelos	 Cables radiales	 Cables biaxiales	 Celosías de cables (Palelo)
Sistemas de tiendas	 Tiendas apuntaladas	 Tiendas onduladas	 Tiendas apuntaladas indirectas	
Sistemas neumáticos	 Control de aire interno	 Colchón de aire	 Tubos de aire	
Sistemas de arcos	 Arcos lineales	 Bóvedas	 Bóvedas	 Retículas abovedadas

Fuente: E. p. autor basado en (Engel, 2001).

Los sistemas estructurales de forma activa son adecuados para cubrir grandes luces cuya magnitud dependerá del tipo de sistema descrito en la tabla 2, de su configuración y de los materiales empleados, Esto debido a que cada tipo de estructura le corresponde un estado de tensiones específico a cada elemento(Engel, 2001) la tabla 3 expone las luces que pueden alcanzar a cubrir estos sistemas estructurales.

Tabla 3 Luces alcanzadas por los diferentes sistemas estructurales de forma activa.

ESTRUCTURA	SISTEMA	MATERIALES	RANGO PROMEDIO	RANGO MÍNIMO Y MÁXIMO
Cables	Cables en paralelo	Metal+Horimón armado	80m - 500m	50m - 500m
	Cables radiales	Metal+Horimón armado	60m - 200m	30m - 250m
	Cables biaxiales	Metal+Horimón armado	50m - 120m	25m - 200m
Tiendas	Apuntaladas	Textil+madera+plástico	10m - 25m	5m - 40m
	Plegada	Textil+madera+plástico	30m - 70m	20m - 100m
	Apuntalada indirecta	Textil+madera+plástico	50m - 80m	20m - 150m
Neumáticas	Control de aire	Plástico + metal	10m - 220m	10m - 300m
	Colchón de aire	Plástico + metal+hormigón+madera	20m - 70m	20m - 120
	Tubos de aire	Plástico	25m - 70m	15m - 100
Arcos	Lineales	Hormigón armado/madera laminada/metal	25m - 70m	15m - 100m
	Bóvedas	Obra de fábrica	8m - 20m	4m - 50m
	Retículas abovedadas	Metal / madera	20m - 50m	10m - 150m

Fuente: Elaboración propia de autor

3.3. Relación entre dirección de esfuerzo y deformación para elementos no rígidos.

El caso más simple de analizar es una cuerda, ya que las cuerdas solo trabajan a tensión y las cargas presentes se transmiten por medio de esfuerzos axiales, una carga aplicada sobre una cuerda generará reacciones en los elementos que los sujetan, las cuales se descompondrán en componentes de fuerza vertical y horizontal (ver figura 1).

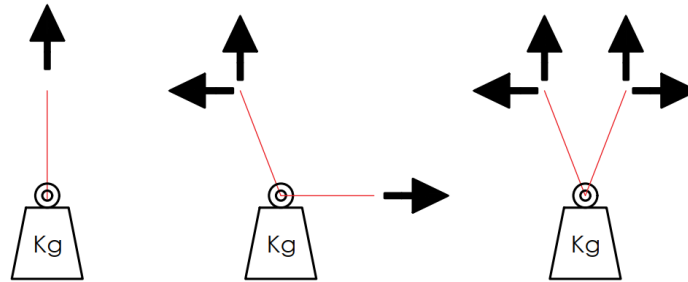


Figura 1 Reacción de cuerda a tensión

Una cuerda libre sin carga en su luz está sometida a una carga distribuida por su peso propio, esta distribución de cargas generará una curva catenaria; si a un tramo de una cuerda apoyada en los extremos se le aplica una carga puntual, la cuerda describirá tramos rectos (ver figura 2).

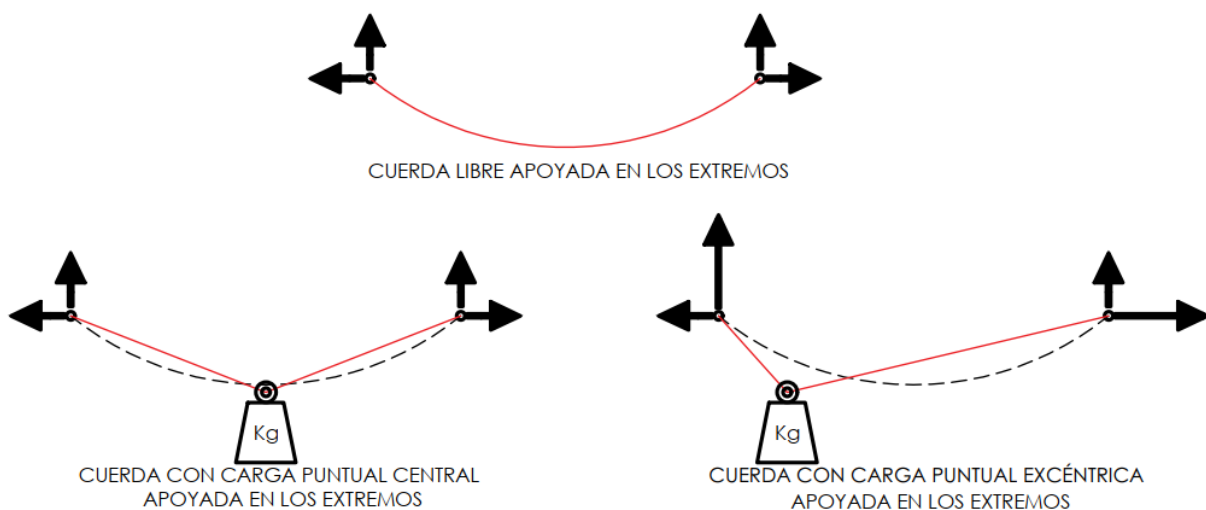


Figura 2 Deformación de cuerda libre y con carga concentrada.

Debido a la excesiva esbeltez del cable, este no puede absorber esfuerzos de momento, por eso, su reacción es modificar su forma en la medida que se mueve la carga, la tensión de la cuerda es constante en toda la longitud de cada tramo, la variación de las reacciones se refleja al descomponer trigonométricamente los esfuerzos de reacción, gráficamente se observa una relación entre los componentes verticales y horizontales de esfuerzos y la disposición de las cargas. (Machado, 2014)

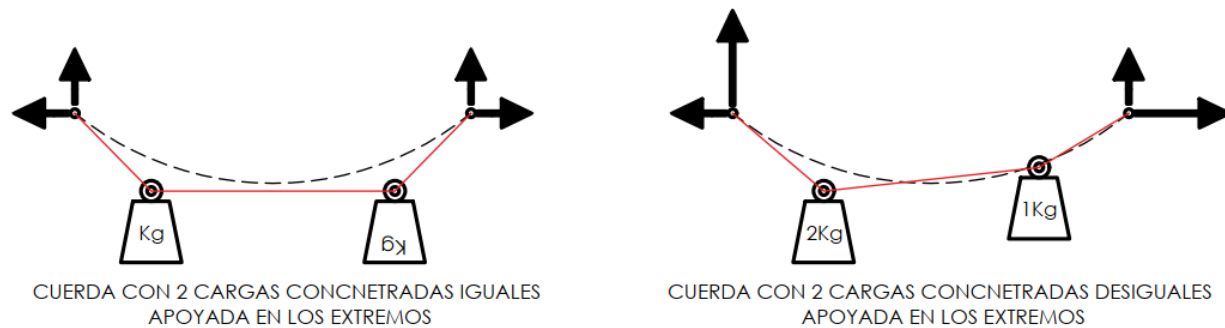


Figura 3 Deformación de cuerda bajo dos cargas concentradas

Se observa en la imagen 3 que la cuerda responde con su forma ante la aplicación de varias cargas con diferente magnitud; Si se aplican más cargas concentradas de igual magnitud hasta lograr una configuración de carga distribuida, la cuerda describe tramos cortos rectos que diferencialmente describe una curva parabólica (ver figura 4). La curva parabólica es distinta a la curva catenaria.

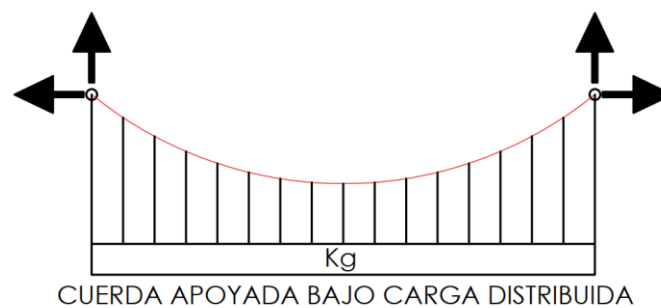


Figura 4 Deformación de cuerdas bajo carga distribuida uniforme.

3.4. Análisis de cables

La solución de las ecuaciones de Navier Stokes para cables es muy compleja incluso en la actualidad, no existen métodos analíticos para la solución de éstas en forma general, sin embargo, bajo tres supuestos es posible simplificar los análisis y la solución se vuelve mucho más fácil (Cueto et al., 2017).

- 1) Hipótesis de equilibrio: Bajo la aplicación de una carga según su forma, el cable adquiere un equilibrio representado por una forma equilibrada dependiendo de la naturaleza de la carga, como se refleja en las figuras 1 a 4.
- 2) De acuerdo a la hipótesis anterior, el único componente del tensor de tensiones distinto de cero es $\sigma(x, y, z) = \sigma_x$; Esto quiere decir, que es constante a lo largo de la longitud del cable, como se mencionó anteriormente.
- 3) La fuerza interna se describe como:

$$N(x) = \int_A \sigma_x dA = \sigma(x)A, \quad \text{Ec. 2.4.1}$$

Donde A es la sección transversal del cable y se asume como constante, N(x) es la fuerza axial del cable y en la mayoría de los casos depende de la coordenada X del cable.

De esta forma, se puede obtener otras magnitudes de acuerdo a la ecuación constitutiva y cinemática:

$$\varepsilon_x(x) = \frac{\sigma(x)}{E} = \frac{N(x)}{AE}, \quad \text{Ec. 2.4.2}$$

Donde ε_x es el único componente que no desaparece del tensor de esfuerzos y E el módulo de Young del material y habiendo obtenido la deformación unitaria, se puede calcular el desplazamiento en cualquier punto utilizando la ecuación considerando el área constante a lo largo del cable:

$$\Delta l = \frac{1}{AE} \int_{x=0}^{x=l} N(x) dx. \quad \text{Ec. 2.4.3}$$

De esta forma, se puede resolver un cable (Fuerzas internas y desplazamiento) sin la necesidad de resolver las ecuaciones de Navier Stokes.

A partir de esto, se puede establecer las ecuaciones de equilibrio para hallar las reacciones y fuerzas internas de un cable, estas ecuaciones de equilibrio se pueden determinar por medios gráficos, el sistema está en equilibrio si al hacer la suma vectorial de las fuerzas, estas generan un polígono cerrado (Cueto et al., 2017)

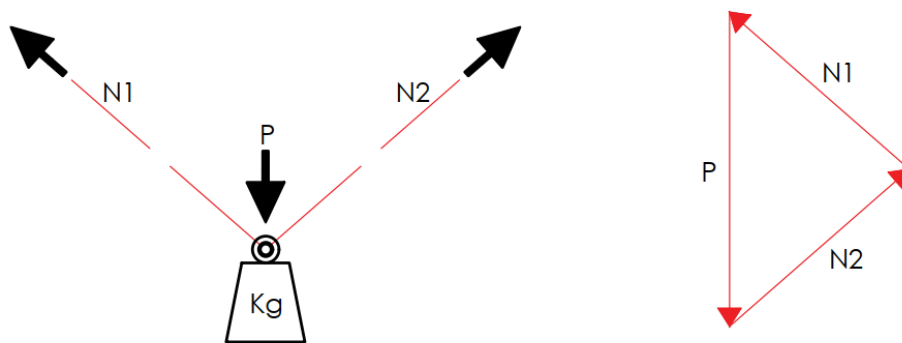


Figura 5 Diagrama de suma vectorial para cuerda bajo una carga puntual

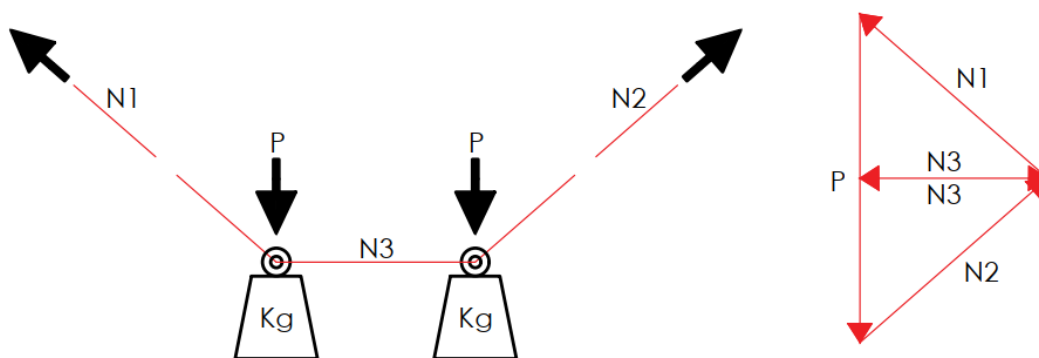


Figura 6 Diagrama de suma vectorial para cuerda bajo dos cargas puntuales

La forma adecuada de diseñar una estructura tensada no es definiendo inicialmente la longitud del cable, sino definiendo las pendientes y hallando las fuerzas internas y definir la sección requerida; posteriormente tener en cuenta las posibles variaciones en su longitud debido a la aplicación de las cargas.(Cueto et al., 2017).

3.4.1. Curvas funiculares debido a cargas distribuidas

Como se mencionó anteriormente, la curva descrita por una cuerda cargada de forma distribuida es una parábola, en realidad, este es un caso particular del caso anterior, con la diferencia de que, al realizar el gráfico de sumatoria de fuerzas, no se generará un polígono sino una curva, de ahí el nombre de curva funicular; la demostración de la fórmula no entra en el marco teórico de este documento; siendo así, la fórmula para la solución de una cuerda bajo una carga distribuida es (Cueto et al., 2017):

$$y = \frac{q}{2H} \left(x^2 - \frac{\ell^2}{4} \right). \quad \text{Ec. 2.4.1.1}$$

3.4.2. Curva catenaria

La catenaria es la curva natural que describe una cuerda sujeta en sus dos extremos sometida a su propio peso.

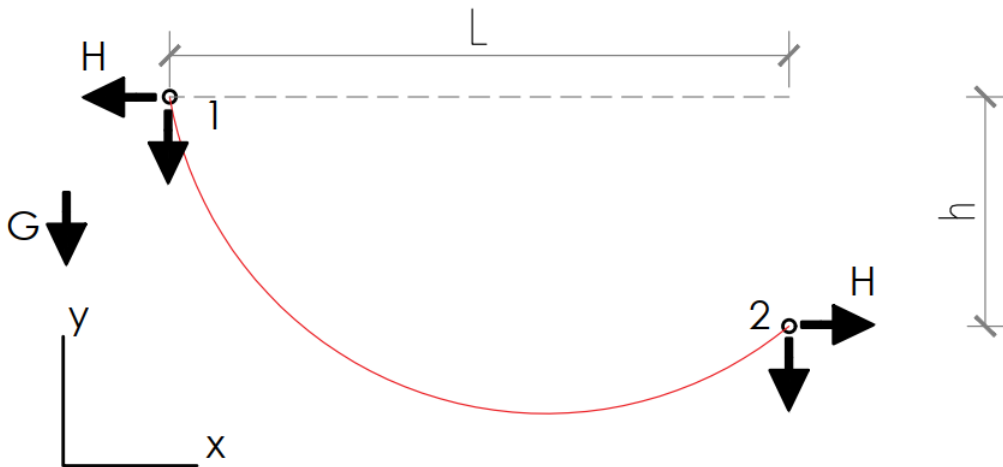


Figura 7 Curva catenaria con altura de apoyos desiguales.

La ecuación para la curva catenaria es:

$$y = \frac{H}{q} \left[1 + \cosh\left(\frac{qx}{H} + \zeta\right) - \cosh(\zeta) \right] \quad \text{Ec. 2.4.2.1}$$

Donde:

$$\zeta = \sinh^{-1}\left(\frac{qh}{2H \sinh(\omega)}\right) - \omega \quad \text{Ec. 2.4.2.2}$$

$$\omega = \frac{ql}{2H} \quad \text{Ec. 2.4.2.3}$$

La longitud de la cuerda se puede calcular mediante la siguiente expresión (Torras, 2006):

$$L^2 = \frac{l^2}{\omega^2} \sinh^2(\omega) - h^2 \quad \text{Ec. 2.4.2.4}$$

3.4.3. Vigas de cable (Cercha Jawerth)

De todo lo anteriormente expuesto, una de las lecciones más importantes es que un elemento carente de rigidez será muy susceptible en su forma por la variación la carga aplicada, encontrar la forma ideal en la que la tensoestructura se encuentra lo suficientemente tensada para mitigar su deformación es uno de los retos que impone el análisis de este tipo de estructuras.

Se ha propuesto una solución para este problema de deformaciones mediante la configuración de un sistema de cuerdas tensadas denominado “vigas de cable”.(Cueto et al., 2017) este método consiste en unir dos cuerdas (superior e inferior) con tramos tensados generando un arriostramiento que restringe la deformación; esta configuración ya no es posible resolverse mediante el empleo de las ecuaciones de equilibrio básicas, se han desarrollado varios métodos de análisis para este fin.

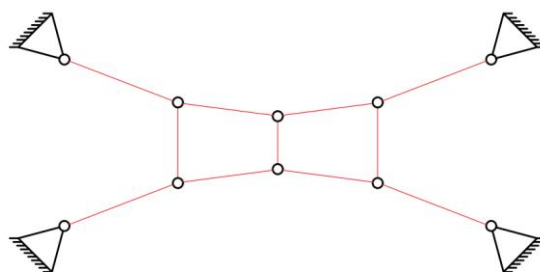


Figura 8 Esquema de viga Jawerth

3.5. Análisis

Se considera inicialmente una cuerda sencilla con una carga distribuida, de acuerdo a la Ec. 2.5.1 se puede obtener las fuerzas horizontales; por sumatoria de fuerzas se obtiene las reacciones verticales.

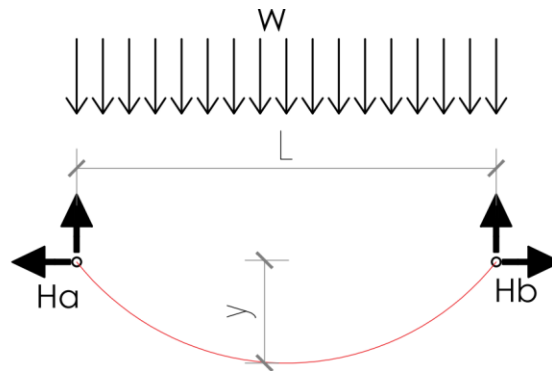


Figura 9 Deformación de cuerda sometida a carga distribuida.

$$Ha = Hb = \frac{WL^2}{8y} \quad \text{Ec. 2.5.1}$$

$$Va = Vb = \frac{WL}{2} \quad \text{Ec. 2.5.2}$$

Para el análisis de un sistema combinado de dos cuerdas simétricas conectadas con tensores, se observa que el cálculo para las reacciones y resultante se realiza de manera similar al caso anterior, y como el sistema es simétrico, los esfuerzos se distribuyen de igual forma en los cuatro puntos de apoyo.

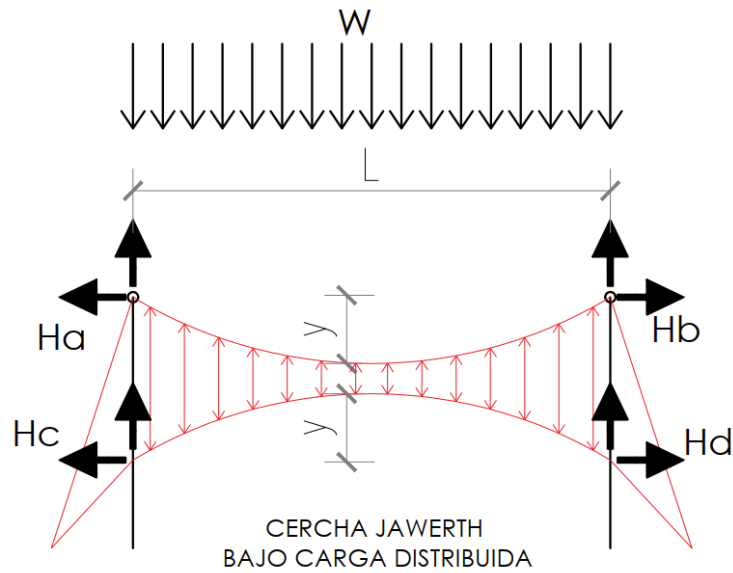


Figura 10 Viga Jawerth bajo carga distribuida

$$H_a = H_b = H_c = H_d = \frac{WL^2}{16y} \quad \text{Ec. 2.5.3}$$

$$V_a = V_b = V_c = V_d = \frac{WL}{4} \quad \text{Ec. 2.5.4}$$

$$R_a = R_b = R_c = R_d$$

$$R_a = \sqrt{H_a^2 + H_b^2} \quad \text{Ec. 2.5.5}$$

3.6. Cables

3.6.1. Cables de alambre:

“Wire rope” conocidos en Latinoamérica como guaya, es un elemento mecánico capaz de resistir fuerzas a tensión; los cables de acero se pueden usar en sistemas tridimensionales y bidimensionales, cada alambre puede alcanzar una resistencia aproximada de $1,7\text{KN/mm}^2$ lo que en conjunto otorga una alta resistencia al cable; esto se logra mediante tratamientos térmicos

durante la producción; además de su alta resistencia, los cables estructurales tienen una alta ventaja en los procesos constructivos por su bajo peso y fácil manipulación, además, que son aplicables en todas las condiciones climáticas(Seidel, 2009)

3.6.2. Fabricación de cables

Los cables consisten básicamente en Alambres, núcleo y torones

El núcleo es un conjunto de cuerdas en el centro del cable que sirve de soporte de los cables externos; estos pueden ser en fibra o en acero.

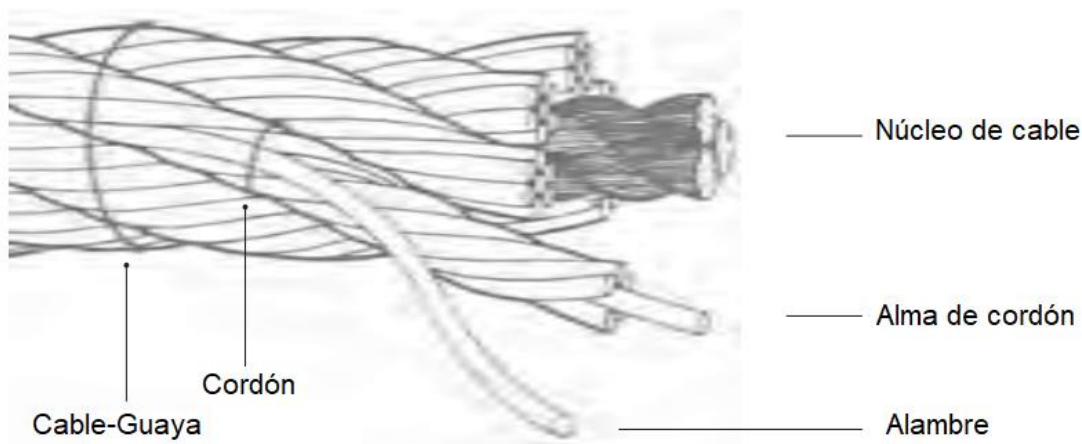


Figura 11 Detalle de estructura de cable.

El alambre de acero es el componente más pequeño del cable, posee un diámetro entre 0.5mm y 0.7mm, está hecho generalmente de acero al carbono sin alear, es decir, aquel acero cuyos únicos componentes son acero y carbón; el principal material para el cable es el alambre enrollado, éste se puede endurecer mediante varios procesos de conformación en frío, el tratamiento térmico controlado entre los procesos de estirado individual y el siguiente enfriamiento rápido produce mayores puntos fuertes; la combinación de ambos métodos aumenta la calidad del cable.

Los alambres poseen diferentes secciones que influyen en las propiedades del cable; las secciones se pueden clasificar en redondas, con formas o compactas.

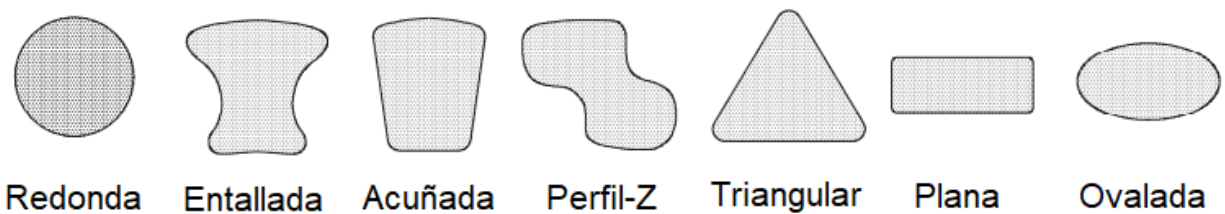


Figura 12 Detalle de diferentes formas de hilos de cables.

Los cables están compuestos por una o varias capas de alambres o torones que giran helicoidalmente alrededor de un núcleo y se clasifican en cuerdas redondas o planas. Estos se pueden combinar para formar unidades mayores que se denominan torones, y estos a su vez se clasifican en paquetes de cables paralelos y paquetes de hilos paralelos; los torones se utilizan principalmente en la suspensión de puentes.

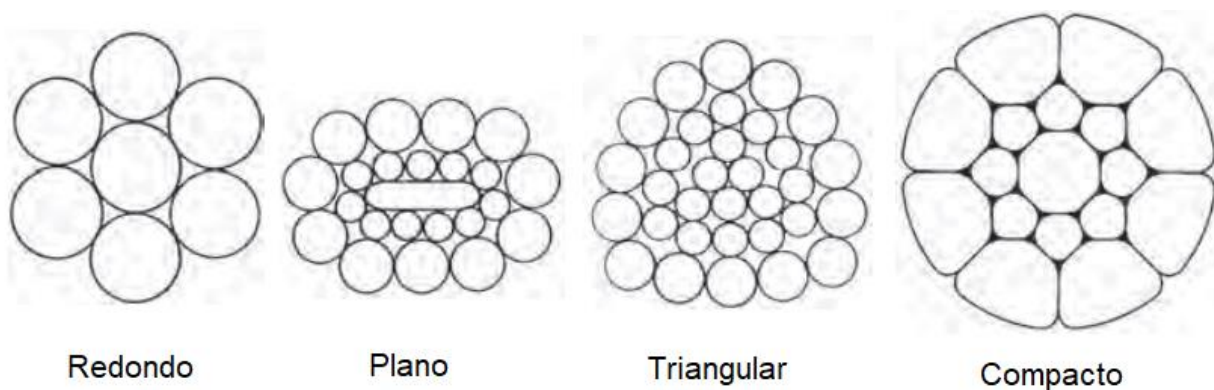


Figura 13 Detalle de diferentes formas de cables

3.6.3. Anclajes

Los esfuerzos que actúan sobre los cables deben transmitirse a lo largo del cable o mediante anclajes hacia los elementos de la estructura como mástiles, columnas, vigas de borde, cimientos o incluso otros cables. El tipo de anclaje depende del tipo y diámetro de la cuerda, la magnitud de la fuerza.

3.6.3.1. Conexiones extremo a extremo

La forma más antigua de realizar conexiones es de extremo a extremo a través de empalme que pueden hacer conexiones con otras cuerdas o consigo mismas; Para esto, los extremos libres se

sueltan y se realiza un trenzado con la otra cuerda garantizando la transferencia de carga sin que se suelte el cable en este punto (ver figura 14).

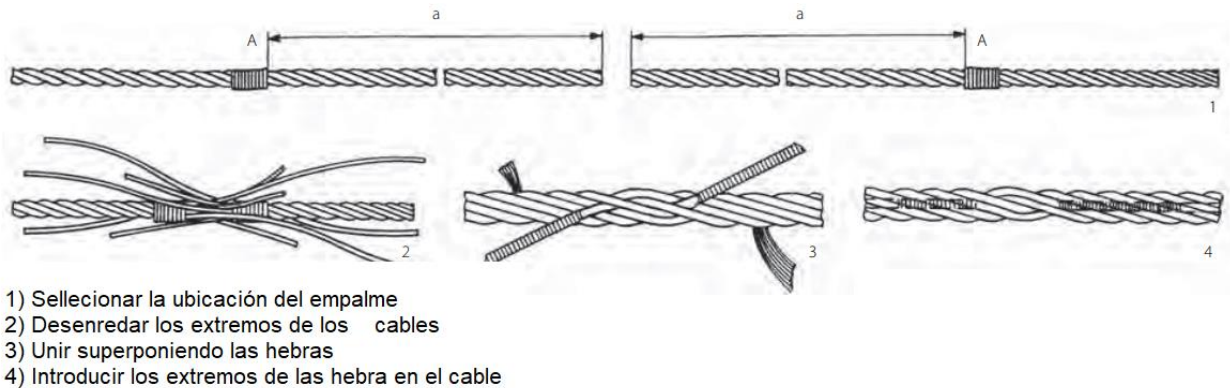


Figura 14 Detalle de conexión de cables.

Otra forma de unión de extremo a extremo es por medio de grapas, las cuales consisten en un gancho metálico en “U” que aprieta una abrazadera la cual presiona los cables, este sistema trabaja por fricción y entre más grapas se instalen, más fuerza a tensión resistirá (ver figura 15).

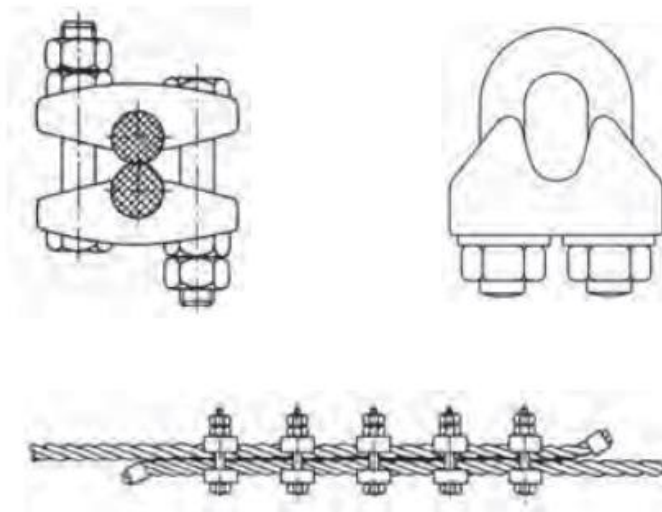


Figura 15 Detalle de conexión de cables mediante el uso de grapas.

3.6.3.2. Conexión de extremos

Puede realizarse las conexiones mediante cabezales fijos en el extremo de cada cable, este es el tipo de conexión más usado para grandes solicitaciones y consiste en unir dos cabezales mediante

instalados en cada extremo del cable, la transferencia de carga es más efectiva en este método con menos riesgo de desgarre, por lo cual, es preferible para grandes solicitaciones de carga (ver figura 16).

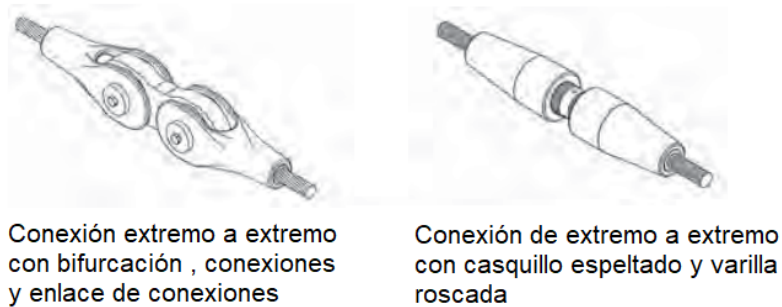
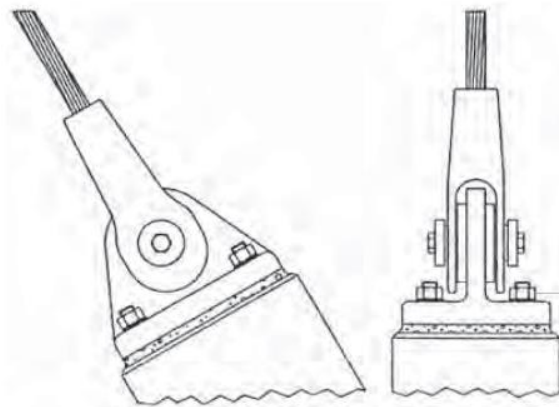


Figura 16 Detalle de conexión de cables mediante el uso de conectores en los extremos.

3.6.3.3. Conexiones de fundación o elementos de construcción

Las fuerzas que actúan sobre los cables de acero tensado deben transferirse a anclajes en los extremos hacia los elementos de la estructura como mástiles, columnas, vigas y fundaciones; cuando las estructuras se atirantan directamente al suelo, estas fuerzas deben transferirse al subsuelo a través de anclajes de tensión.(Seidel, 2009)



Conexión de extremo a fundación

Figura 17 Detalle de conexión de cables al suelo.

3.7. Membranas estructurales.

El uso de las membranas estructurales ha tenido un aumento considerable en los últimos años debido a su gran versatilidad, peso ligero, capacidad para cubrir grandes luces a menor costo y por el desarrollo de tecnologías de materiales que permiten cubrir una alta gama de necesidades; en la actualidad se encuentran aplicaciones en escenarios deportivos, usos hospitalarios y aplicaciones militares y aeroespaciales; un ejemplo interesante del uso las membranas estructurales fue la construcción de un hospital de campaña (temporal) de 700m² para la atención del (COVID-19) por el gobierno italiano(Xu et al., 2022), entre otros alrededor del mundo.



Imagen 1 Ejemplo de tensoestructura en la construcción de hospital de campaña durante la emergencia del Covid-19

Fuente: Anadolu Agency (2020) <https://www.aa.com.tr/es/mundo/as%C3%AD-es-el-hospital-de-campa%C3%B1a-que-abri%C3%B3-r%C3%ADo-de-janeiro-para-atender-casos-de-covid-19/1819429>

El análisis y diseño de una membrana estructural depende en gran medida de cálculos numéricos debido a la gran variedad de formas y la correcta modelación de los materiales; en este tipo de elementos es apropiado el uso de telas recubiertas debido a su alta relación de fuerza/peso.(Xu et al., 2022) El diseño de membranas no es una disciplina exacta, se sabe que la ingeniería no se trata

de encontrar valores exactos, sin embargo, el análisis de membranas representa una complejidad aun mayor dado que existen muchos métodos para la solución de estas. Diseñar una membrana consiste en identificar o predecir la forma que esta adquirirá y las tensiones a las que estará sometida al diseñar una tenso estructura se parte de una forma desconocida, son varios los métodos de búsqueda de una forma equilibrada y cada uno de ellos provee de ventajas y desventajas que los hacen propicios para cierta clase de geometrías por lo que no existe una forma óptima para la solución de un problema de esta naturaleza; es por esto, que el analista debe decidir cuál de los métodos existentes se adapta mejor a sus requerimientos para proponer una solución (Jurado-Piña & Salazar-Troya, 2014).

3.7.1. Búsqueda de la forma

La búsqueda de la forma se puede dividir en la búsqueda de la forma física y la búsqueda de la forma analítica (Pronk, 2021)

3.7.1.1. Búsqueda de forma física

Así como en cada proceso de diseño, la búsqueda de la forma es un proceso iterativo ya que cada condición varía en cada análisis hasta hallar la solución óptima, el método que se emplee para la búsqueda de la forma puede afectar los resultados, la tabla 4 compara dos métodos experimentales la búsqueda de la forma.

Métodos para la búsqueda de la forma física		
	Película de jabón	Membrana elástica
Perímetro	Flexible o perímetro cerrado rígido	Flexible o puntos rígidos y perímetros rígidos o flexibles
Superficie mínima	Superficie mínima absoluta	Difieren de la superficie mínima
Forma	Anticlásticas/Sinclásticas	Anticlásticas/Sinclásticas
Manipulación de superficie	a) Depende de las condiciones de perímetro b) Presión en la superficie c) Comportamiento del material	a) Depende de las condiciones del perímetro b) Presión en la superficie c) Comportamiento del material d) Depende de la dirección y fuerza en la pretensión

Tabla 4 Métodos para la búsqueda de la forma física

3.7.1.1.1. Modelo de película de jabón

La búsqueda de la forma mediante el modelo de las películas de jabón se basa en el hecho de que la tensión superficial actúa como un minimizador físico de la superficie, dado que la energía superficial es proporcional a la superficie de la película.(Sen, 2015)

Dependiendo de la forma del soporte en que se fije la burbuja de jabón, la película adoptará la superficie mínima que la mantenga en equilibrio; en este sentido, para superficies planas, la película adoptara una forma plana, mientras que para superficie curvas adopta formas más complejas determinado la mínima superficie

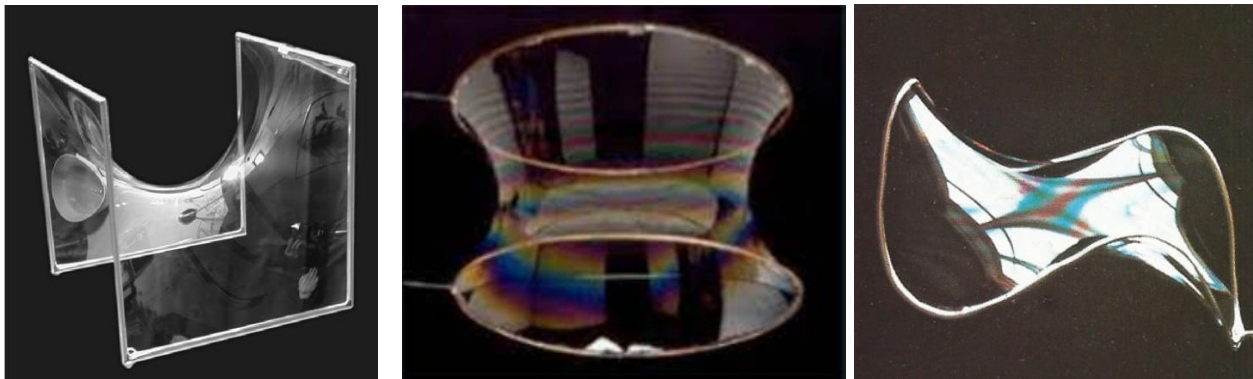


Imagen 2 Ejemplos de láminas de jabón sobre diferentes superficies

Fuente: <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/bubbles.html>

3.7.1.1.2. Búsqueda de la forma mediante modelos físicos.

Consiste en la elaboración de maquetas con elementos similares a los empleados en la construcción real, simulando la distribución de elementos de soporte, tensores y membranas para generar las superficies deseadas; es la forma más básica y primitiva empleada para la conceptualización de la forma de la tenso estructura.



Imagen 3 Modelo a escala de tenso estructura.

Fuente: (Morales-Guzmán, 2018)

3.7.1.2. Búsqueda de forma analítica de estructuras de membrana

El desarrollo informático permitió que hasta la década de los 70s la búsqueda de la formas mediante métodos físicos fueran los utilizados. La implementación de un modelo matemático debe ser lo más preciso posible; los métodos analíticos se basan en modelos matemáticos que pueden variar entre ellos, sin embargo, se pueden identificar las siguientes fases para la búsqueda de la forma en forma analítica.(Pronk, 2021)

Fase 1: Se debe realizar un estudio mediante modelos físicos para el diseño, iguales o similares a los métodos de la búsqueda física descritos anteriormente. La membrana puede verse como la discretización de una serie de cables, se establece un conjunto de parámetros que influyen en la geometría de la superficie de equilibrio, lo que indica que al variar estos parámetros, la forma final puede variar también, los cuales son:

- 1) Posiciones extremos, altos y bajos.
- 2) Radios de curvatura
- 3) Densidad de fuerza proporcionadas en los diferentes puntos de la superficie.
- 4) Orientación de la red.

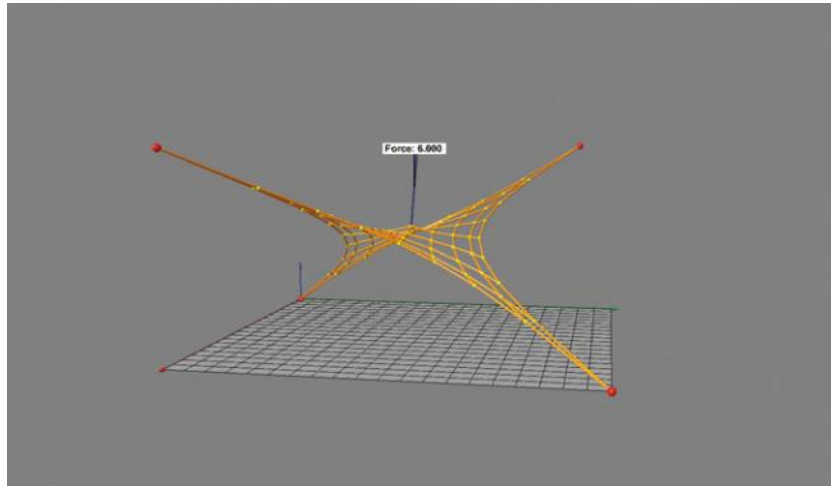


Figura 18 Discretización de la membrana como red de cables

Fuente:(Pronk, 2021)

En esta fase se establece la geometría en equilibrio de la superficie y fase es posible hacer análisis preliminares de carga y deformaciones.

Fase 2: La segunda fase consiste en la materialización de la superficie en equilibrio introduciendo las propiedades del material, análisis completo de casos de carga y contribución de esfuerzos.

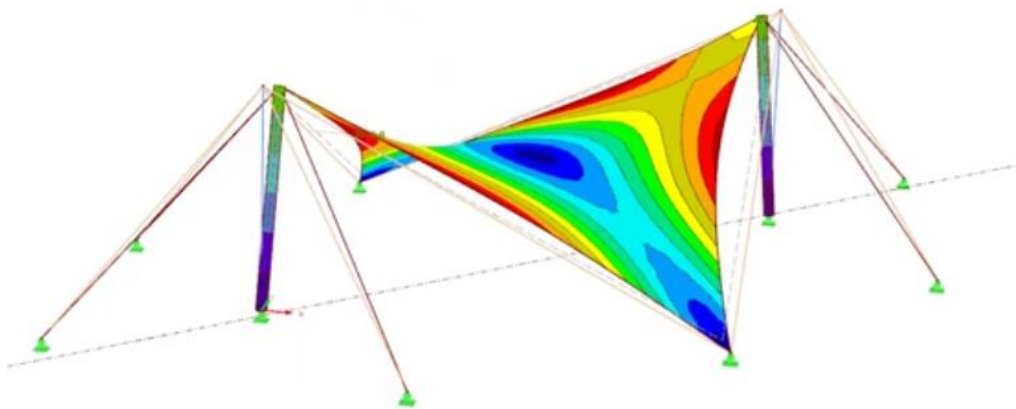


Figura 19 Modelo y análisis de membrana (esfuerzo deformaciones)

Fuente: <https://www.dlubal.com>

3.7.2. Materiales para las membranas

Las membranas utilizadas en las tenso estructuras son tejidos bidimensionales en dirección ortogonal en sentido de la urdimbre “*Warp*” y de la trama “*Fill*”, realizadas con filamentos de hilos muy resistentes como Poliamida, Poliester, Fibra de Vidrio, Aramida) el cual provee la resistencia a la tracción al material (Goldsmith, 2008). Este se recubre por ambos lados con un material de relleno que le otorga propiedades de resistencia adicionales a la membrana contra factores ambientales tales como protección a rayos UV, a gases o fluidos corrosivos, fuego entre otros.(Stranghöner et al., 2016) La tabla 5 resume los diferentes materiales de tejido o recubrimiento y sus características de protección.

Materiales de recubrimiento y tejido para membranas

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS
CLORURO DE POLIURETANO (PVC)	Bajo costo, Alta resistencia, fácil mantenimiento, mayor opacidad
POLITETRAFLUORETILENO (PTFE)	Resistente, durable, alto costo, no desmontable, alta resistencia a rayos UV.
FIBRA DE VIDRIO RECUBIERTA CON SILICONA (SiPE)	Traslucido, características similares al PTFE
ETILENO TETRAFLUOROETILENO (ETFE)	Transparente, baja resistencia,

Tabla 5 Materiales de recubrimiento y tejido para membranas

3.7.3. Propiedades mecánicas

El espesor final de una membrana estructural varía entre 0.5mm y 1.2mm, cuya densidad superficial oscila en rango de 500g/m² a 2000g/m²; un tejido actúa como una red de mini cables bidireccionales que en conjunto pueden desarrollar una resistencia a la tracción entre 100N/cm a 2000N/cm y una deformación entre 3% y 20% antes de colapsar (Goldsmith, 2008). Lo cual indica una buena resistencia y un material adecuado para estructuras livianas que trabajan a tensión.

Las propiedades y el comportamiento de una membrana estructural lo determinan el grosor del tejido y la resistencia a la tracción de las fibras utilizadas; es de suma importancia resaltar que la

resistencia a la tensión no es igual en ambas direcciones y tal como se observa en la norma ASCE 55-16, para el análisis se tendrá en cuenta las tensiones en las direcciones de la urdimbre “*Warp*” y de la trama “*Fill*” (Stranghöner et al., 2016).

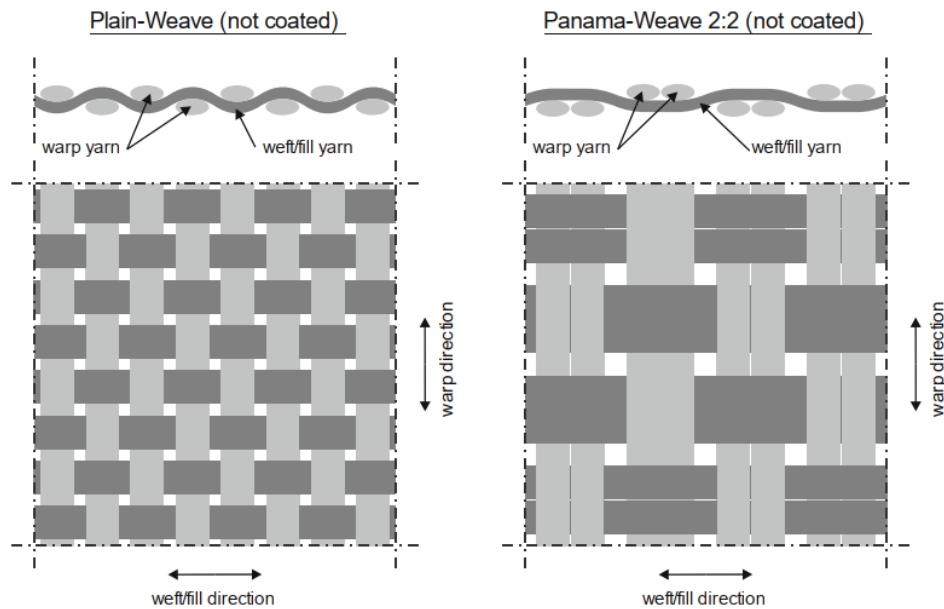


Figura 20 Tejido de membrana sin recubrimiento

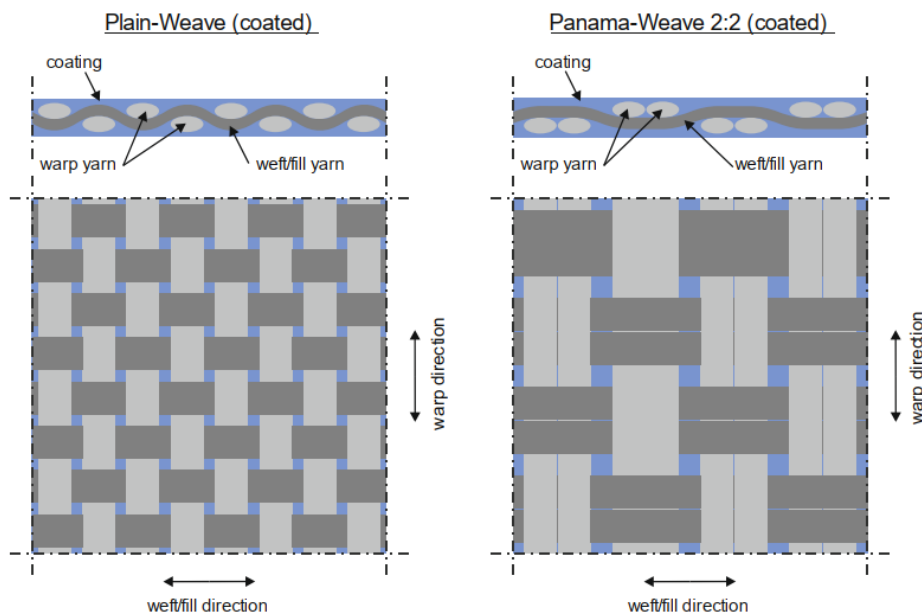


Figura 21 Tejido de membrana con recubrimiento.

Se tiene entonces dos tipos de membranas, recubiertas y no recubiertas (ver figuras 20 y 21); es posible generar varias combinaciones de tejido y recubrimiento para obtener diferentes materiales para membranas, en la actualidad hay dos grupos que gobiernan el uso de las membranas estructurales, las cuales son: Tipo 1: membranas de tejido de Polyester recubierto con PVC y Tipo 2: membranas de tejido de fibra de vidrio y recubrimiento en PTFE.(Goldsmith, 2008). Para el desarrollo del caso práctico, se empleará una membrana tipo 1.

3.7.4. Membranas de tejido Polyester y recubrimiento con PVC

Previene la adherencia de suciedad y aumenta la vida útil, son más económicas en comparación de otras opciones y muy flexible alcanzando una elongación entre 10% y 20% previo a la rotura, cómoda manipulación y una expectativa de vida útil de 20 años.

Este material tiene un punto de fusión entre los 300°C y su autoextinción en los 500°C aproximadamente, este material es sensible a los rayos UV el cual es el factor principal para la disminución de su vida útil (Goldsmith, 2008) sin embargo, el PVC es un material resistente sulfuros, amoníaco y diferentes agentes contaminantes que lo hacen adecuado para aplicaciones sanitarias.

3.8. Consideraciones constructivas

3.8.1. Resistencia y rigidez del tejido.

El comportamiento mecánico del tejido está ligado a la disposición de los hilos de la urdimbre y la trama, por lo tanto, se debe tener en especial consideración la distribución de esfuerzos de la tenso estructura para detallar adecuadamente la forma de ensamblar las tiras de la membrana.

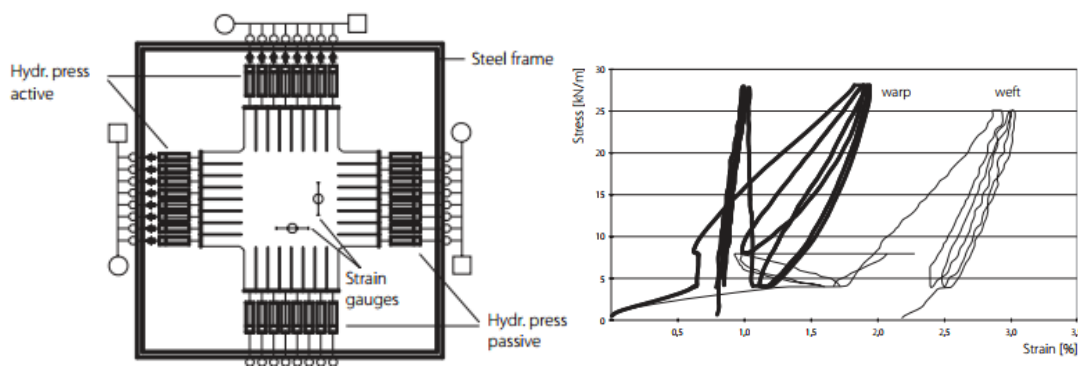


Figura 22 Ensayo a tensión biaxial y curva isterésica

Para tal propósito se realizan ensayos biaxiales que determinan los perfiles de esfuerzo admisible para cada una de las direcciones de carga.

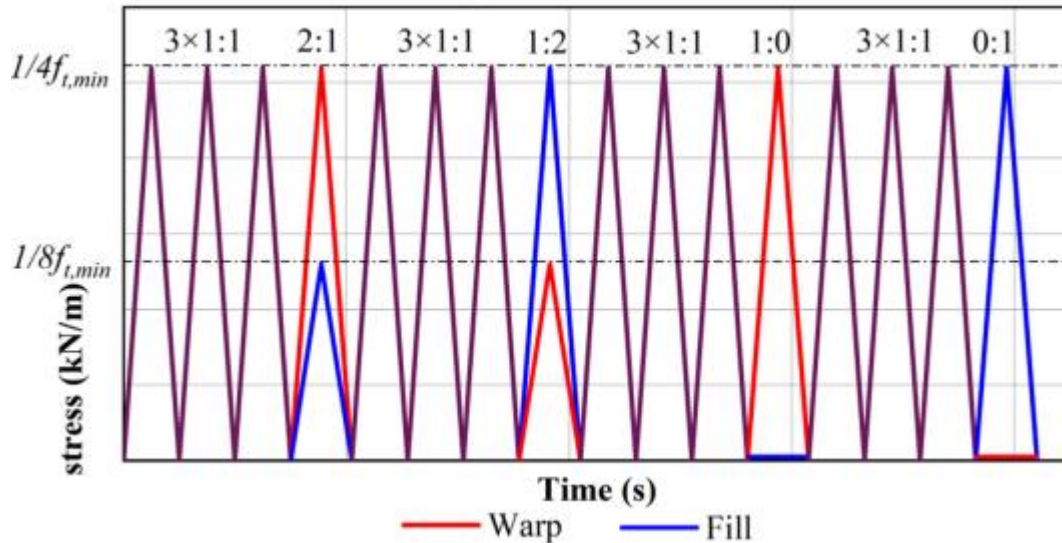


Figura 23 Perfil de carga para ensayo biaxial

3.8.2. Resistencia a esfuerzos cortantes

Si los esfuerzos principales no actúan directamente sobre la tela sino a través de los elementos de borde, esta debe permitir deformaciones correspondientes a distorsiones por cizallamiento entre los hilos de la urdimbre y la trama.

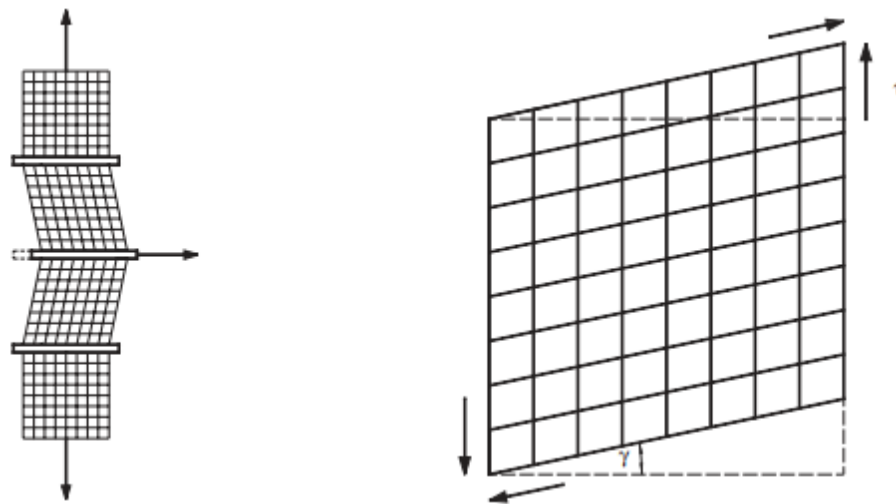


Figura 24 Cizallamiento en las fibras del tejido.

3.8.3. Fabricación de membrana

La construcción de membrana como elementos de apoyo y transferencia de cargas requieren que se generen tiras cortas y conectadas entre sí para la conformación de la geometría diseñada, la configuración de las láminas para que una vez ensambladas generen la forma equilibrada de la membrana se llama patronaje. Debido a la naturaleza curva de las superficies, los patrones no se pueden determinar mediante geometría plana, sino con geometría elíptica.

La forma final no puede contener pliegues o muy pocos, teniendo en cuenta que la forma también depende del material, hay dos maneras diferentes de proyectar en un plano (Seidel, 2009).

- 1) Proyectando la longitud real sobre una lámina (figura 25)
- 2) Proyectando los ángulos reales sobre las láminas (figura 26)

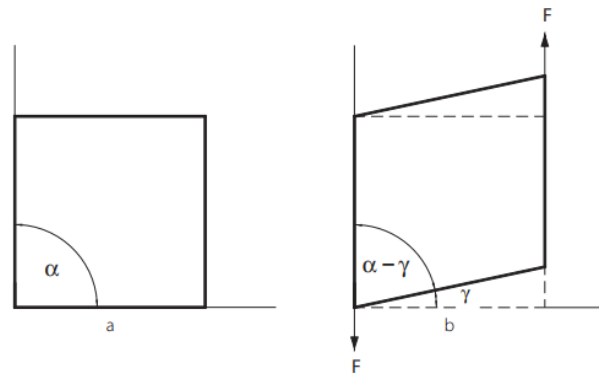


Figura 25 Proyección del plano mediante la longitud real sobre una lámina

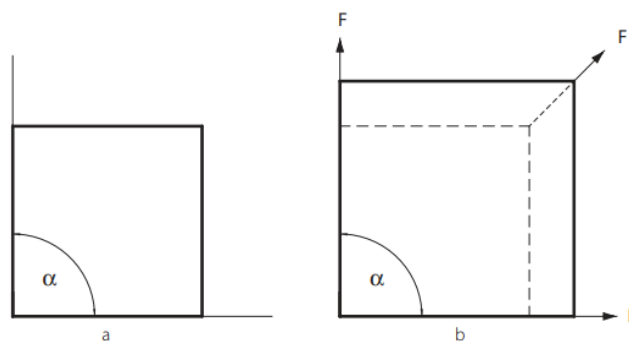


Figura 26 Proyección del plano mediante el ángulo real sobre una lámina

Para láminas isotrópicas la proyección del ángulo real provoca una tensión no homogénea en el material, por lo tanto cada punto en la superficie posee un estado de esfuerzos diferente; la capacidad de estiramiento de cada material también influye en la capacidad de generar curvas, por lo tanto es importante contar con el valor de esta propiedad para cada material ya que dependiendo del material puede generar ángulos distintos; es importante recalcar que el ancho de cada patrón de corte también se ve limitado por el ancho disponible de la tela por lo que en la búsqueda de la forma de los patrones se debe considerar los anchos máximos de despiece. (Seidel, 2009)

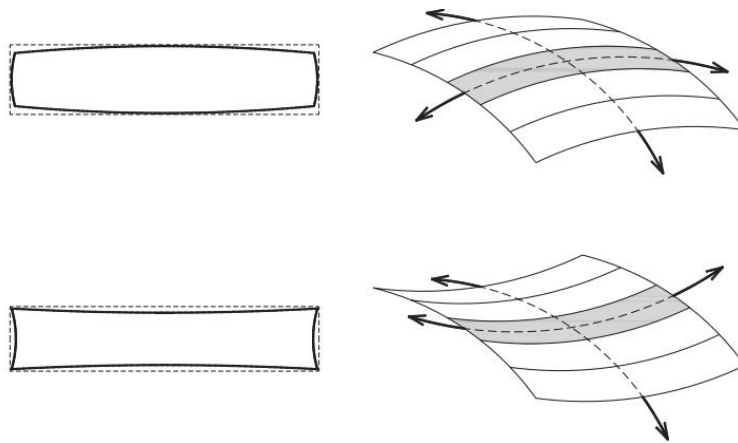


Figura 27 Proyección de láminas para superficie cinclástica y anticlásticas.

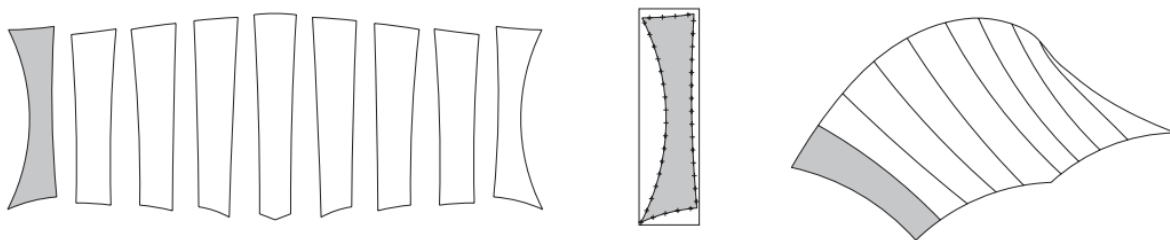


Figura 28 Proyección de tiras para la forma de una superficie irregular.

3.8.3.1. Patronaje:

El patronaje es la elaboración de las plantillas de corte para la confección de la membrana; el patronaje de membranas tensadas se enfrenta a la paradoja de convertir una superficie tridimensional en una superficie plana. Johann Carl Friedrich Gauss (1877-1855, Alemania) sentó las bases de lo que se conoce como la geometría elíptica, necesaria para la solución de problema de superficies de doble curvatura; la eficiencia estructural de una membrana estructural depende de la adecuada concepción de la geometría de doble curvatura(Marroquín, 2012)

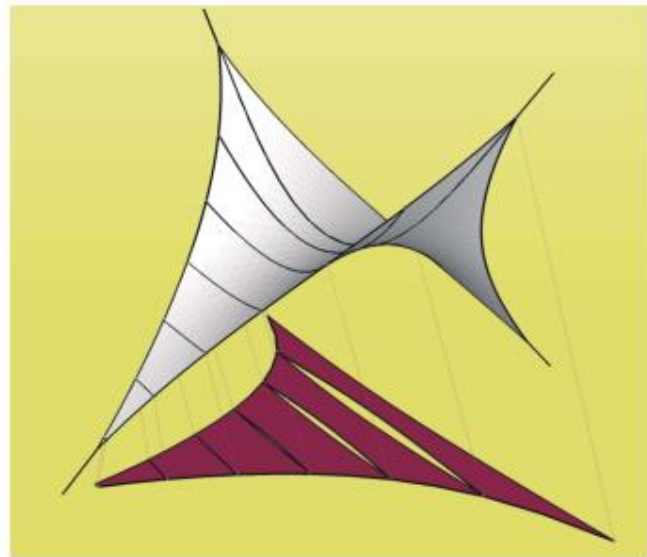
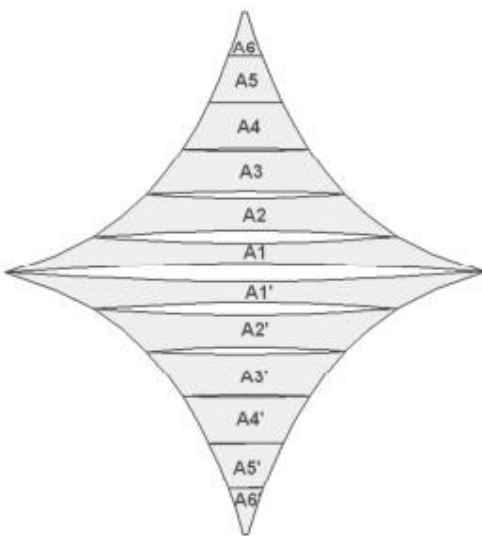


Figura 29 Patrones de corte para la conformación de una tenso estructura tipo cometa

Fuente:(Marroquín, 2012)

Gracias al desarrollo tecnológico, hoy en día los patrones se generan en softwares especializados que nos permiten generar los patrones automáticamente y con la ayuda de máquinas automáticas de corte aceleran el proceso de fabricación y optimización de materiales y recursos. (Marroquín, 2012)

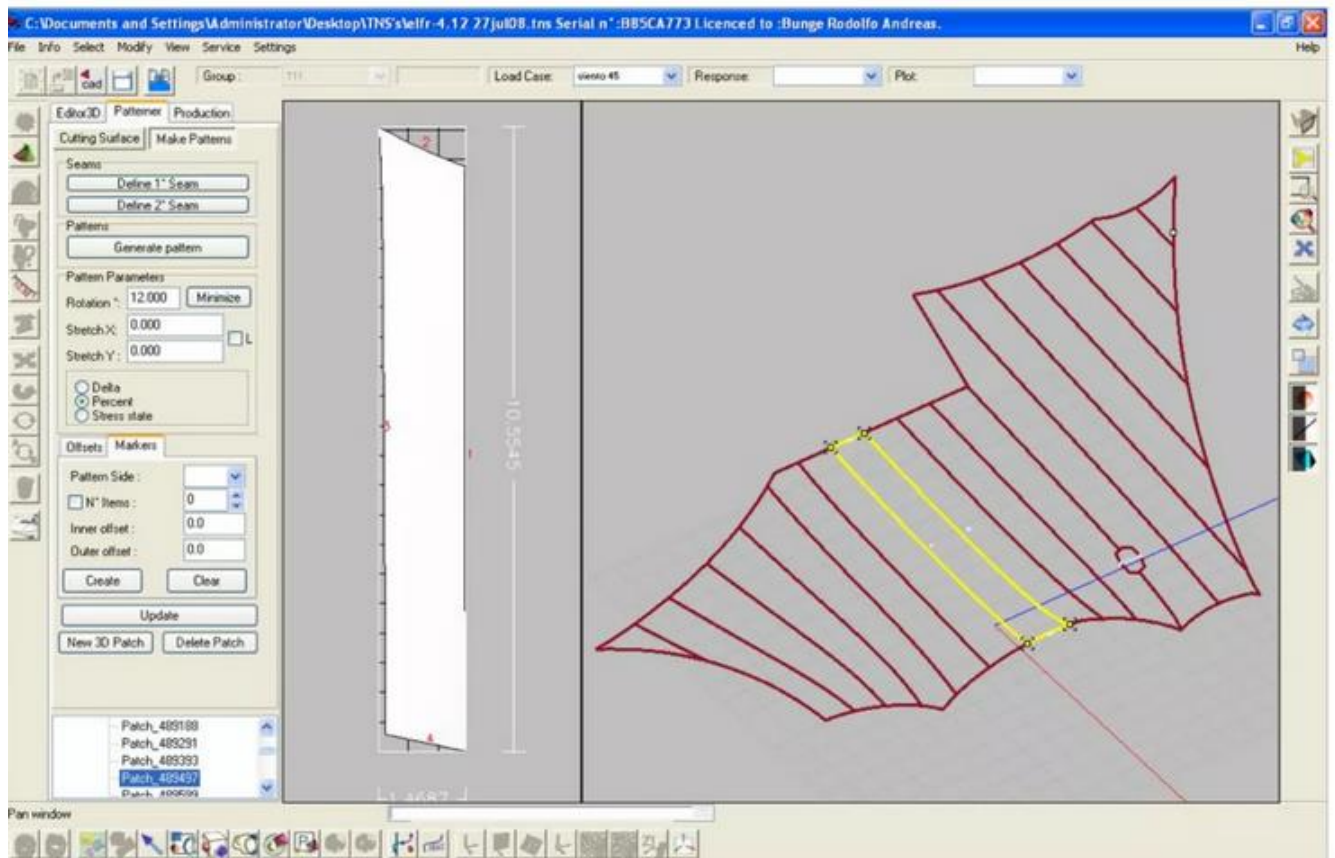


Figura 30 Generación de patrones de corte mediante el uso de software.

Fuente: <http://www.grupotensotec.com/>

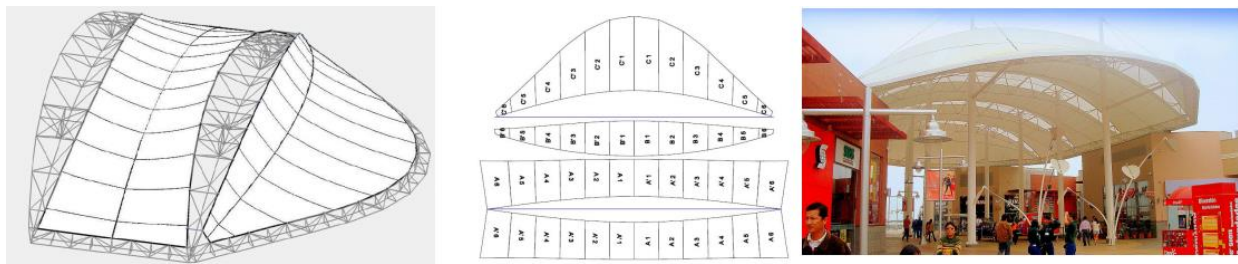


Figura 31 Proceso resumido de diseño, patronaje y ensamblaje.

Fuente: (Marroquín, 2012)

3.8.4. Ensamble de superficies

Las tiras se ensamblan para formar paneles que deben transmitir los esfuerzos de tensión sin que se desgaren; hay dos clases de uniones 1) Temporal, 2) permanentes. Las juntas temporales se realizan en la construcción de la estructura y se logran a través de placas de sujeción, juntas de riel, juntas en bucle, y entrelazadas, mientras que las juntas permanentes las provee el fabricante y se logran a través de costuras (soldadas, cosidas, combinadas).

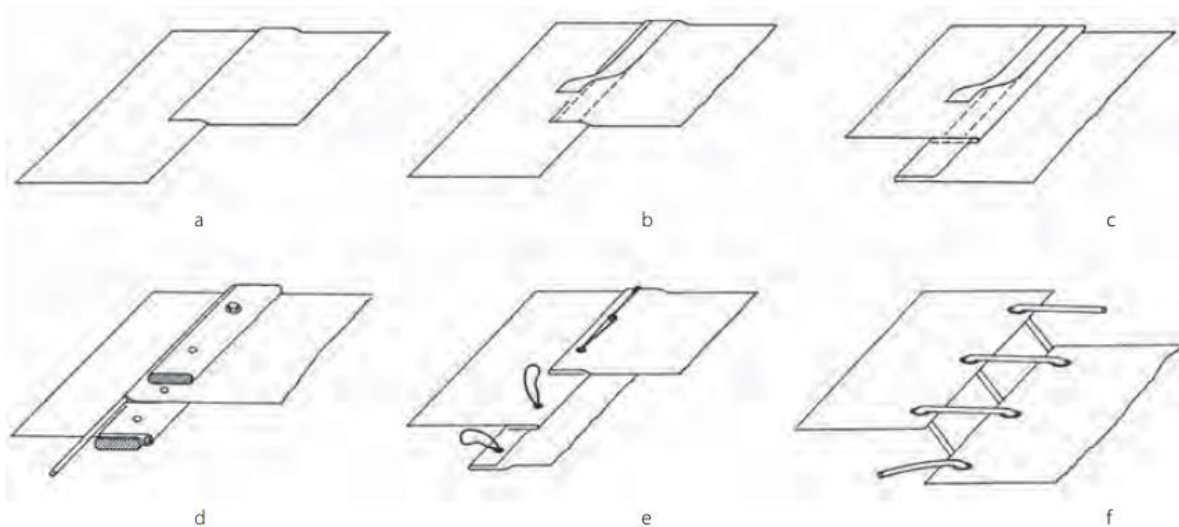


Figura 32 Detalle de conexiones entre membranas

- a) costura soldada superpuesta
- b) costura cosida
- c) costura cosida superpuesta
- d) junta de la placa de sujeción
- e) junta en bucle
- f) unión entrelazada.

Las costuras cosidas se pueden realizar de diferentes formas dependiendo de la magnitud de la transferencia de esfuerzos.



Figura 33 Detalle de costura en conexiones entre membranas

Las uniones temporales se realizan a través de componentes mecánicos y principalmente metálicos con mecanismos de ensamblaje simple que facilitan su montaje.

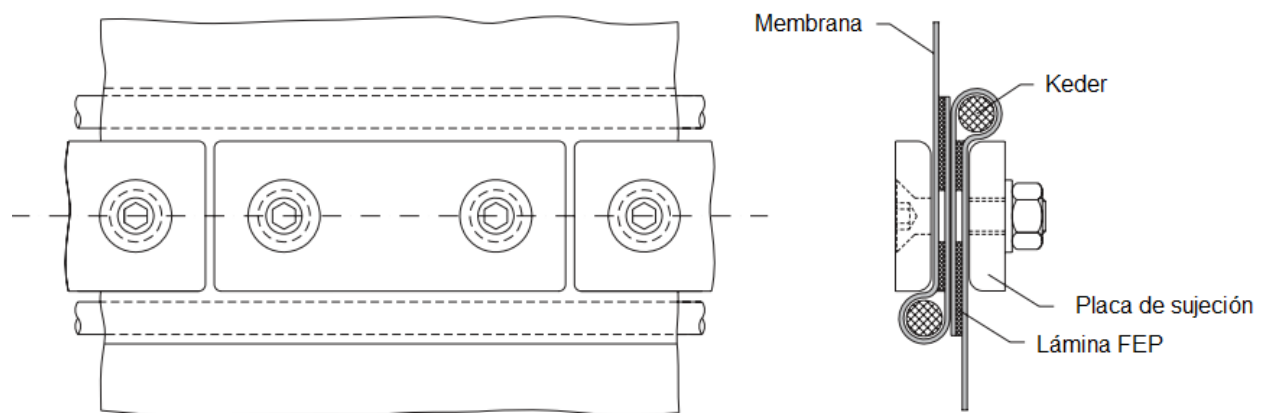
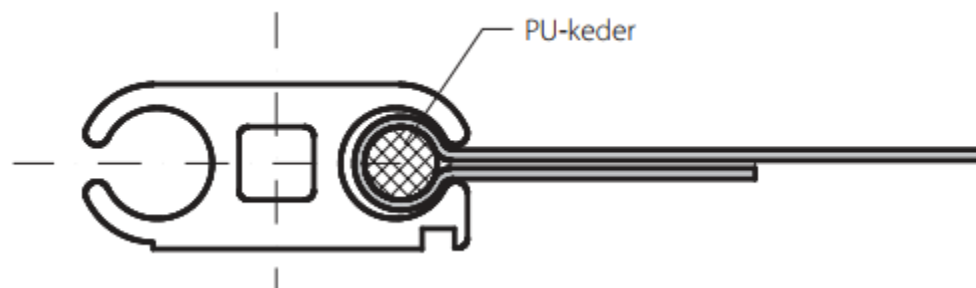


Figura 34 Detalle de conexión de membrana mediante conextores mecánicos.



3.8.5. Resistencia y rigidez en las costuras de membranas

Los empalmes son los lugares más vulnerables de los elementos tensionados, por lo que existen diferentes métodos y formas de ensamblaje que se deben tener en cuenta para una buena disposición de las tiras conectadas.

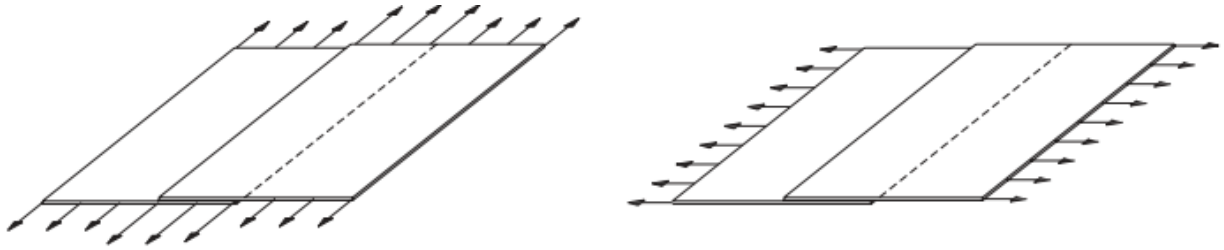


Figura 35 Disposición de la costura con respecto a la dirección de las fuerzas de tensión

Una disposición paralela entre el esfuerzo y la costura aumenta la rigidez de la membrana en este tramo debido a la mayor presencia de material (izquierda) ; si la carga se aplica de forma transversal (derecha) hay una pérdida de resistencia con respecto a la costura del 25%, y la costura podría inclinarse de forma crítica aumentando el riesgo de falla, además, de distorcionar la figura de la membrana.



Figura 36 Inclinación de la costura debido a esfuerzos transversales

Para evitar condiciones de tensión desfavorables, en la medida de lo posible las costuras deben ser paralelas en la dirección de las fuerzas de tensión. También se debe considerar la contracción en el sentido longitudinal de la costura, por lo que durante el proceso de costura, se deben pretensar las láminas patronadas.

Es posible definir diferentes patrones de costura para evitar exceso de esfuerzos en una sola dirección y generar líneas de falla

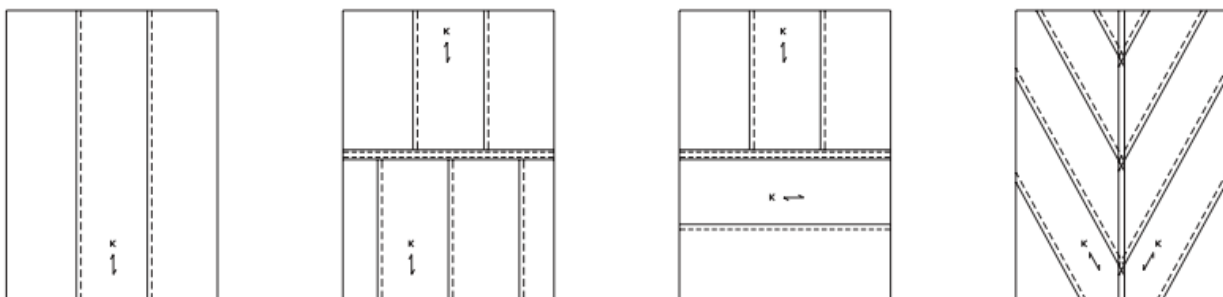


Figura 37 Patrones de unión de láminas.

Al igual que en los tejidos, las costuras también se someten a ensayos de tracción para evaluar sus límites de falla.



Figura 38 Ensayos de tracción en las costuras

3.8.6. Anclaje y transferencia de cargas

La membrana debe transferir la carga a la estructura de soporte (cuerda, puntales vigas, mástiles o directamente a la fundación) para ello se debe generar elementos de conexión que permitan una adecuada transferencia sin generar distorsiones a la forma de la membrana y aportando a la estabilidad global de la estructura.

Las conexiones se pueden hacer a través de cables o de cinchas; las cinchas son tejidos de polyester o metálicas muy resistentes utilizados en muchos campos para realizar transferencias de cargas a tensión. Para instalar estos elementos se generan unas cavidades en los extremos de la membrana por donde se introducen los cables o cinchas que se unirán a los elementos estructurales.

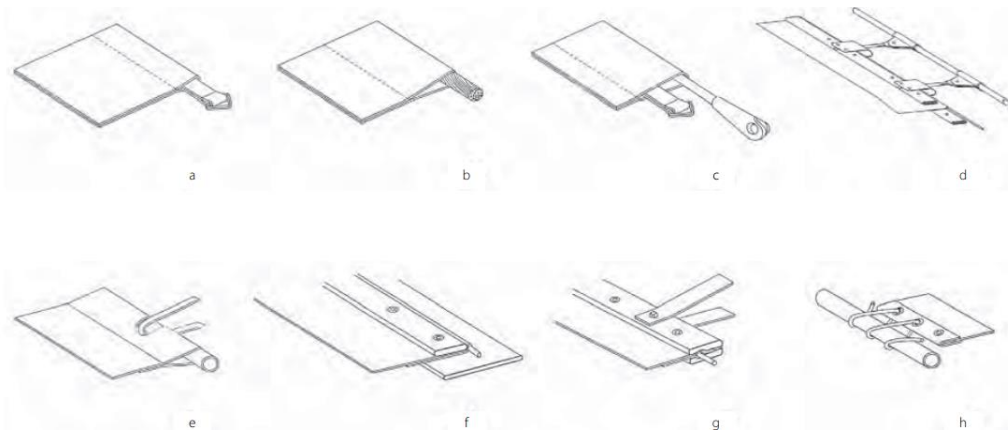


Figura 39 Detalles de acoples entre membranas y cables.

Extremos flexibles

- a) borde de la cincha
- b) borde de la cuerda
- c) borde de cuerda con cincha
- d) placa de sujeción colgada de la cuerda

Extremos rígidos

- e) borde del tubo
- f) borde de la placa de sujeción
- g) borde de la placa de sujeción con soportes a la viga de borde rígido
- h) borde tubular con cordones

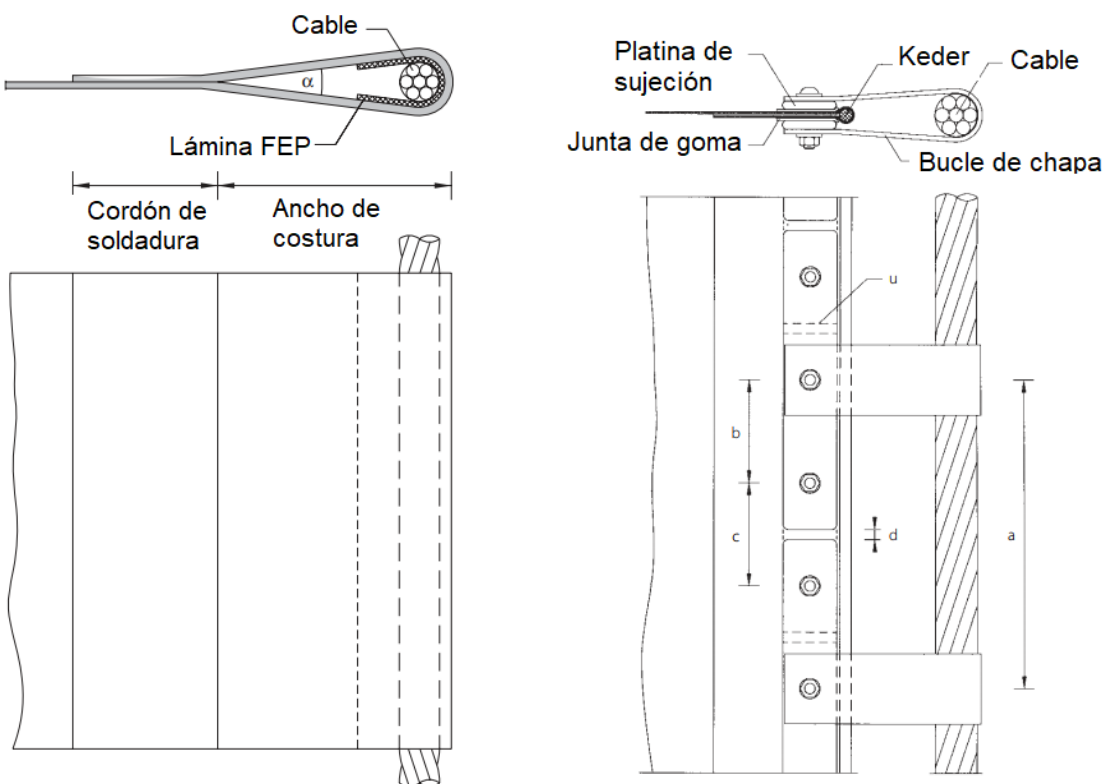


Figura 40 Conexiones entre membranas y cables

3.8.7. Pre estiramiento:

Previo a la instalación de las cuerdas, éstas se deben someter a un proceso de estiramiento para llevar a las fibras a su disposición óptima para el tensado, este proceso se realiza en plantas de estiramiento donde el cable se somete a cargas de tensión en forma dinámica, dependiendo de del tamaño de la cuerda y su diámetro, estas se pueden someter a fuerzas de 6000 KN. Este proceso se hace para evitar deformaciones indeseadas en el momento de la construcción de la tenso estructura.

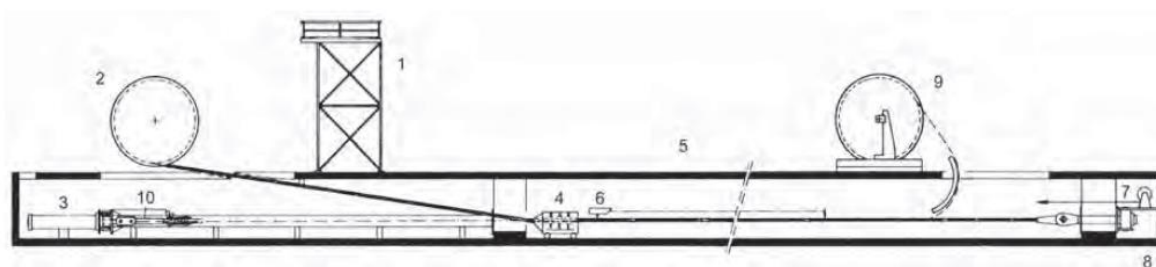


Figura 41 Planta de estiramiento de cables

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Torre para compuesto de relleno | 5. Equipos de estiramiento |
| 2. Carrete, caballete de desenrollado | 6. Equipo de medición de longitud |
| 3. Cilindro tensor | 7. Cabrestante |
| 4. Carro de sujeción | 8. Cojinete de empuje del cable |
| | 9. Carrete, caballete de bobinado |

3.8.8. Protección anticorrosión:

Los cables sometidos a grandes tensiones son muy sensibles a los daños como muescas y pérdida de material por corrosión; por lo que es indispensable hacer una evaluación a las condiciones a las que estará sometido el elemento para planificar su adecuado recubrimiento; Existen diferentes métodos de protección anticorrosiva que consisten en:

- Protección de cables individuales: Consiste en el recubrimiento individual de cada una de las hebras del cable, dentro de los recubrimientos más usados son el galvanizado, el cual es un proceso electroquímico que consiste en cubrir un metal con otro metal; el más común es el recubrimiento con zinc sobre hierro, otra opción de galvanizado es mediante el

recubrimiento de la aleación zinc(95%) y Aluminio (5%), este material ofrece mejores propiedades debido a su alta adherencia y flexibilidad.

- Protección interna: Se puede prever la pérdida de la capa de protección galvanizada de los cables debido a la fricción entre hebras; mediante el relleno de los vacíos entre ellos se reduce la fricción interna y se protege al cable de la presencia de humedad que acelere el proceso de corrosión; esta protección se logra mediante la aplicación de lubricante a base de aceite sintético y polvo de zinc.



Imagen 4 Inyección de lubricante

- Recubrimiento exterior: se aplica cuando se corre el riesgo de sufrir alguna afectación grave durante el montaje de la estructura, se aplica pintura plástica sobre el elemento a proteger.
- Protección en los detalles de diseño: se debe poner especial atención en los accesorios de conexión y empalmes.

Las membranas deben contar con protección anticorrosión dependiendo de su uso o aplicación, las membranas con tejido de poliéster y recubrimiento en PVC son las más utilizadas y

presentan un alto grado de protección a la corrosión, sin embargo, poseen poca resistencia a los rayos UV.

El proceso de recubrimiento consiste en pasar el rollo de tejido de poliéster a través de PVC fundido e inmediatamente mediante un proceso de termofusión adherirlo permanentemente a las fibras del tejido,

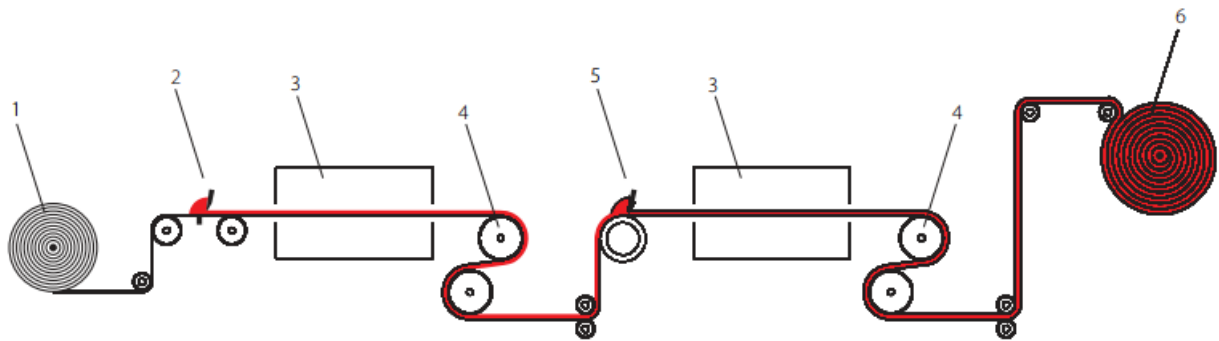


Figura 42 Proceso de recubrimiento mediante cuchillo de aire

- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. Tela cruda | 4. Rodillos de enfriamiento |
| 2. Cuchillo de aire | 5. Cuchillo de rodillo |
| 3. Túnel de fusión | 6. Tejido revestido. |



Imagen 5 Inyección de recubrimiento sobre tejido

3.8.9. Conexiones en las esquinas

Estas se emplean para las conexiones puntuales en las esquinas de las membranas, allí los extremos portantes están anclados a través de accesorios metálicos permitiendo algún movimiento relativo, las esquinas en una membrana estructural por lo general están sometidas a sobre esfuerzos y son susceptibles a la formación de pliegues.

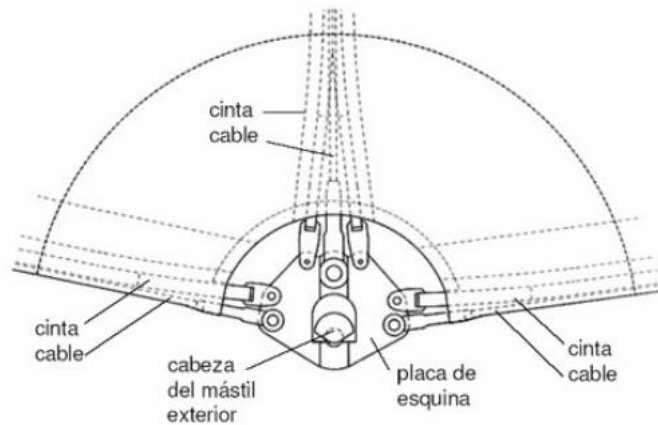
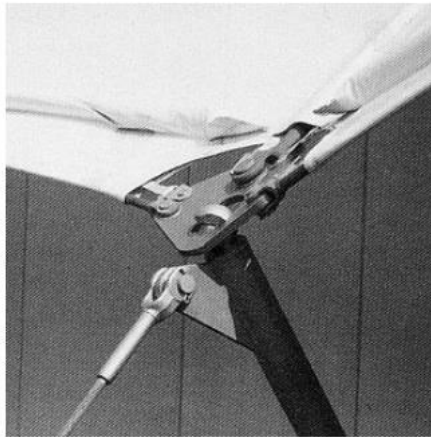


Figura 43 Detalles de conexión en las esquinas (Abierto)

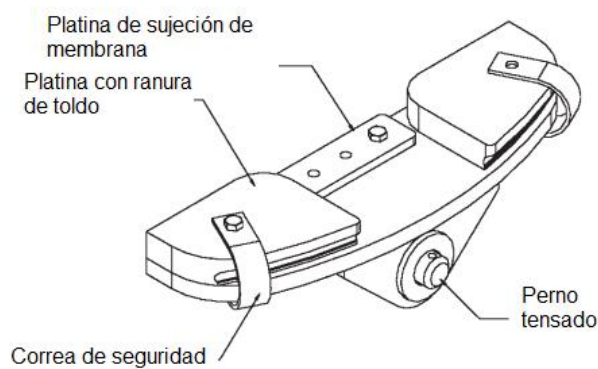


Figura 44 Detalle de conexión en las esquinas (Cerrado)

3.8.10. Proceso constructivo

Ya habiendo superado la etapa de diseño, la etapa más importante para la materialización de la tenso estructura es su etapa constructiva. El proceso constructivo consiste básicamente en ensamblar componentes ya prefabricados por lo que la logística de despacho y recibo de materiales debe estar bien sincronizada, Un programa bien establecido puede llevar a una construcción muy ágil.



Imagen 6 Trabajador suspendido durante la instalación de una membrana para cubierta

La construcción de tenso estructuras la cuales constan de láminas (membranas) y cuerdas flexibles, difiere mucho de la construcción de una edificación convencional, su proceso constructivo se acerca más al empleado en estructura metálica que a las de hormigón o mampostería.

Es común modelar el proceso constructivo que permita visualizar los procesos de alzado, colgado, soportes temporales entre otras actividades, otra alternativa es emplear modelos a escala que permitan previsualizar las posibles complicaciones o consideraciones particulares de la estructura para su armado. A diferencia de las estructuras convencionales, la configuración arquitectónica de las tenso estructuras puede llevar a métodos constructivos únicos y sin precedentes para una estructura en particular.

Los detalles constructivos son muy importantes a la hora de reducir costos si se tienen en cuenta aspectos como practicidad, facilidad de ensamblaje, estas deben optimizarse para disminuir peso, aumentar la precisión y desarrollo de tolerancias, se debe tener en cuenta la facilidad de elevación con los equipos disponibles.

3.8.10.1. Equipos y maquinaria

Los elementos lineales y de superficie utilizados en la construcción de membranas tensadas pueden tener dimensiones y pesos considerables, y deben ser levantados e instalados en grandes alturas. Para estos movimientos verticales y horizontales se debe emplear grúas y equipos de transporte vertical. Se puede requerir el uso de elementos y equipos temporales como andamios, vientos o puntales mientras se logra la estabilidad en conjunto de la estructura.



Imagen 7 Grúa empleada como elemento estabilizador temporal

Fuente:<http://lonasmq.com.mx/portfolio/tenso-estructura-arquitectura-textil-mexico/#lg=1&slide=5>

3.8.10.2. Equipos de tensionamiento

Se debe usar los equipos apropiados para la aplicación de fuerza en los elementos de borde y tensión y sujeción de cuerdas y membranas, en el mercado se conocen como: “*dispositivos de elevación cargados en tensión*”, estos equipos pueden ser accionados de forma eléctrica, hidráulica o mecánica.



Imagen 8 Dinamómetro manual digital y winche eléctrico para tensionamiento y tendido de cables.

3.8.10.3. Plataformas de trabajo

Es habitual el uso de plataformas de trabajo para acceder a alturas hasta de 35m, estos son dispositivos especializados montados sobre un chasis de camión, también se puede implementar plataformas de trabajo colgadas en la estructura de soporte. La elección de la plataforma adecuada depende de las condiciones de acceso, de la altura y ergonomía.



Imagen 9 Plataformas de trabajo para actividades en altura.

3.8.10.4. Obras falsas o elementos estabilizadores:

Los elementos estructurales flexibles no son estables previo a su tensionamiento, existen estructuras en las que los elementos rígidos y flexibles se estabilizan entre sí, por eso, es necesario el uso de elementos estabilizadores durante el proceso constructivo. Estos elementos estructurales se pueden estabilizar temporalmente con uso de cables, puntales o máquinas que las anclen temporalmente mientras se logra su autoaporte.



Imagen 10 Tensores temporales

3.8.10.5. Preparación y preensamble

A la unión y terminación de elementos individuales de grandes unidades de construcción se le llama premontaje, antes de realizar este premontaje se debe realizar unas actividades de preparación

La preparación de las cuerdas incluye actividades como descarga y almacenamiento, desenrollado y disposición de las cuerdas, la fabricación de redes de cuerdas y empaquetamiento de éstas, el ensamble o conexión entre cuerdas adyacentes.



Imagen 11 Bobina y desenrollado de cables

Para las membranas hay que realizar actividades como la preparación de las juntas de las membranas, bordes, esquinas y traslajos. La membrana debe descargarse y almacenarse. El método de instalación exigirá un desenrollado y disposición adecuado; el viento es un factor muy importante a tenerse en cuenta ya que las membranas son elementos livianos por unidad de área y en grandes extensiones el viento afecta considerablemente la manipulación de éstas, dependiendo de la configuración y plan de montaje, la estructura primaria debe estar terminada para el despliegue e instalación de la membrana.



Imagen 12 Despliegue de membrana en etapa de remontaje

3.8.10.6. Trabajo en altura:

El personal idóneo para la construcción de estas estructuras debe contar con su adecuado entrenamiento para el trabajo en alturas, ya que gran parte del tiempo trabajarán suspendidos o en condiciones de alto riesgo debido a corrientes de aire, efecto paracaídas en la membrana y el peso de los elementos que deben manipular.



Imagen 13 Trabajo en altura durante la instalación de cubierta



Imagen 14 Despliegue en altura y transporte vertical de membranas.

3.8.10.7. Factores de riesgo

Sin duda, el mayor factor de riesgo de las tenso estructuras es el viento, al ser estructuras flexibles, de poca rigidez y muy livianas con relación a su volumen, tienden a ser muy susceptibles al viento. Las membranas son fuertemente afectadas por impactos un golpe pequeño puede desencadenar la rasgadura de un módulo completo de la membrana.(Junhao Xu, 2021)



Imagen 15 Daño por viento en la cubierta del estadio único en Argentina.

Fuente: <https://www.eldia.com/nota/2019-11-30-2-54-5-volaron-techos-y-la-cubierta-del-estadio-unico-volvio-a-sufrir-roturas-la-ciudad>



Imagen 16 Daño por viento en la cubierta del estadio London O2 Arena-Londres

Fuente: <https://www.standard.co.uk/news/london/o2-arena-storm-eunice-ripped-open-b983322.html>

3.9. Consideraciones normativas

El diseño estructural está regulado por una serie de códigos y estándares que velan por la integridad de la estructuras y la seguridad de quien las ocupan; en Colombia el diseño estructural se rige principalmente por la ley 400 de 1997 a través del código de diseño NSR-10, el cual es un compendio de estándares en los que se dictan los requerimientos mínimos para el diseño de estructuras sismorresistentes en el país; la norma NSR-10 cubre un espectro de estructuras típicas y las clasifica de acuerdo a sus sistema estructural y material, siendo estos sistemas porticados, muros, dual o combinados y teniendo en cuenta materiales como concreto reforzado, acero, mampostería o madera. Para todas las otras estructuras que no clasifiquen dentro de estas que cubre la norma, estas son consideradas estructuras especiales (NSR-10 A-1.2.4) (Comisión Asesora Permanente Para el Régimen de Construcción Sismo Resistente, 2010).

Cuando se requiere diseñar estructuras especiales, lo recomendable es guiarse por métodos reconocidos que garanticen una buena práctica en la metodología de cálculo, análisis y construcción; teniendo en cuenta que la estructura que se diseña en este documento está dentro de la categoría de las estructuras especiales, el análisis y diseño de los elementos que comprenden esta estructura se basará en los códigos ASCE 55-16 para el análisis y diseño de estructuras tensadas y ASCE 19-16 Aplicaciones de cables de acero para edificaciones.

El código ASCE 55-16 provee los criterios mínimos para el análisis, diseño y comportamiento de los sistemas cubiertas en membrana, cable elementos rígidos de la estructura para edificaciones permanentes y temporales. (ASCE, 2016a)

El capítulo 1 describe el alcance de este código y la definición de los elementos principales en tenso estructuras.

El capítulo 2 está dedicado a la descripción de los materiales empleados para las membranas estructurales y los ensayos necesarios para garantizar la calidad.

El capítulo 3 describe los tipos de conexiones posibles en las membranas.

el capítulo 4 introduce los conceptos básicos para el análisis y diseño de una membrana estructural, así como las combinaciones de carga aplicables.

El capítulo 5 ofrece una serie de consideraciones a la hora de fabricar e instalar la estructura tales como detalles, tolerancias entre otras.

El capítulo 6 explica las consideraciones especiales para las estructuras con incorporación de aire.

El código incorpora una serie de anexos y comentarios que amplían la información descrita en cada uno de los capítulos.

El código ASCE 19-16 especifica los criterios a tener en cuenta en el diseño, fabricación e instalación de cables usados en elementos estructurales de soporte para estructura no sujetas a cargas vehiculares. Este código aplica a elementos de la estructura tales como: Cubiertas, Pisos, muros cortina, mástiles, y redes (ASCE, 2016b).

El capítulo 1 presenta un glosario de los términos empleados notaciones y símbolos.

El capítulo 2 describe los requerimientos contractuales en términos de especificaciones y dibujos en planos.

El capítulo 3 describe las consideraciones de diseño, análisis de cargas y combinaciones y el comportamiento de los cables.

El capítulo 4 indica las normas que se tienen que considerar en los materiales.

El capítulo 5 expone las consideraciones para el montaje cuando se usa diferentes materiales.

El capítulo 6 trata sobre los recubrimientos y sus consideraciones.

El capítulo 7 habla sobre las consideraciones en el momento de fabricación, embalaje y recepción de los productos.

El capítulo 8 explica las consideraciones en el momento de instalar las estructuras.

El capítulo 9 expresa las consideraciones para el mantenimiento de la estructura una vez instalada.

Además de éstos, el código cuenta con diferentes anexos que complementan la información descrita sobre detalles constructivos de los diferentes elementos con sujeciones, sillas, abrazaderas, fatiga, diámetros requeridos para la resistencia sísmica y comentarios complementarios.

En este documento se expondrán las consideraciones concernientes al análisis y diseño que sean pertinentes para el caso ejemplo de diseño para los dos códigos.

3.9.1. ASCE 55-16 estructuras de membrana tensadas

El código ASCE 55-16 es la norma americana para la estandarización del diseño y construcción de estructuras tensadas, a continuación se describen algunas de las consideraciones que expresa este código relevante para este documento.

Este código provee los criterios mínimos para el análisis, diseño, y comportamiento de las cubiertas en membranas, cables y elementos rígidos e incluyendo estructuras soportadas en marcos y estructuras aéreas conocidas como estructuras de membrana tensada (Tensile Membrane Structures, en inglés).

Este código se aplica sobre estructuras temporales con un área mayor a 93m^2 , o una membrana mayor a 3m , y estructuras permanentes con un área mayor a 21m^2 . Este código no es aplicado a estructuras neumáticas o infladas por aire.(ASCE, 2016a)

El código ASCE 55-16 puede ser usado en lugares donde no existe una normativa definida para este tipo de estructuras, en el caso colombiano, las NSR-10 no cubre este tipo de estructuras, por lo tanto, es adecuado para su aplicación en Colombia.

3.9.1.1. Requerimiento para los materiales de las membranas

Los materiales en las membranas estructuras deberán cumplir y ser probados de acuerdo a las disposiciones de este código.

Los ensayos del comportamiento de las membranas deberán realizarse por entidades idóneas en el análisis de membranas, los ensayos de calidad para las membranas se deben realizar cada 900m², se debe contar con ensayo uniaxiales y biaxiales.

3.9.1.2. Clasificación de membranas:

Tipo 1: Las membranas no combustibles deben cumplir con la definición de materiales de construcción no combustibles según lo establecido por la autoridad competente, también deben cumplir con los requisitos y deben alcanzar un índice de dispersión no superior a 25 y un índice de desarrollo de humo no superior a 50 cuando se prueban de acuerdo con ASTM E84.

Tipo 2: Las membranas de combustible limitado deberán cumplir con los requisitos de NFPA 701, además, deberán alcanzar un índice de dispersión de llama no superior a 25 y un índice de desarrollo de humo no superior a 450 cuando se prueben de acuerdo con ASTM E84.

Tipo 3: las membranas combustibles son aquellas que no requieren cumplir con ninguno de los requerimientos expuestos anteriormente.

3.9.1.3. Cables y refuerzo

Cuando se requiere refuerzo en la membrana o el recubrimiento de la membrana, el cual consiste en materiales metálicos o no metálicos, cada material debe ser de calidad uniforme, y deberá poseer propiedades de acuerdo a su uso.

- El refuerzo de los cables metálicos debe ser determinado de acuerdo a ASCE 19.
- El refuerzo y sus características de fuego de los cables no metálicos y elementos de redes deben ser determinados de acuerdo a los estándares de calidad de cada uno de los materiales.

3.9.1.4. Conexiones

Las conexiones deberán ser diseñadas para transferir todas las cargas aplicadas y las fuerzas internas y momentos requeridos para el análisis; así como para mantener la estabilidad de la estructura.

Los efectos de fluencia de la membrana a la exposición ambiental, excentricidades, cargas dinámicas, fatiga y los movimientos causados por la deflexión y rotación de la estructura deberán estar cuantificados.

Deberá proveerse de protección contra la corrosión y degradación de materiales para garantizar la integridad de la estructura

3.9.1.5. Conexiones tejido a tejido

Al usar este tipo de conexiones se debe acoplar mediante tejidos o juntas mecánicas en las áreas donde se pueda presentar concentración de esfuerzos, las membranas pueden ser reforzadas con adición de tejido, cuando se emplee el uso de ojales, el material de refuerzo metálico o no, debe ser de un material anticorrosivo.

3.9.1.6. Conexión tejida a no tejido

El detalle de este tipo de conexiones debe ser configurados de tal forma que minimice la concentración de esfuerzos en las fibras, minimice el desgaste y daños durante la vida útil de la estructura, contar con resistencia adecuada y resistencia a la intemperie cuando se requiere seccionar el tejido para su construcción, las conexiones deben considerar los requerimientos de la membrana para su elongación y flexión en la dirección de la junta.

3.9.1.7. Otras conexiones

Las conexiones Cable a cable, Cable a perfil, y cable a anclaje; deberán contar con sistemas de rotación si se prevén, movimientos, y excentricidades en el detalle de conexión, debe contar con sistemas de ajuste para mantener la tensión constante.

3.9.1.8. Consideraciones de diseño

Notación

D = Carga muerta

D_s = Carga muerta colateral superpuesta

E = Carga sísmica

L_r = Carga de cubierta

L_t = Factor de ciclo de vida

P = fuerza de miembro o efecto de estrés causado por pretensado o presión interna para membrana soportada por aire

R = Carga de lluvia

S = Carga de nieve

T = Fuerzas de autoformación, como la expansión y contracción de la temperatura, la fluencia, el asentamiento diferencial y la humedad.

T_f = fuerza de tracción o efecto de tensión en el elemento estructural o dirección de tracción que se considera causada por la combinación de carga.

T_{ff} = Fuerza de tensión en dirección de relleno (mediante cálculo de análisis no lineal).

T_{fw} = Fuerza de tensión en dirección de la deformación (mediante cálculo de análisis no lineal)

T_r = Fuerza de diseño de elemento de membrana.

T_s = Fuerza de tensión de elemento de membrana.

T_{sf} = Fuerza de tensión de en dirección de la fibra de la trama.

T_{sm} = Fuerza de tensión en la dirección principal del plano de la membrana.

T_{sw} = Fuerza de tensión en la dirección del Urdimbre.

W = Carga de viento.

β = Factor de reducción de fuerza.

3.9.1.8.1. Cargas

Las cargas deben ser determinadas según el código ASCE 7 o el código que aplique en la región incluidas las cargas aplicadas durante su construcción.

3.9.1.8.2. Cargas muertas:

Las cargas muertas de una membrana tensada comprenderán los pesos de:

- La membrana
- Sistema de reforzamiento y juntas
- Secciones de elementos estructurales integradas al sistema de soporte del sistema de la estructura tensada.
- Recubrimientos o aislantes utilizados y otras partes fijas de la estructura.

3.9.1.8.3. Cargas superpuestas

Corresponden a las cargas de las diferentes instalaciones: Red eléctrica, RCI, Acueducto, entre otras que hagan parte de la estructura de forma permanente.

3.9.1.8.4. Cargas de clima, vivas y de sismo

Se debe contemplar las cargas vivas correspondientes a condiciones climáticas como viento, lluvia, nieve y de sismo según el código ASCE 7 o la norma aplicable en la región.

3.9.1.8.5. Consideraciones para el análisis y diseño

Las estructuras de membrana tensada deben diseñarse considerando todas las fuerzas de servicio.

3.9.1.8.6. Colapso desproporcionado.

Las estructuras de membrana tensada deben ser diseñadas de modo que la falla en la membrana o en algún elemento individual de soporte no resulte en un colapso general o ponga en riesgo la integridad de los ocupantes.

3.9.1.8.7. Estabilidad estructural

Cuando la estructura de soporte se base en la estructura de la membrana de tensión para proporcionar estabilidad a los componentes o miembros individuales, debe asegurarse de que una falla local de la estructura de la membrana de tensión no provoque el colapso de la estructura de la membrana de tensión y la estructura de soporte por la pérdida de capacidad de los miembros individuales de la estructura de soporte o exceso de movimiento de la estructura de la membrana de tensión.

3.9.1.8.8. Diseño

El diseño de las estructuras de membranas tensadas debe incluir las siguientes consideraciones:

- Pérdida de pretensión por el desplazamiento de los soportes, tolerancias constructivas, fluencia del material o relajación de algún elemento.
- Deformación de algunos elementos de soporte.

3.9.1.9. Análisis

Un método racional para análisis debe usar para la determinación de las fuerzas efectivas en cada uno de los elementos. Todo los análisis y diseños deben incluir comportamientos no lineales como resultado de la gran deflexión y considerar los efectos de las propiedades no lineales del material. El método de análisis debe tener incorporado la geometría no lineal relacionada a la aplicación de las cargas y la deformación de la estructura, el análisis lineal de la superposición de efectos de cargas no debe ser asumido, a no ser que lo considere el diseñador.

Se tendrá en cuenta el efecto en las membranas, cables o miembros de la estructura que presenten un estado de fuerza cero, el diseño debe asegurar que la inestabilidad no conduzca a un colapso o daño. Además el desplazamiento potencial entre la membrana y la superficie reforzada como cables y redes debe ser evaluado y considerado en el análisis.

3.9.1.9.1. Factor de ciclo de vida

Cada miembro seleccionado debe incluir un factor de ciclo de vida L_t , el cual ajusta la capacidad del miembro para permitir los efectos del envejecimiento causado por efectos ambientales o por efectos del desgaste del revestimiento protector de la membrana. El factor de ciclo de vida debe seleccionarse de modo que en ningún momento durante la vida útil prevista de la estructura la resistencia del miembro sea menor que la requerida por esta norma.

Para membranas, cuerdas no metálicas, y cintas de sujeción este valor se debe seleccionar de acuerdo a:

- Para membranas, cuerdas no metálicas y cintas de sujeción que retengan el 75% de su fuerza inicial de diseño en su vida estimada y son usadas en la estructura permanente, $L_t = 0.75$.
- Cuando la retención de la fuerza inicial de diseño es menor a 75% en su vida útil estimada, el factor L_t debe ser reducida proporcionalmente.
- Para elementos sujetos a cargas cíclicas, L_t debe ser seleccionada apropiadamente pero no superar 0.6.
- Para materiales destinados a las membranas sometidas a cargas cíclicas, se debe realizar ensayos acordes al método de los pliegues flexibles en seco de ASTM D4851.

Factores de ciclo de vida para tejidos y uniones

TEJIDO O UNIÓN	VALOR
Costura termosellada o soldadas	Igual que para la tela base.
Costura adhesiva	50% del valor de la tela base
Costuras cosidas sin protección	60% del valor de la tela base
Costuras cosidas con protección (clima o luz solar)	90% del valor de la tela base
Juntas mecánicas o componentes de la membrana	igual que para la tela base.

Tabla 6 Factores de ciclo de vida para tejidos y uniones

3.9.1.9.2. Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga y factores de reducción dados en la tabla ____ deben ser usados para el diseño de los componentes de la membrana, las combinaciones de carga para el diseño de los elementos de soporte de la estructura se realizan según ASCE 7 y ASCE 19.

Combinaciones de carga y factores de reducción de fuerzas

	COMBINACIÓN DE CARGA	FACTOR DE REDUCCIÓN
1	P + D + Ds	0,17
2	P + D + (Ls o S o R) + Ds	0,27
3	P + D + Ds + 0,6W o 0,7E	0,33
4	P + D + Ds + 0,75(0,6W) + 0,75(Lr o S o R)	0,33
5	P + D + Ds + 0,75(0,7E) + 0,75(Lr o S o R)	0,33

Tabla 7 Combinaciones de cargas para análisis de membranas.

3.9.1.9.3. Tensión uniaxial

La fuerza de diseño T_r desarrollada por la membrana en tensión uniaxial en la dirección considerada debe ser calculada mediante:

$$T_r = \beta L_t T_s \geq T_f \quad \text{Ec. 2.8.1}$$

3.9.1.9.4. Tensión biaxial

Las membranas que requieren resistencia simultanea a esfuerzos de tensión en las dos direcciones ortogonales deben ser calculadas mediante:

$$T_r = \beta L_t T_{sw} \geq T_{fw} \quad \text{Ec. 2.8.2}$$

Y

$$T_r = \beta L_t T_{sf} \geq T_{ff} \quad \text{Ec. 2.8.3}$$

Y

$$0.8 \beta L_t (T_{sw} + T_{sf}) \geq T_{fw} + T_{ff} \quad \text{Ec. 2.8.4}$$

3.9.1.9.5. Resistencia al desgarre

Esta consideración se debe tener en cuenta para el material el cual debe cumplir con la máxima fuerza de servicio.

3.9.1.9.6. Cables, redes, y juntas mecánicas.

La fuerza de dice T_r desarrollada en cables, redes y juntas mecánicas deben ser calculadas mediante:

- a) Cables de acero:

T_r (De acuerdo a ASCE 19).

- b) Redes y cuerdas no metálicas:

$$T_r = \beta L_t T_s \quad 2.8.5$$

- c) Juntas mecánicas

T_r (De acuerdo a los códigos de estándares apropiados).

3.9.1.10. Anclajes

3.9.1.10.1. Reacciones

Cundo la estructura de membrana tensada está soportada en la fundación u otro elemento estructural, el ingeniero diseñador debe proveer las reacciones por separado de cada una de las combinaciones de cargas usadas en el análisis y diseño.

3.9.1.10.2. Consideraciones de diseño de anclaje

El sistema de anclaje debe ser diseñado para distribuir las cargas ancladas uniformemente a la membrana y prever esfuerzos concentrados excesivos en la membrana, movimientos y rotaciones de la membrana o la estructura y los cambios de dirección de las reacciones o cargas aplicadas.

3.9.2. ASCE 19-16 Aplicación en estructuras de cables de acero para estructuras

Este código provee los requerimientos para el diseño estructural, documentos contractuales, detalles de dibujo, fabricación e instalación de cables empleados en edificaciones como elementos de soporte.

3.9.2.1. Consideraciones de diseño

3.9.2.1.1. Diseño básico

El sistema de cables, incluidos los mástiles, deben ser diseñados para soportar las cargas especificadas sin exceder la fuerza permitida en cada miembro, por lo tanto, estas deben ser diseñadas para tener la suficiente rigidez y límites de desplazamiento.

3.9.2.1.2. Integridad estructural

El sistema estructural completo de la edificación, incluyendo el sistema de cables, mástiles y puntales deberán estar configurados para maximizar la robustez y redundancia; la falla o mal funcionamiento de cualquier componente no puede producir una falla desproporcionada que afecte gran parte o la totalidad de la estructura.

3.9.2.1.3. Reemplazo de miembros

Se debe considerar el reemplazo y reparación de miembros en diseño.

3.9.2.1.4. Cargas

En ausencia de un código de construcción local aplicable, las cargas de diseño serán las indicadas en ASCE/SEI 7-10, “Cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras”. Cuando corresponda, se deben hacer provisiones de carga adicionales en sobre la base de las siguientes consideraciones: efectos aerodinámicos sobre cables individuales y estructuras completas de cables, ya sea mediante análisis dinámico numérico o mediante ensayos en túnel de viento; efectos de fatiga y vibraciones estructurales inducidas por el viento; y los efectos de arrastrarse

3.9.2.1.5. Combinaciones de cargas:

Combinaciones de cargas	
COMBINACIÓN DE CARGA	
1	P + D
2	P + D + L
3	P + D + (Lr o S o R)
4	P + D + 0,75L + 0,75 (Lr o S o R)
5	P + D + 0,6W o 0,7E
6	P + D + 0,75L + 0,75(Lr o S o R) + 0,75(0,6W)
7	P + D + 0,75L + 0,75(0,7E) + 0,75S
8	0,6D + P + 0,6W
9	0,6D + P + 0,7E

Tabla 8 Combinaciones de carga para análisis de estructuras tesada de cables.

3.9.2.1.6. Fuerza en el conjunto de cables.

La fuerza requerida S_r de cada conjunto de cables debe ser igual al mayor de T_n (Tensión de la combinación n); la resistencia admisible S_a del conjunto de cables debe ser tomado como el menor de:

$$S_a = \frac{S_{min} \times N_f}{\Omega} \quad \text{ó} \quad S_a = \frac{S_{min} \times N_d}{\Omega} \quad \text{Ec. 2.8.6}$$

Donde:

S_{min} = esfuerzo mínimo de rotura

N_f = Factor de reducción por conexiones

N_d = Factor de reducción de deflexión ($N_d=1$ para el caso de no deflexión)

Ω = factor de seguridad = 2.2

Ver tabla ___ para la determinación el factor de reducción por conexiones.

Ver tabla ___ para la determinación del facto de reducción por deflexión debido a la curvatura de la silla soportante.

3.9.2.1.7. Efecto por aumento de temperatura

Se debe considerar en el diseño el efecto causado por el aumento de la temperatura sobre los 93°C en los elementos de la estructura y sus efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas de los cables y conexiones; para temperaturas mayores a 93°C el esfuerzo mínimo de rotura S_{min} , y el módulo de elasticidad del cable E_s , se deben reducir apropiadamente en los cálculos.

Factor de reducción de ajuste		
Tipo de terminación	factor de reducción de ajuste N_f	
	Cable	hebra
Conexiones fundidas en (Zinc, Aluminio, Mischmetal, Aluminio o resinas)	1,00	1,00
Conexión estampada	1,00	0,90
Empalme de bucle mecánico (ojo flamenco) con dedo y pedal		
3/8" < \emptyset < 1"	0,95	N/A
1" < \emptyset < 2"	0,92	N/A

Tabla 9 Factores de reducción de capacidad por efectos de temperatura.

(Estructuras tensadas con cables)

Factores de reducción por deflexión		
Relación del radio del sillín al diámetro de la cuerda	Relación del radio de la silla al diámetro del hilo	Factor de reducción por deflexión N_d
15 y superior	20 y superior	1,00
14	19	0,95
13	18	0,90
12	17	0,85
11	16	0,80
10 mínimo	15 mínimo	0,75

Tabla 10 Factores de reducción de capacidad por deflexión

(estructuras tensadas con cables)

3.9.2.1.8. Esfuerzo de fatiga

La reducción posible la fuerza del cable debido a la fatiga debe ser evaluado cuando el cable es sometido a cargas fluctuantes de manera repetitiva, vibraciones debido al viento, lluvia u otros efectos dinámicos, fluctuaciones de tensión-tensión o tensión-deflexión deben ser considerados.

Las ecuaciones empíricas que predicen la fatiga del cable fueron desarrolladas para su uso práctico de manera simple; pero son específicas para cuerdas, torones, cables de acero de 6 hebras.

$$N = \left(\frac{479.4}{R} \right)^{3.74} \quad (\text{Paton et al. 2001})$$

Donde:

N= es el factor de reducción de capacidad por fatiga en el ciclo de vida

R = es la fluctuación de la carga axial expresada como un porcentaje del esfuerzo mínimo de rotura.

$$N = \frac{731}{P^{4.09}} \quad (\text{American Petroleum Institut API .1993})$$

Donde:

P = razón del rango de carga mínima de rotura

API recomienda dividir el factor N por 3.0 para obtener un diseño de vida de servicio.

3.9.2.1.9. Efectos de fluencia

La elongación a largo plazo de un cable pretensado debe ser evaluado. El efecto de fluencia provoca cambios en la longitud del cable, por lo tanto la fluencia influirá en la fuerza del cable. Se entiende como fluencia a al alargamiento a largo plazo después del estiramiento previo y bajo acciones de cargas.

Aunque el pre estiramiento asienta inicialmente el cable en sección transversal para obtener homogeneidad, todavía se producirá fluencia en todos los cables bajo cargas de servicio. Se ha encontrado que la fluencia ocurre dentro de las 200h bajo carga estática durante pruebas y estructuras terminadas después de aplicación de varios efectos de carga; la cantidad de fluencia depende de: diámetro de cable, número de hilos, nivel de carga, duración de carga aplicada y temperatura; se ha observado revestimiento de alta densidad aumentan el nivel de fluencia.

Por otro lado, niveles bajos de tensión darán una velocidad menor de fluencia. La magnitud de la fluencia acumulada normalmente variará entre 0.01% y 0.06% de la longitud original del cable.

3.9.2.1.10. Accesorios de extremos

Los accesorios de los extremos deben desarrollar una última resistencia superior a la resistencia mínima a rotura especificada, en ciertas ocasiones se permite, se permite que la resistencia de diseño del conector sea igual a la resistencia especificada como mínimo de rotura, como en el caso en que el cable está diseñado para cumplir criterios de deformación en vez de demanda de carga, se permite cuando $S_r < 0.67S_a$.

3.9.2.1.11. Análisis estructural

Los sistemas de cables inherentemente tienen comportamiento no lineal, Por lo tanto, la base de diseño para los sistemas de cable incluirá consideraciones y análisis no lineales.

El análisis estructural se basará en las siguientes consideraciones:(ASCE, 2016b)

- La elongación de los cables y deformación de los la estructura de soporte se tendrá en cuenta en el diseño.
- Se realizarán análisis no lineales si se determina que las magnitudes de los desplazamientos del cable son tales que el equilibrio las ecuaciones deben basarse en la geometría de la estructura desplazada
- Se debe considerar el efecto de las cargas dinámicas, fatiga y deflexión de cada cable y la totalidad de la estructura.
- Los cables deben ser proporcionales a la máxima deflexión causada por las combinaciones de caras aplicadas, cambios de temperatura.

3.9.2.2. Serviciabilidad

Desde el inicio del diseño el propietario y el calculista determinarán las condiciones de servicio, el análisis y diseño desarrollarán el análisis numérico que permitirá a la estructura cumplir con su servicio.

3.9.2.3. Vibraciones

El efecto de cargas dinámicas en cables tensionados, deflexiones individuales de cada cable y la estructura completa deberán tenerse en cuenta.

La relación entre la carga aplicada y la carga impuesta puede ser alta durante el montaje, por lo tanto, se puede esperar que los desplazamientos en las articulaciones sean un factor importante en el comportamiento de la estructura en esta etapa de diseño.

A menudo se requiere un análisis no lineal para los cálculos en la etapa de construcción, aunque pudiese no ser requerido para el análisis de la estructura terminada.

3.9.2.4. Análisis en etapa constructiva

Se debe realizar un análisis estructural para la etapa constructiva teniendo en cuenta el método propuesto

3.9.2.5. Materiales

los materiales empleados en los cables deben estar sujetos a los siguientes códigos de acuerdo a su material:

Códigos aplicados a materiales para cables

CÓDIGO	MATERIAL
ASTM A638-94a	Acero inoxidable
ASTM A474-03	Acero con recubrimiento de Aluminio
ASTM A475-03	Acero con recubrimiento de Zinc
ASTM A492-95	Acero inoxidable
ASTM A586-04a	Torón helicoidal en acero inoxidable paralelo recubierto en Zinc
ASTM A603-98	Acero con recubrimiento de Zinc

Tabla 11 Códigos para materiales para cables.

3.9.2.6. Recubrimientos de protección

Los cables expuestos a las condiciones atmosféricas deben contar con protección contra la corrosión de acuerdo la tabla de anterior, la protección básica debe aplicarse sobre toda la superficie del sistema de cables, así como de cada uno de los elementos de acero al carbón presente en la estructura. Si se aplica dos tipos de recubrimiento anticorrosivo, estos se deben analizar primero para garantizar su compatibilidad.(ASCE, 2016b)

3.10. Consideraciones básicas de una granja agroindustrial porcícola

Una granja técnica porcícola es un espacio cerrado amplio en cuyo interior hay divisiones que pueden ser en concreto, mampostería o rejas metálicas cuyas dimensiones dependen del propósito de la granja; cuenta con abundantes instalaciones hidráulicas y eléctricas y dependiendo de la geografía del emplazamiento puede requerir o no sistemas de aislamiento térmico. Pero bajo cualquier condición siempre requerirá una adecuada ventilación para extraer los gases que se generan en su interior.



Imagen 17 Vista de una granja porcícola fuente: Manual construcciones porcícolas: Asociación PORKOLOMBIA

3.10.1. Dimensiones:

Las dimensiones del espacio dependen de la cantidad de producción requerida y de las condiciones orográficas del terreno, el cual limita la longitud de los mismos los cuales pueden llegar a una longitud de 200m, para producción industrial es frecuente anchos de frente entre 12 a 15m (Fajardo López, 2017)

3.10.2. Cubierta

Las cubiertas se construyen con una estructura metálica liviana tipo cercha en el calibre óptimo para las condiciones de carga en el sector, es indispensable el uso de recubrimiento dada la

atmosfera corrosiva del lugar, se recomienda el uso de tejas en PVC ya que este es un material inerte con el amonio y sulfuros que producen los cerdos acumulados y es un material liviano y fácil de instalar. El soporte de las cerchas oscila entre los 6 y 7 m apoyadas en columnas metálicas o de concreto.(Fajardo López, 2017)

Es indispensable que la cubierta el cual es un realce en el caballete que permite la ventilación del lugar en todo momento.



Imagen 18 Ejemplo de instalación de cubierta en graja porcícola, Fuente: Manual construcciones porcícolas: Asociación PORKOLOMBIA



Imagen 19 Ejemplo de cubierta usando membrana: Fuente: <https://actualidadavipecuaria.com>

3.10.3. Recubrimiento lateral

Dependiendo de las condiciones de temperatura del punto geográfico del emplazamiento de la edificación, se requerirá un aislamiento permanente por medio de máneles de PVC con un sistema de refrigeración y extracción mecánico para ambientes cálidos, la otra alternativa es el uso de cortinas de polipropileno, las cuales mediante un sistema de poleas se manipulan para gestionar el flujo de aire y mantener así un equilibrio de temperatura dentro del galpón.



Imagen 20 Ejemplo de cortinas en granjas, accionamiento mecánico con el uso de poleas;

Fuente: <https://www.aditmaq.com/southwestern/>

3.10.4. Otras consideraciones

Además de todo el sistema de cerramiento, las granjas tecnificadas deben contar con adecuadas instalaciones hidráulicas de abasto y desagüe, drenajes, limpieza, iluminación y salidas eléctricas las cuales no hacen parte del alcance de este documento por lo tanto no se profundizarán en ellas.

3.11. Propuesta de cubierta.

3.11.1. Diseño original de referencia.

LA granja con la que se pretende hacer el comparativo, es un galpón de 14.65m de frente por 51m de fondo.

El sistema estructural para la cubierta son pórticos sucesivos cada 3.4m, con columnas en tubo estructural redondo Ø50mm, los aleros de la cubierta se conciben en tubos cuadrados de 50mm x 80mm, las correas de sujeción de la teja con una separación de 1.15m serán en tubería cuadrada de 50mm x 80mm. La cubierta es en teja de PVC. A continuación, se ilustra por medio de los planos.

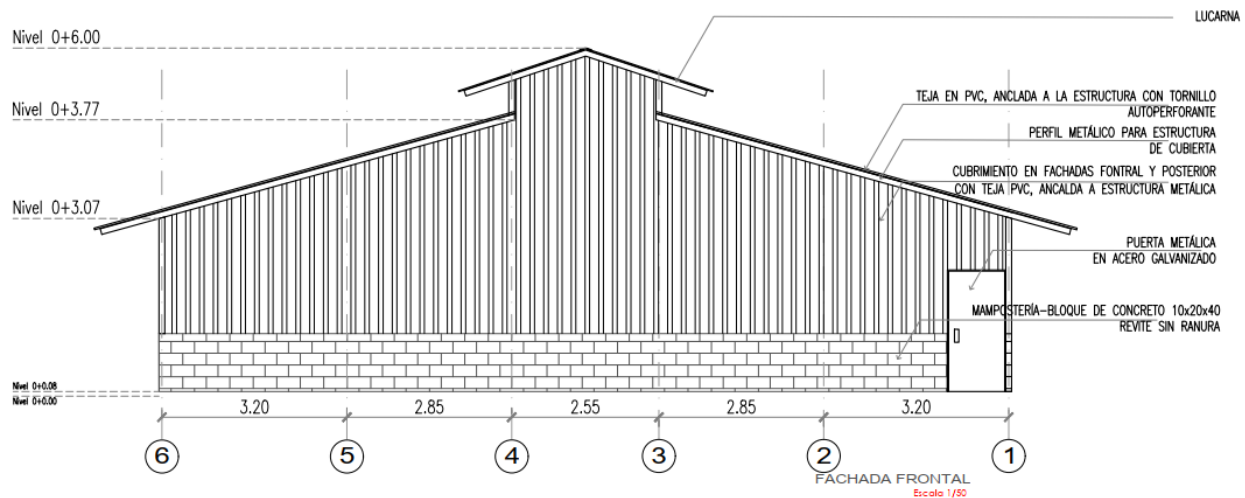


Imagen 21 Fachada frontal del caso ejemplo, Fuente: Elaboración propia de autor.

En la imagen 5 se observa que las fachadas frontal y posterior cuentan con un recubrimiento permanente en este caso, con teja de PVC, un muro bajo en mampostería y una puerta metálica galvanizada

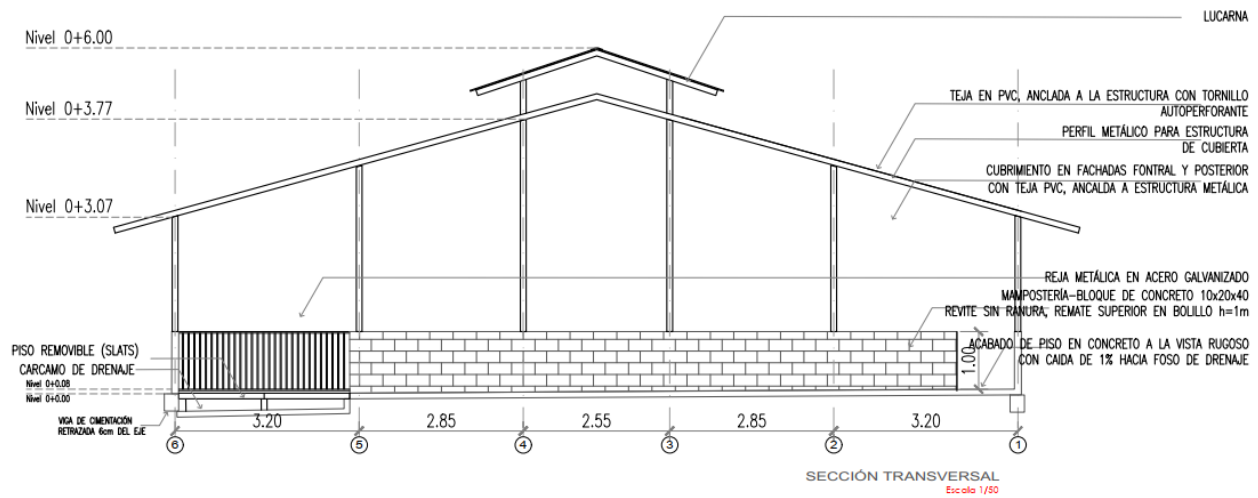


Imagen 22 Vista de sección transversal del caso de ejemplo, Fuente: Elaboración propia de autor.

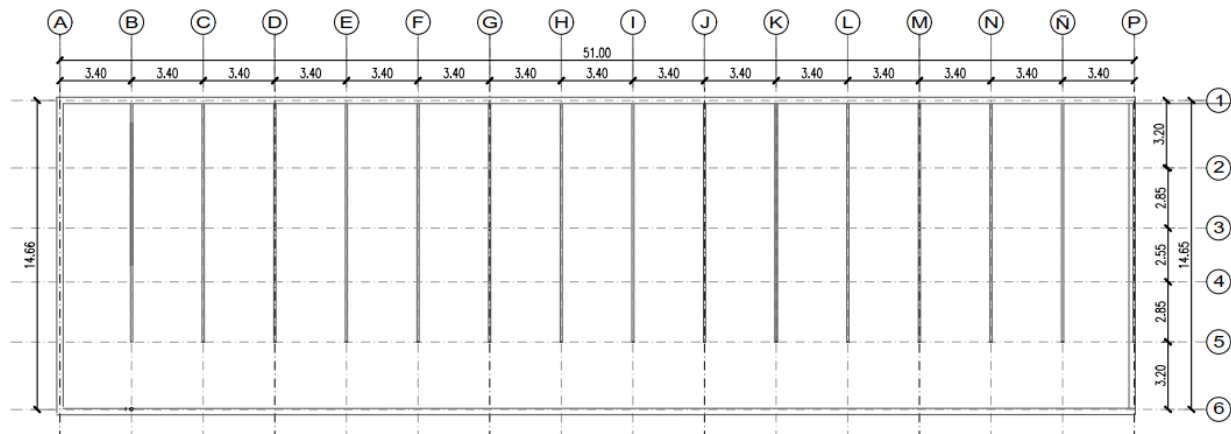


Imagen 23 Planta general, Fuente: Elaboración propia de autor

La imagen 7 muestra la planta del galpón, en ella se observan las divisiones de los corrales las cuales son muros en mampostería a una altura 1m y el foso de encharcamiento se dividen por medio de una reja metálica galvanizada; en cada cruce de ejes literal y numeral, se instala una columna para armar el sistema estructural de la cubierta como se aprecia en la imagen 6, dando un aspecto similar al observado en la imagen 3.

3.11.2. Emplazamiento

Se diseñará la tenso estructura que servirá como cubierta de una granja agroindustrial localizada en el municipio de Titiribí - Antioquia con las siguientes características.

Localización: Municipio de Titiribí – Antioquia

Tipo de edificación: Galpón porcícola, ancho 14.65m, fondo 51.00m.

El emplazamiento será en las coordenadas: $6^{\circ}03'52''N$, $75^{\circ}46'00''W$. A una altura de 1773msnm



Imagen 24 Emplazamiento de edificación, Fuente Google Earth

Se observa en las imágenes 8 y 9, que la localización del terreno del emplazamiento de la edificación, es la cúspide de una montaña de gran altura, este dato sumará importancia en el análisis de cargas de viento ya que el factor multiplicador por condiciones topográficas aumentará las cargas de diseño.



Imagen 25 Terreno de emplazamiento de edificación: Fuente: autor.

3.11.3. Propuesta de diseño de cubierta

RESUMEN - CARACTERÍSTICAS DE ESTRUCTURA		
Tipo de edificación		Granja porcícola
Emplazamiento	Localización	Municipio de titiribí Antioquia, Coordenadas 6°03'52"N;75°46'00"W
	Altura sobre nivel del mar	1173 msnm
Grupo uso		I
Zona de amenaza sísmica		Intermedia
Zona de amenaza eólica		3
Sistema estructural		Tenso estructura tipo viga Jawerth, sistema de cables paralelos
materiales	Membrana	Tejido en poliéster con recubrimiento PVC
	Cable	acero galvanizado
	Mástil	Tubo estructural redondo Ø200x3
	Conexiones	acero galvanizado
Dimensiones	Ancho (m)	14,65
	Largo (m)	51,00

Tabla 12 Resumen de características de estructura (Caso práctico)

La cubierta propuesta debe cumplir con requisitos de funcionalidad y estabilidad. Para que la cubierta sea funcional, esta debe permitir la aireación al interior dado el caso en que las fachadas frontales y posterior se cierren y los laterales también. Por esto, la propuesta debe considerar la instalación de una lucarna en la parte superior de la cubierta. También debe ser un diseño que no permita la entrada de agua en su interior, debe ser opaca y permitir la acumulación calórica por radiación solar al interior.

La imagen 14 expone la conceptualización de la propuesta. Es una tenso estructura que comprende una cercha tensada con tres elementos a compresión los cuales son los postes que transmiten la carga vertical al suelo y la riostra que da forma a la lucarna.

El sistema escogido para es un sistema de cuerdas tensadas en paralelo; es un sistema de cuerdas tensado con estabilización combinada mediante puntal y tirantes (imagen 14). Y sus materiales son:

Acero para las estructuras a compresión y los cables tensados

Plástico: para la membrana en PVC.

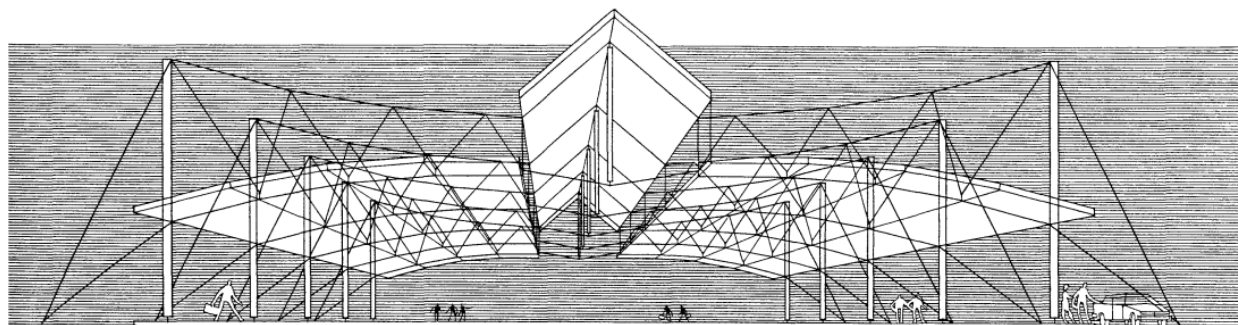


Imagen 26 Propuesta de estructura tensada: Fuente. Engel, H.

Para que la estructura cumpla el criterio de estabilidad, esta debe garantizar las mínimas deformaciones durante un evento que genere cambios en la aplicación de las cargas o un incremento considerable de las mismas; las tenso estructuras se caracterizan porque el flujo de cargas viaja a través de esfuerzos axiales, sea a tensión o compresión, El equilibrio estático esta propuesta lo ofrecen los cables que en todo momento están trabajando a tensión mientras que los perfiles

metálicos se encargan de equilibrar estas fuerzas transmitiendo esfuerzos a compresión.

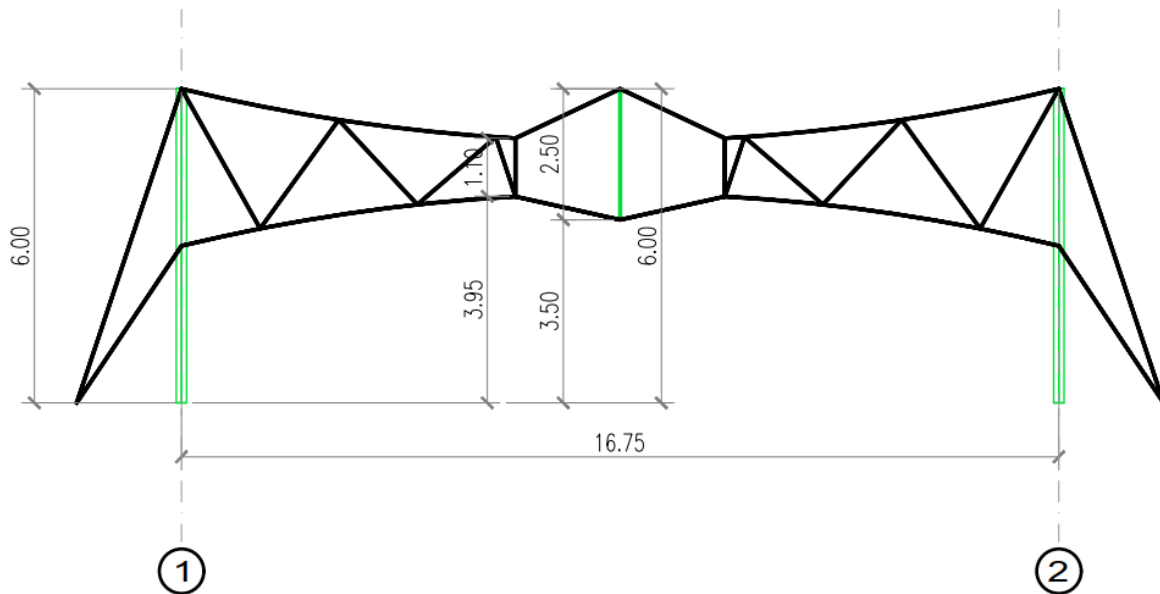


Tabla 13 sección transversal de la estructura tensada

Cada sistema tensado consta de:

- 1) Dos mástiles laterales que darán equilibrio global mediante esfuerzos de compresión y transmitirán parte de las cargas al suelo.
- 2) Dos pares de tirantes que anclarán las cuerdas al suelo y serán los puntos donde se genera la tracción.
- 3) Un par de cuerda superior y cuerda inferior para el soporte de los aleros de la cubierta
- 4) Dos cables tensados en zigzag que arriostrarán las cuerdas superior e inferior de los aleros
- 5) Un par de cuerdas superior e inferior que conformarán la estructura de la lucarna.
- 6) Un puntal que arriostrará la estructura de la cubierta, consiste en un perfil metálico de 2.5m.

Las astas estarán ancladas a una base en concreto cuyo diseño no está en el alcance de este documento, se asumirá que se cuenta con un anclaje perfecto en los casos de análisis.

Los tirantes también se desprenden de un anclaje de piso, cuyo análisis y diseño tampoco hace parte del alcance de este documento.

Cada eje de cuerdas está separado a una distancia de 10,20m en los tramos internos y a una distancia de 11,20m en los tramos externos.

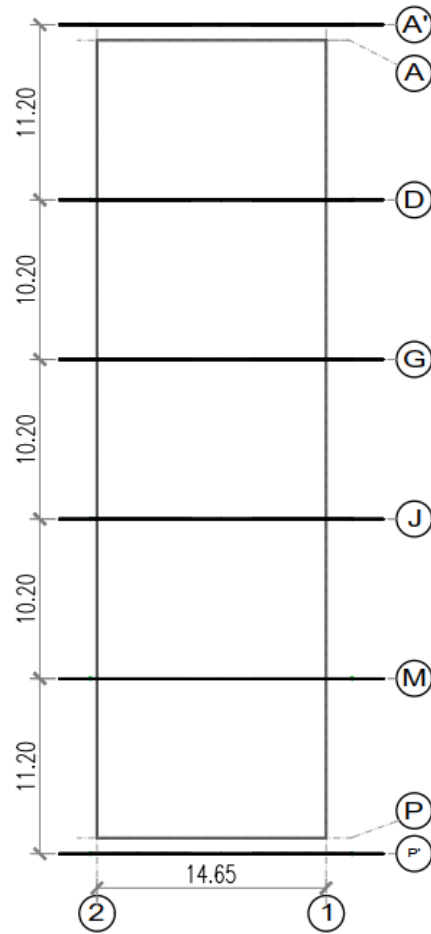


Imagen 27 Planta de ejes y distribución de cuerdas en paralelo.

El equilibrio en el eje Y de coordenadas la ofrecen las membranas de la cubierta, las cuales al estar tensionadas actuarán como riostras entre las celdas, como se puede apreciar en la imagen 12.

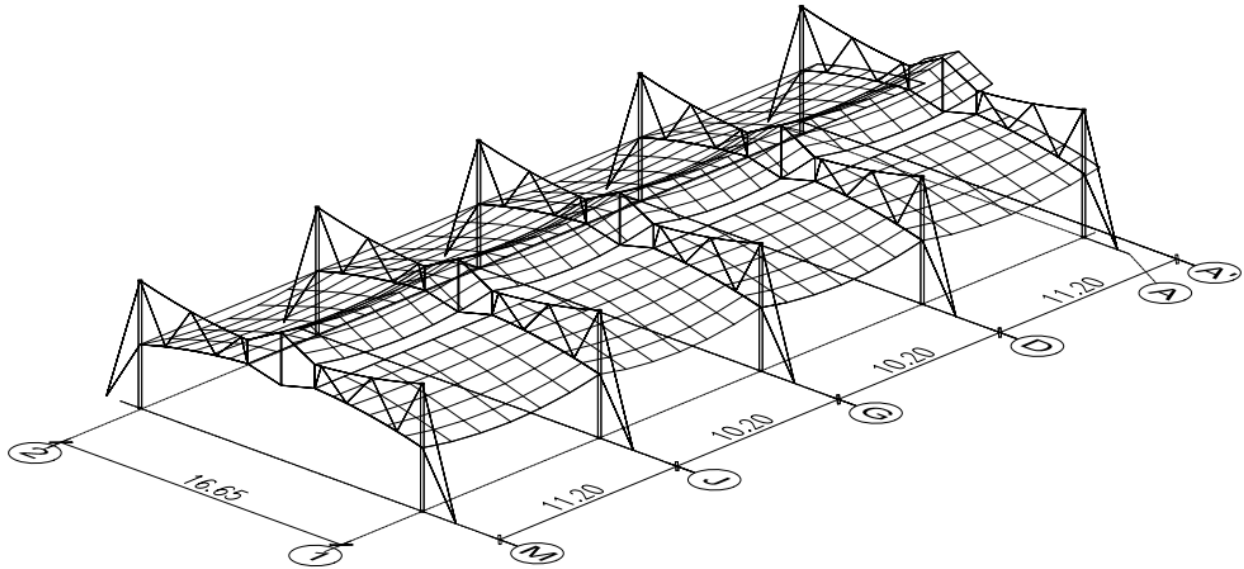


Imagen 28 Propuesta de prototipo - Detalle 3D-conceptual; Fuente: Elaboración propia de autor.

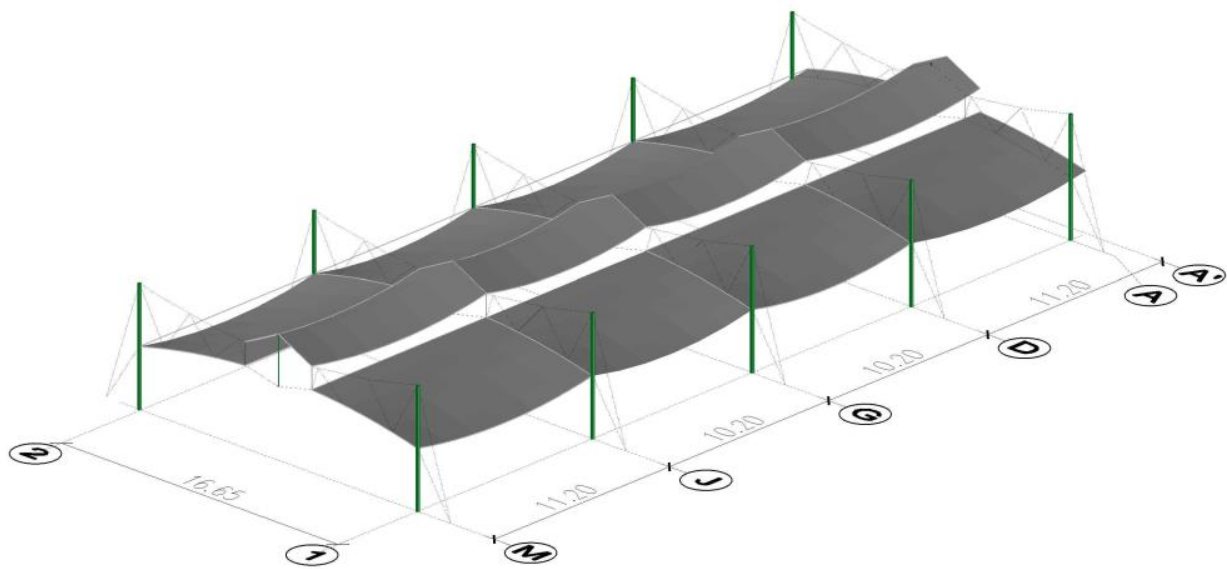


Imagen 29 Propuesta de prototipo-Detalle 3D -realista; Fuente: Elaboración propia de autor.

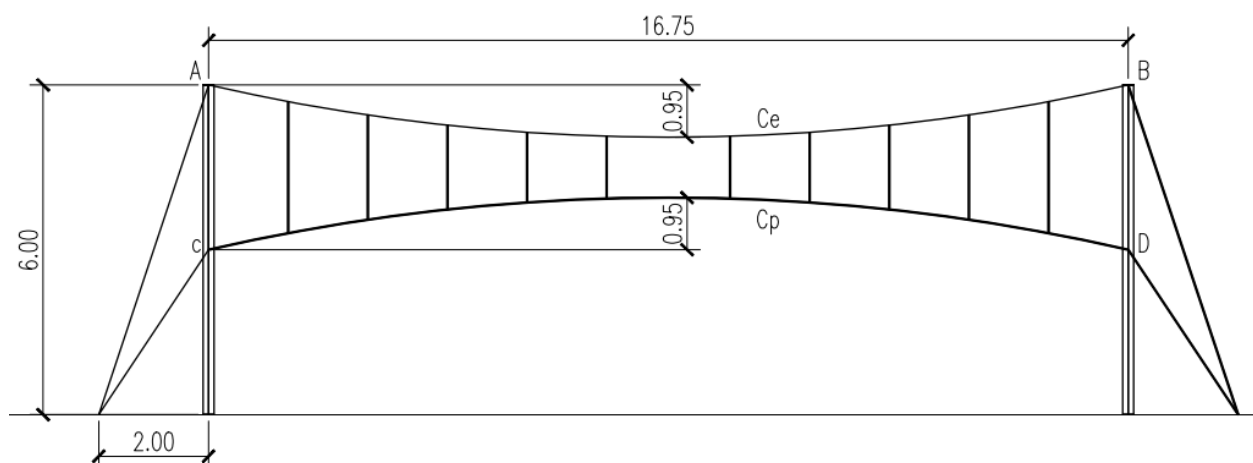
La imagen 13 revela la vista real de la estructura, se observa que la cubierta cuenta con una forma similar a la recomendada, se observa la formación de la lucarna y el ingreso de aire por encima de los aleros.

3.12. Análisis de la estructura

Para el análisis de la estructura, se analizan por separado las condiciones de resistencia para la estructura compuesta por los mástiles y los cables de acuerdo al código ASCE 19-16 y posteriormente, se analiza la membrana teniendo en cuenta el código ASCE 55-15.

3.12.1. Análisis de cercha Jawerth:

Se realiza un análisis simplificando la lucarna como una fuerza puntual en el centro de la luz de los cables que actúan en sentido gravitacional, de acuerdo al siguiente esquema:



3.12.2. Análisis de cargas:

En este ejercicio se omitirán las cargas sísmicas, ya que al ser una estructura liviana, las cargas de viento dominan el diseño por lo tanto, se considerarán solamente las cargas: Muerta por peso propios, Muerta sobreimpuesta, carga viva, viento, lluvia.

De acuerdo a la tabla ___ se tiene que el cargar por peso propio del cable es:

$\varnothing=25\text{mm}$, 1"

Peso/m = 2.34 Kg/m

Diametro (mm)	Peso / metro (Kg)	Carga rotura mín (N)	Carga rotura mín (Kg)
3	0,0311	4900	499,653
4	0,0554	8700	887,139
5	0,0865	13600	1386,792
6	0,125	19600	1998,612
8	0,221	34800	3548,556
10	0,346	54400	5547,168
11	0,419	65800	6709,626
12	0,585	91900	9371,043
14	0,678	107000	10910,79
16	0,886	139000	14173,83
19	1,38	218000	22229,46
22	1,67	263000	26818,11
25	2,34	368000	37524,96

Aplicando las ecuaciones de la sección 2.4.3

$$Ha = Hb = Hc = Hd = TH = \frac{WL^2}{16y}$$

$$Va = Vb = Vc = Vd = Tv = \frac{WL}{4}$$

$$Ra=Rb=Rc=Rd=T$$

$$T=\sqrt{Ha^2 + Hb^2}$$

Cargas

P	50 Kg/m	Carga-Membrana	2 Kg/m
D (membrana)	20,4 Kg/m	Ancho aferente	10,2 m
D(Cable)	2,34 Kg/m	Carga-Membrana	20,4 Kg/m
Ds	0,5 kg/m		
D Total	23 kg/m	GEOMETRÍA CERCHA	
L	100 Kg/m	L	17,65 m
w	450 kg/m	fp	0,95 m
R	0,51 kg/m	fe	0,95 m

COMBINACIÓN DE CARGA		Kg/m	T _H (kg)	T _v (kg)	T (kg)
1	P + D	73	1501,0	323,2	1535,4
2	P + D + L	173	3550,5	764,4	3631,9
3	P + D + (Lr o S o R)	74	1511,5	325,4	1546,1
4	P + D + 0,75L + 0,75 (Lr o S o R)	149	3046,0	655,8	3115,8
5	P + D + 0,6W o 0,7E	411	8418,1	1812,4	8611,0
6	P + D + 0,75L + 0,75(Lr o S o R) + 0,75(0,6W)	351	7196,2	1549,3	7361,1
6	P + D + 0,75L + 0,75(Lr o S o R) - 0,75(0,6W)	-54	-1104,2	-237,7	1129,5
8	0,6D + P + 0,6W	334	6844,1	1473,5	7001,0
8	0,6D + P - 0,6W	-206	-4223,1	-909,2	4319,9
TENSIÓN MÁXIMA				8611,0	

$$S_a = \frac{S_{min} \times N_f}{\Omega} \quad \text{ó} \quad S_a = \frac{S_{min} \times N_d}{\Omega}$$

Donde:

S_{min} = esfuerzo mínimo de rotura

N_f = Factor de reducción por conexiones

N_d = Factor de reducción de deflexión ($N_d=1$ para el caso de no deflexión)

Ω = factor de seguridad = 2.2

S_{min} 22229.00 Kg

N_f 0,92

N_d 1.00

Ω 2,20

S_a 9295,76 Kg

S_a es el esfuerzo admisible del conjunto de cables.

$S_r=8611\text{Kg}$

$S_a=9295\text{Kg}$

$S_r < S_a$ (Cumple)

Se selecciona el cable de acero 6x19 alma de acero de diámetro: 19mm o 3/4".

3.12.3. Recubrimiento

Debido a las condiciones de alta corrosividad a la que se expone la estructura debido a los gases como: Metano, Sulfruso, Amoniaco, se propone un cable galvanizado cal 3/4".

3.12.4. Membrana:

Se propone la instalación de membrana de hilado poliéster de alta densidad (PES HT) con recubrimiento de PVC (Cloruro de polivinilo); esta membrana se caracteriza por ser de bajo costo y una buena relación de costo/durabilidad (expectativa de vida hasta de 20 años) es elástica permitiendo una elongación entre el 10 y 20% previo a la rotura, fácil manipulación e instalación.

Este material en presencia de llama se comporta como auto extingible, tiene un rango de fusión que se encuentra entre los 300°C y autoextinción a los 500°C (Goldsmith, 2008)

3.12.5. Patronaje:

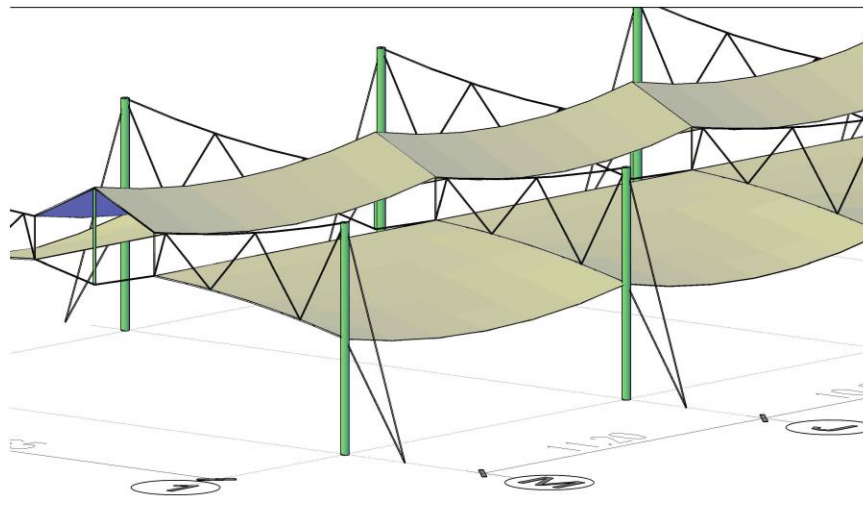


Figura 45 Detalle de cubierta

Como se observa en la figura 45 se debe generar una curvatura mínima para evitar el empozamiento de aguas lluvia, para esto, se genera un patrón de cortes alineados de acuerdo al sentido de la trama y la urdimbre, buscando la mayor eficiencia en resistencia.

La forma de la membrana es una superficie sinclática cóncava a hacia arriba, para la cual se deben generar cortes que en el momento del ensamble se produzca la curvatura de la concavidad en tres dimensiones y de la forma esperada según el diseño.

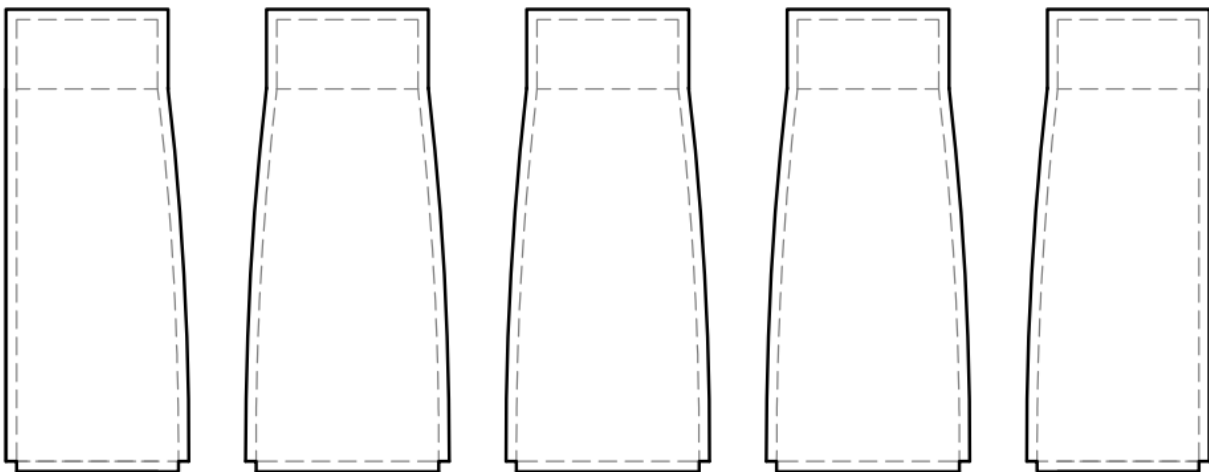


Figura 46 Patrones de corte para modulo de cubierta

LAMINA DE BORDE IZQUIERDO		
	CANTIDAD POR MEMBRANA	1
	NUMERO MEMBRANAS	8
CANTIDAD TOTAL		8

LAMINA DE BORDE DERECHO	
CANTIDAD POR MEMBRANA	1
NUMERO MEMBRANAS	8
CANTIDAD TOTAL	8

LAMINA DE CENTRO	
CANTIDAD POR MEMBRANA	3
NUMERO MEMBRANAS	8
CANTIDAD TOTAL	24

3.12.6. Conexiones

- Para la conexión en el borde de la membrana a la cuerda de borde externo se propone una conexión de borde flexible, el cual consiste en un pliegue de la membrana un la lámina de recubrimiento para evitar la fatiga y posibles roturas de la membrana. Figura 47
- Para la junta de borde soportada en el cable, se propone una conexión con un riel Kender, Figura 48

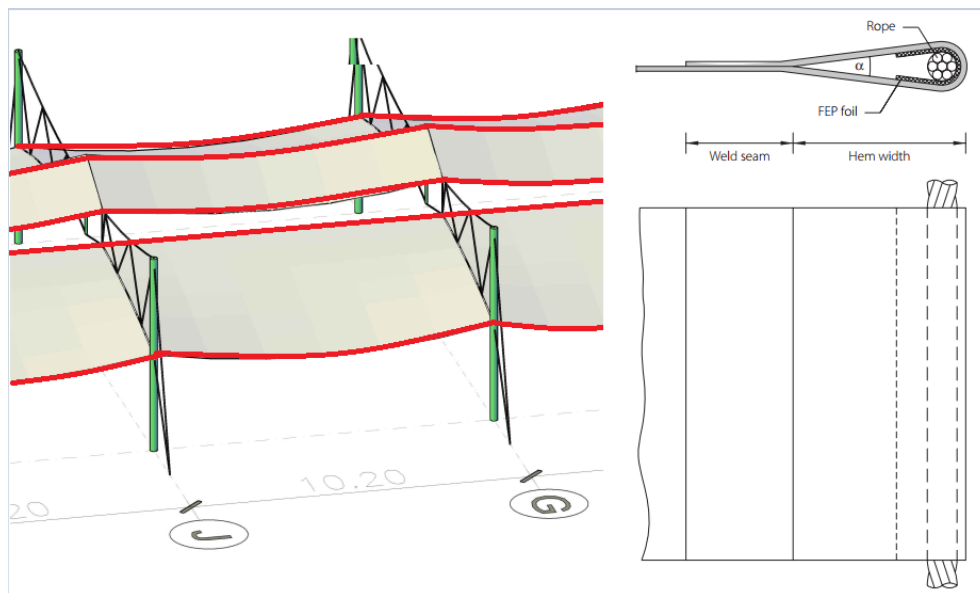


Figura 47 Conexión de membrana en borde externo

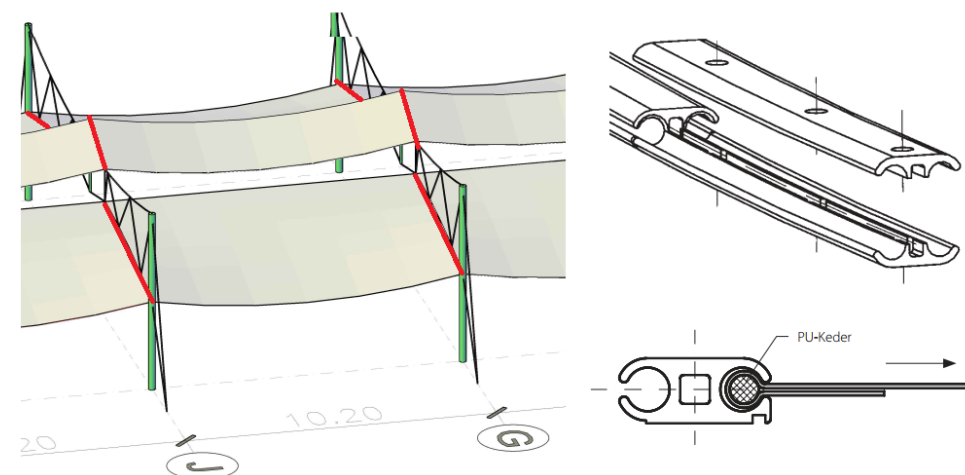


Figura 48 Conexión y soporte de membrana

3.12.7. Proceso constructivo:

La máxima altura de la cubierta propuesta es 6m, lo tanto se propone el uso de andamios certificados para los trabajos en altura.

Para el tensionamiento de las cuerdas se proyecta el uso de dinamómetro manual y winche eléctrico para los trabajos de izamiento de la estructura

Los mástiles deben estar anclados y los pedestales de concreto con su resistencia máxima alcanzada una vez se disponga a tensar las cuerdas.

La membrana de la estructura se ensamblará previamente por módulos individuales, para se conectados en campo.

Conclusiones

- No existe un consenso universal que defina las mejores prácticas ni una metodología estandarizada para el análisis y diseño de tenso estructuras, por lo cual, cada región debe acudir a las recomendaciones propias o que mejor se adapten a su práctica de diseño. Existen tres grandes corrientes de códigos de estandarización para el análisis y diseño de estas estructuras, la americana a través del código ASCE 55-16, el código europeo (European Design Guide for Tensil Surface Structure) y el código japonés (Japanese standard MSAJ/M-02-1995).
- Las estructuras de membrana tensada están compuestas por tres elementos fundamentales: la estructura primaria, el cual es el soporte rígido y la encargada de anclar y transferir los esfuerzos al terreno, la estructura secundaria, la cual se compone a su vez de cables tensionados y la membrana tensionada, de allí que para poder abarcar el diseño de una tenso estructura bajo una normativa completa, se debe considerar el código local de diseño sísmico resistente para la estructura primaria, el código ASCE 55 para lo correspondiente a la membrana y el código ASCE 19 para los cables tensados, por lo que no se debe enmarcar el diseño completo de una tenso estructura bajo un solo código.
- Tanto las membranas tensadas (ASCE 55) como los cables tensados (ASCE 19) se diseñan bajo la filosofía de tensiones admisibles, y si se compara las combinaciones de carga, se observa que pese a algunas diferencias dadas a la naturaleza unidimensional de los cables frente a la bidimensionalidad de las membranas, las combinaciones son completamente compatibles, lo que es apropiado para el ingreso de los datos en el modelo ya que no se generarán ambigüedades frente a las cargas de servicio impuestas en el análisis

ASCE 55 Combinaciones de carga y factores de reducción de fuerzas (membranas tensadas)		ASCE 19 Combinaciones de carga y factores de reducción de fuerzas (cables)		
COMBINACIÓN DE CARGA	FACTOR DE REDUCCIÓN	COMBINACIÓN DE CARGA		
1	P + D + Ds	0,17	1	P + D
2	P + D + (Ls o S o R) + Ds	0,27	2	P + D + L
3	P + D + Ds + 0,6W o 0,7E	0,33	3	P + D + (Lr o S o R)
4	P + D + Ds + 0,75(0,6W) + 0,75(Lr o S o R)	0,33	4	P + D + 0,75L + 0,75 (Lr o S o R)
5	P + D + Ds + 0,75(0,7E) + 0,75(Lr o S o R)	0,33	5	P + D + 0,6W o 0,7E
			6	P + D + 0,75L + 0,75(Lr o S o R) + 0,75(0,6W)
			7	P + D + 0,75L + 0,75(0,7E) + 0,75S
			8	0,6D + P + 0,6W
			9	0,6D + P + 0,7E

- Los modelos matemáticos que se han desarrollado para el análisis de membranas tensadas y la búsqueda de la forma provienen de diferentes fuentes que emplean métodos no lineales, modelos topológicos y suposiciones variadas que dificultan el rastreo y la profundización teórica sobre estos ya que no se encuentran libros que abarquen la teoría completa y discretizada de estos, las fuentes se remiten a artículos de investigación los cuales no desglosan de forma completa y en un lenguaje inteligible el procedimiento de análisis; por lo cual lo más recomendable es acudir a programas comerciales especializados en el análisis de elementos finidos para el desarrollo de estas superficies.
- La programación de obra y métodos constructivos son inherentes a cualquier tipo de estructura; sin embargo, a diferencia de otras estructuras “convencionales”, para la construcción de tenso estructuras no se espera que haya masivas fabricaciones en sitio, sino, se espera que los elementos preensamblados se instalen en forma secuencial de acuerdo a un programa definido previamente. Debido a que las tenso estructuras suelen ser elementos únicos en su forma, es probable que no existan precedentes del método constructivo y se hace necesario modelar o recrear una réplica a escala de la estructura para analizar todas las consideraciones necesarias para llevar a cabo su construcción.
- Es importante diferenciar entre búsqueda de la forma y Patronaje; la búsqueda de la forma se relaciona con la geometría general de la estructura que permite una optimización en su energía y transferencias de cargas; el patronaje consiste en encontrar la geometría adecuada

para los cortes de las tiras que permitan generar la forma diseñada después su ensamblaje. Se debe prestar atención a la cantidad de divisiones que se le realice a la membrana para que se adapte a la forma idealizada; a mayor cantidad de divisiones más fiel será al modelo idealizado, y entre más grandes las divisiones se optimizan los recursos empleados, sin embargo hay dos limitaciones 1) el tamaño máximo lo limita el ancho de la tela disponible en el mercado, el cual es de 3m. 2) a mayor cantidad de divisiones menor es la resistencia de la membrana.

- Los sistemas estructurales de forma activa debido a su alta dependencia de las condiciones de carga en su forma, están muy influenciados por el flujo natural de fuerzas, por lo tanto, los elementos no pueden estar dispuestos en forma arbitraria en la estructura tal como se menciona anteriormente. No es conveniente diseñar o pretender obtener la forma final de una tenso estructura con membrana planas, ya que por su escasa rigidez fuera del plano, es muy difícil obtener superficies completamente planas a no ser que se apliquen excesivas tensiones que aumentan el riesgo de rotura de la membrana; por lo tanto, es ideal desde la concepción de las membranas contar con curvas que ofrezcan una utilidad estética o práctica. En el caso ejemplo expuesto en este documento, se propone una superficie sinclástica cóncava hacia arriba, buscando una deformación permanente que evite el empozamiento de aguas lluvias y la modificación de la superficie debido a cargas de viento por succión.
- En Colombia las tenso estructuras no han tenido la atención que se le ha prestado en otros lugares, prueba de ello es la escasa literatura de origen local disponible para el análisis, diseño y construcción de este tipo de estructuras; con este documento se pretende hacer un aporte en el contexto colombiano que ayude a comprender mejor la funcionalidad y las aplicaciones de este tipo de estructuras.

Recomendaciones:

Las tenso estructuras han venido en crecimiento a nivel mundial gracias a su versatilidad y relativamente bajo costo a la hora de cubrir grandes superficies; En Colombia las tenso estructuras no han tenido la atención que se le ha prestado en otros lugares y parte de ellos se debe a que no ha habido un interés desde la academia por promover este tipo de estructuras, tampoco la industria de la construcción ha mostrado algún notable interés por explorar las diferentes posibilidades de uso de ellas. Se observa un vacío en la institucionalidad para regular estas estructuras por lo que a continuación, el autor presenta algunas recomendaciones en aras de aportar a un crecimiento en la aplicación de estas estructuras:

- El ministerio de vivienda, ciudad y territorio el cual a través de la norma sismo resistente NSR-10 brinda los criterios mínimos para la concepción de diseños de edificaciones seguras en el territorio nacional, puede integrar un capítulo donde se desarrolle la metodología de diseño de este tipo de elementos; de esta manera, los ingenieros nacionales podremos contar con una fuente oficial y de fácil acceso a la información competente para el diseño de estas estructuras.

Debido a que en la actualidad no hay una norma nacional que cubra este tipo de elementos, el ingeniero colombiano se ve en la necesidad de explorar normas extranjeras, interpretarlas y aplicarlas en el contexto local, esto no permite una estandarización de criterios y lenguaje común que facilite la aplicación de estas.

- Debido a las diversas formas estéticas que se pueden lograr con este tipo de estructuras, se observa una tendencia en la que solo se enseña sobre tenso estructuras en las carreras de arquitectura, más no, en ingeniería civil; si bien son carreras complementarias, la arquitectura se enfoca más a la forma que al análisis y diseño estructural, el cual es competencia del campo de la ingeniería, de allí se observa que hay un vacío o discontinuidad en la formación académica sobre estas estructuras, pues habrá quien conciba la forma pero no quien diseñe los elementos; por lo tanto, las universidades deben abrir espacios de aprendizaje completo desde el punto de

vista de diseño estructural de tenso estructuras y de esta forma se promueve un mercado que tiene mucho potencial de crecimiento.

- La ciudad de Medellín le está apostando por convertirse en líder en las industrias 4.0; es importante desarrollar programas informáticos locales que permitan el diseño estructural bajo los códigos nacionales, la mayoría de los softwares disponibles son de origen extranjero los cuales no siempre cubren los parámetros y criterios de diseño bajo las normas colombianas; esto se presenta como una oportunidad de desarrollo informático con gran impacto de innovación local.

Referencias

- ASCE. (2016a). *ASCE/SEI 55-16 Tensile Membrane Structures*.
- ASCE. (2016b). ASCE/SEI 19-16 Structural applications of steel cables for buildings. In *Structural Applications of Steel Cables for Buildings*. American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784414392>
- Comisión Asesora Permanente Para el Régimen de Construcción Sismo Resistente. (2010). *NSR-10 Título A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente*.
- Cueto, E., González, D., Correia, J. A. F. O., Abílio, ·, & de Jesus, M. P. (2017). *An Introduction to Structural Mechanics for Architects Structural Integrity 4 Series Editors*. <http://www.springer.com/series/15775>
- Engel, H. (2001). *Sistemas de estructuras Sistemas estruturais*.
- Fajardo López, J. (2017). *Asociación Porkocolombia Fondo Nacional de la Porcicultura*.
- Goldsmith, N. M. (2008). *Tensoestructuras Desde Uruguay*.
- Junhao Xu, Y. Z. Q. Z. L. Z. (2021). *Experiment and simulation analisys on dynamic response of plane cable-membrane structure under impact load*.
- Jurado-Piña, R., & Salazar-Troya, M. A. (2014). A simple method for the design of tension structures combining topological mapping and nonlinear structural analysis. *Informes de La Construcción*, 66(1), 1–9. <https://doi.org/10.3989/ic.13.090>
- Machado, C. (2014). *Análisis matemático para modelización de estructuras tensadas*.
- Morales-Guzmán, C. C. (2018). Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura. *Revista de Arquitectura*, 20(1), 71–87. <https://doi.org/10.14718/revarq.2018.20.1.1544>
- Pronk, A. (2021). Flexible Forming for Fluid Architecture. In *Flexible Forming for Fluid Architecture*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71551-9>
- Seidel, M. (2009). *Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction*.
- Sen, S. (2015). *Soap Film Modelling: A form finding experiment*.
- Stranghöner, N., Uhlemann, J., Bilginoglu, F., Bletzinger, K.-U., Bögner-Balz, H., Gerhold, S., Gibson, N., Gosling, P., Grunwald, G., Homm, T., Houtman, R., Llorens, J., Malinowsky, M., Marion, J.-M., Mollaert, M., Muratovic, D., Nieger, M., Novati, G., Philipp, B., ... Thomas, J.-C. (2016). *CEN/TC 250/WG 5 Membrane Structures Scientific and Policy Report (SaP-*

Report) Guideline for a European Structural Design of Tensile Membrane Structures Made from Fabrics and Foils.

Marroquín, A. (2012). *TENSOESTRUCTURAS, Guía básica de diseño.*

Torras, A. (2006). *Análisis resistente de estructuras de obra de fábrica mediante redes funiculares simuladas computacionalmente.*

Xu, J., Zhang, Y., Yu, Q., & Zhang, L. (2022). Analysis and design of fabric membrane structures: A systematic review on material and structural performance. In *Thin-Walled Structures* (Vol. 170). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108619>