



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ESTRUCTURAS DE GRANDES LUCES CON USO DE CABLES Y CUBIERTA
FLEXIBLE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RODRIGO IGNACIO CANCINO YÁÑEZ

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO VERDUGO PALMA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ELIZABETH PARRA HENRÍQUEZ
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: RODRIGO IGNACIO CANCINO YÁÑEZ
FECHA: JULIO DE 2018
PROF. GUÍA: SR. ALEJANDRO VERDUGO P.**

ESTRUCTURAS DE GRANDES LUCES CON USO DE CABLES Y CUBIERTA FLEXIBLE

Uno de los grandes problemas de las estructuras que se requieren en grandes espacios libres de elementos en su interior o que posean grandes luces, más específicamente en el ámbito minero, es que estos requieren una gran cantidad de acero al necesitar ser sistemas muy robustos. Esto es un problema principalmente económico debido al alto costo asociado a materiales. Es por esto que se han desarrollado estructuras más ligeras para resolver esta problemática. Muchas de estas soluciones, que están siendo aplicadas en el mundo, contemplan sistemas auto-sostenibles de cables y membranas tensadas flexibles.

Se abordarán todos los aspectos de los cables y membranas, desde sus componentes básicos, materiales y normas que los controlan, ejemplos destacados y métodos de análisis para luego poder aplicar esta experiencia en un ejemplo práctico de un Stockpile minero, en el cual se comparará una solución convencional con elementos rígidos de acero y método constructivo actual con 2 soluciones aplicando los principios aprendidos de estructuras ligeras. Dentro de la experiencia se verán todas las dificultades que implica tratar con estructuras de cables o membranas a tener en consideración si se desea en un futuro trabajar con estos sistemas.

La finalidad de esta memoria es poder extrapolar estas experiencias en la realidad de Chile y más específico para la gran minería. Aquí se entregan las bases y consideraciones que debe tener alguien para poder materializar un proyecto con estas características.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi familia por todo el apoyo entregado en todos los años de educación formal e informal y que de alguna manera culminan con la entrega de esta memoria pero sé que siempre estarán ahí cuando lo necesite.

También agradecer a mi profesor guía Alejandro Verdugo Palma por permitirme realizar este trabajo con él, por aconsejar el camino que debía seguir, por entregar tanto tiempo en este extenso proyecto y ser, como bien mencioné antes un, guía. A la profesora Elizabeth Parra y el profesor Juan Felipe Beltrán por ayudarme a afinar esos (grandes) detalles que le hacían falta a este trabajo y poder terminarlo de la manera más completa posible.

Agradecer a todos los profesores de la facultad quienes me formaron en estos años a ser la persona que soy, me entregaron los conocimientos suficientes para enfrentar el mundo laboral como ingeniero y ser la parte visible de la Universidad de Chile.

A mis amigos de toda la vida con quienes he pasado la mayor parte del tiempo fuera de la universidad e incluso algunos con los que la viví y enseñan todo lo que las personas antes mencionadas no pueden.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos Generales.....	1
1.3 Metodología	2
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS	3
2.1 Conceptos básicos.....	3
2.2 Componentes y partes de un cable.....	6
2.2.1 Cordones.....	7
2.2.2 Cables de alambres.....	10
2.3 Descripción de Bases de Sistemas con Cables	11
2.3.1 Problemas encontrados en el diseño de estructuras con cables.....	11
2.3.2 Consideraciones al momento de elegir un sistema basado en cables	14
2.4 Descripción de membranas flexibles tensionadas	15
2.5 Descripción de Sistema Tensegrity.....	18
2.6 Descripción de Comportamientos sistema Cable-Stayed	21
CAPÍTULO 3: BASES DE DISEÑO	23
3.1 Cables.....	23
3.1.1 Materiales.....	23
3.1.1.1 ASTM A368-95a /2013) Standard specification for stainless steel wire strand.....	24
3.1.1.2 ASTM A474-03 (2013) Standard specification for aluminum-coated steel wire strand.	25
3.1.1.3 ASTM A475-03 (2014) Standard specification for zinc-coated steel wire strand.....	25
3.1.1.4 ASTM A492-95 (2013) Standard specification for stainless steel rope wire.	25
3.1.1.5 ASTM A586-04a (2014) Standard specification for zinc-coated parallel and helical steel wire structural strand.	26
3.1.1.6 ASTM A603-98 (2014) Standard specification for zinc-coated steel structural wire rope.....	26
3.1.1.7 ASTM A855/A855M-03 (2014) Standard specification for zinc-5% aluminum-mischmetal Alloy-coated steel wire strand.....	26
3.1.1.8 ASTM A1023/A1023M-15 Standard specification for carbon steel wire ropes for general purposes. Table 7.	27

3.1.1.9	ASTM A1007-15 'Standard specification for carbon Steel wire for wire rope'	27
3.1.2	Parámetros físicos y mecánicos	29
3.1.3	Vida Útil, protecciones a la corrosión.....	32
3.1.4	Protección al fuego	33
3.1.5	Componentes de conexión, sistemas patentados	33
3.1.6	Sistemas de Tensado, durante la construcción	36
3.1.7	Propiedades especiales de los cables.....	38
3.2	Membranas	39
3.2.1	Parámetros físicos y mecánicos	40
3.2.2	Vida Útil, protecciones a agentes externos y al fuego	42
3.2.3	Componentes de conexión, sistemas patentados	44
3.2.4	Sistemas de Tensado, durante la construcción	49
3.3	Análisis estructural	50
3.3.1	No linealidad en cables.....	50
3.3.2	No linealidad en membranas	52
3.4	Normativas de Diseño	52
3.4.1	Cables	52
3.4.2	Membranas.....	53
3.4.3	Consideraciones y procedimiento en el diseño de membranas.....	55
3.4.4	Control de deformaciones.....	57
CAPÍTULO 4:	CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS	59
4.1	Preparación del trabajo y pre ensamblado.....	59
4.2	Levantamiento y colgado de elementos	60
4.3	Introducción de cargas y pretensado	61
CAPÍTULO 5:	CASO DE ESTUDIO Y POSIBLES SOLUCIONES	63
5.1	Descripción del caso a estudiar	63
5.2	Descripción Solución Base.....	66
5.2.1	Cargas propias del modelo.....	67
5.2.2	Modelo y resultados.....	68
5.3	Descripción Solución 1 al Caso de Estudio, domo Tensegrity	70
5.4	Descripción Solución 2 al Caso de Estudio.....	74
CAPÍTULO 6:	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS	78

CAPÍTULO 7: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	82
7.1 Problemas asociados al diseño y modelación de estructuras con uso de cables	82
7.2 Conclusiones y comentarios	82
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO A: CÓMO MODELAR UN CABLE EN SAP 2000	87
ANEXO B: PROCESO DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURA BÁSICA	95
ANEXO C: PROCESO DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURA CON TENSEGRITY ...	98
ANEXO D: PROCESO DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURA CON MEMBRANA FLEXIBLE	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Estándar aplicados a materiales usados en cables de acero	24
Tabla II. Cargas utilizadas	65
Tabla III. Cargas especiales modelo.....	68
Tabla IV. Pesos elementos y estructura	69
Tabla V. Desplazamientos punto superior para cada combinación	69
Tabla VI. Pesos elementos y estructura	73
Tabla VII. Largos totales de los cables	73
Tabla VIII. Desplazamientos punto superior para cada combinación	74
Tabla IX. Parámetros estructurales de la membrana.....	75
Tabla X. Pesos elementos y estructura	77
Tabla XI. Largos totales de los cables	77
Tabla XII. Desplazamientos punto superior para cada combinación	77
Tabla XIII. Comparativa de peso de acero y cables en las 3 soluciones	78
Tabla XIV. Largos totales de los cables en estructura Tensegrity y membranas.....	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Formas adoptadas por los cables bajo la acción de diferentes fuerzas (Autor).	4
Figura 2. Modelo hecho por Gaudí de cuerdas y pesos de la catedral de la Sagrada Familia para determinar su forma. (https://www.cloudfreephoto.com/Travel/Barcelona-2011/Barcelona-2011-La-Sagrada/i-P37vfk6).....	5
Figura 3. Acercamiento de modelo de cuerdas y pesos. En la imagen se observan las formas que adoptan acorde a las cargas solicitadas. (Memetican 2007).	6
Figura 4. Identificación de las diferentes partes y componentes de un cable. (ASTM A1023/A1023M-15).	7
Figura 5. (a) Cordón con forma triangular, en el que se usa como núcleo un elemento sólido o polímero en vez de un alambre. (b) Cordón con forma circular con diferentes capas de alambres de distintos diámetros. (c) Cordón compactado, antes y después de la compresión. Se observa que los alambres adoptan distintas formas de manera que no queden espacios en la sección. (ASTM A1023/A1023M-15)	8
Figura 6. (a) Cordón compuesto. (b) Cordón relleno. (c) Cordón tipo Seale. (d) Cordón tipo Warrington. (ASTM A1023/A1023M-15).	9
Figura 7. Demostración del largo del entramado de un alambre en un cordón (https://www.vornbaeumen.de/en/service/technical-notes/length-of-lay-type-of-lay-and-direction-of-lay.html).	10
Figura 8. Ejemplo de las 2 direcciones en la que un alambre puede ir en un cordón. La z representa una dirección hacia la derecha y una s representa la dirección hacia la izquierda. (ASTM A1023/A1023M-15).	10
Figura 9. Diferentes configuraciones posibles de cables. (a) Entramado regular hacia la derecha. (b) Entramado regular hacia la izquierda. (c) Entramado de Lang hacia la derecha. (d) Entramado de Lang hacia la izquierda. (ASTM A1023/A1023M-15).	11
Figura 10. Secuencia de montaje de techo con estructuración tipo Tensegrity. (http://www.pages.drexel.edu/~nrr24/ae390/a003/parameters.htm).	13
Figura 11. Diagrama de tensiones sobre una membrana con doble curvatura (http://www.architen.com/articles/basic-theories-of-tensile-membrane-architecture/). ...	15
Figura 12. Techo sobre centro deportivo. En esta imagen se muestran las curvaturas que pueden alcanzar las membranas. (http://www.architen.com/products/standard-system-3/).	16
Figura 13. Velódromo de Peñalolén. El techo es construido con membranas tensadas como se observa en la imagen (http://www.disenararquitectura.cl/velodromo-penalolen/).....	17
Figura 14. Elemento base de estructura espacial utilizando Tensegrity. Las cuerdas (color blanco) se encuentran en tracción pura mientras que los palos (color café) presentan esfuerzos de compresión pura. (http://www.tensegriteit.nl/e-simple.html).	19

Figura 15. Domo diseñado mediante sistema Tensegrity "falso" según lo estipulado por Snelson. (http://www.structuremag.org/?p=7578).....	20
Figura 16. Corte en elevación de domo construido mediante 'Tensegrity' indicando sus componentes (Autor).	21
Figura 17. Diagrama Corte de centro atlético de la Universidad de California. Se distingue mástiles de cables y estructura de techo (Design Considerations in Cable-Stayed Roof Structures, David E. Eckmann, Stephanie J. Hautzinger, Thomas R. Meyer).	22
Figura 18. Identificación de los dos tipos principales de cables que se usan como elementos estructurales en construcciones. (a) 'Steel wire strand', que corresponde a cordón de alambres único. (b) 'Steel wire rope' que corresponde al cable compuesto por varios cordones. (http://www.uscargocontrol.com/Rigging-Supplies-Hardware/Wire-Rope).	28
Figura 19. Corrosión situada en la conexión y fijación de 2 cables debido a la pérdida de protección. (http://www2.ceab.csic.es/oceans/Web/News/2014_09_26.html).	32
Figura 20. Tramo de cable con conexión encajada en un extremo. (http://shawsent.com/products/wire-rope-slings).	34
Figura 21. Sección de cable con cabo en un extremo. En esta imagen se aprecia la protección a en la punta para evitar daños en el cable (https://www.gamut.com/c/material-handling-storage/wire-rope-sleeves-clips-thimbles).	34
Figura 22. Conexión de 3 cables hacia el pedestal de una fundación. Se puede ver que el cable está conectado a un cabo o estrobo y este a la placa metálica situada en el pedestal. (https://www.vastavalo.net/isoneva-pomarkku-isoneva-pomarkku-tukivaijerien-ankkurointi-maahan-505928.html).	35
Figura 23. Presa hidráulica (http://www.fpt-worldwide.com/en/works/hydraulic-system-for-tensioning-ropes/).	37
Figura 24. Huinche manual siendo utilizado. (http://www.fireengineering.com/articles/urban-firefighter/print-articles/volume-01/issue-07/griphoist.html).	38
Figura 25. Indicación de cuál es la trama y cuál es la urdimbre (https://unmundodemateriales.wordpress.com/2016/02/09/que-son-las-fibras-textiles/).	40
Figura 26. Modos de conexión de bordes en membranas. Se puede ver que por un lado la membrana está unida a una viga metálica y que por el otro se encuentra conectada a un cable. (http://alluae.ae/tensile-fabric-structures-ajman/).	46
Figura 27. Conexión de borde utilizando cables. Aquí se aprecia las conexiones individuales utilizando el método de prensa. (http://www.spaziosolare.com/velarias/).	47
Figura 28. Conexión rígida de membrana con viga. Se puede observar la placa que está siendo utilizada para este fin. (Birdair).....	48

Figura 29. Placa de esquina en donde confluyen dos bordes. Se pueden ver los elementos de borde (cables) siendo conectados a la placa de manera paralela (http://www.eksentent.com/icerik/89/147/ASMA-GERME-MEMBRAN-TEKN%C4%B0K-DETAYLAR).	49
Figura 30. Placa de agarre en al membrana. Se puede ver que por un lado se conecta la fijación hacia otros elementos estructurales y por el otro la placa que se conecta a la membrana y los cables de borde (http://www.downerint.com/service/tensile-canopy-structures-2/detail/).	50
Figura 31. Curva de tensión-deformación de un cable en carga y descarga. En ella se rotulan los diferentes módulos de elasticidad. $E_{t\ down}(\sigma_z)$ y $E_{t\ up}(\sigma_z)$ corresponden a los módulos de elasticidad a una tensión dada que se aprecian en un cable cuando este va en descarga o carga respectivamente, $E_s(0, \sigma_z)$ es el módulo cuando no presenta carga y $E_s(\sigma_{lower}, \sigma_{upper})$ como la ponderación de los módulos cuando está con menor y mayor carga. (Wire Ropes tension, endurance, reliability. Feyrer, K.).	51
Figura 32. (a) Stockpile con forma cónica; (b) Stockpile con forma de cono alargado; (c) Stockpile circular. (http://www.perilya.com.au/our-business/operations/cerro-de-maimon).	64
Figura 33. Configuración de carga viva en un acopio por vaciado en su base (http://jenike.com/engineering/stockpiles/).....	64
Figura 34. Dimensiones generales del stockpile (Autor).	65
Figura 35. Domo en minera de Zinc Skorpion, Namibia. Estructura similar a la considerada en este trabajo. (http://www.mining-journal.com/profit-amp-loss/news/1311390/zinc-production-prices-boost-vedanta-earnings).....	67
Figura 36. Modelo computacional de la solución base (Autor).....	69
Figura 37. Fotografía aérea del estadio Unico de La Plata. En ella se puede ver el entramado de cables que forman parte del sistema de Tensegrity. (http://tensegritywiki.com/La+Plata+Stadium).	70
Figura 38. Corte en elevación de esquema del modelo Tensegrity. El diámetro de la estructura es de 171.24 [m]. (Autor).	71
Figura 39. Modelo computacional SAP 2000 para la solución en base a Tensegrity (Autor).	72
Figura 40. Vista interior del velódromo de Peñalolén. Se pueden apreciar las vigas que sirven de apoyo rígido a la membrana	75
Figura 41. Modelo computacional SAP 2000 del domo con estructura tensionada. (Autor).	76
Figura 42. Elevación comparativa y acotada entre las diferentes estructuraciones, en verde está el 'Stockpile', en azul la estructura base y la que posee membranas y en rojo la estructura que utiliza el sistema 'Tensegrity'	80
Figura 43. Ventana de definición de sección de un cable. (SAP 2000).	88
Figura 44. Modificadores de propiedades físicas o rigidez de los cables.....	88
Figura 45. Selección de elemento 'Cable'.....	89

Figura 46. Ventana de dibujo de un cable desplegada al trazar una línea entre dos puntos.	89
Figura 47. Parámetros posibles de modificar en el dibujo de un cable (SAP 2000).	91
Figura 48. Parámetros y ventanas que se activan acorde al tipo de cable que se esta trabajando (SAP 2000).	91
Figura 49. Propiedades de los cables, ejes locales, parámetros de forma y dimensiones (Manual SAP 2000).	92
Figura 50. Tipos de cargas que pueden ser aplicadas a los cables.	93
Figura 51. Sección donde se define la no linealidad del análisis de las cargas en cables.	94
Figura 52. Determinación de la forma de la estructura base (Autor).	95
Figura 53. Vista en planta de la estructura base. Aquí se puede apreciar las diferentes caras del domo separadas por las vigas de color azul y el área de la esfera en color rojo. (Autor).	96
Figura 54. Modelo computacional de la solución base (Autor).	97
Figura 55. Distribución de los cables en planta del Estadio Único de la Plata. Aquí se observa la forma ovalada que adopta la cubierta y las dos crestas que presenta la estructura. Cortesía de Federico García Zúñiga.	98
Figura 56. Secciones en las que se dividió la estructura para determinar el nivel de pretensado en los cables. (a) Estructura original, (b) Primera sub división que contempla nivel 1 y 2 de cables en color morado, (c) Segunda sub división que contempla niveles 2 y 3 de cables en color verde, (d) Tercera sub división que contempla niveles 3 y 4 de cables en color rojo.	100
Figura 57. Esqueleto base de la solución con membranas flexibles.	101
Figura 58. Curvatura idealizada (Izquierda) y curvatura simplificada por cables (Derecha) de una membrana sobre el domo del modelo optimizado.	102
Figura 59. Diagonales de cables para agregar rigidez a la torsión en la estructura. En azul se ven los elementos rígidos, en verde los cables que simulan la membrana y en rojo los cables diagonales.	103

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Este trabajo de título pretende evaluar una solución para estructuras de cubierta de grandes luces basada en la utilización de cables y cubiertas flexibles. Actualmente en Chile, el diseño y construcción de estructuras de cubierta de grandes luces considera mayoritariamente soluciones 'convencionales', es decir, se utilizan estructuras conformadas por elementos prismáticos de acero (vigas, barras, columnas), que resultan ser relativamente robustas y con un alto costo. Para ciertas aplicaciones, algunas soluciones basadas en sistemas estereométricos han sido implementadas exitosamente, resultando ser una alternativa menos costosa y con valor arquitectónico agregado.

En los países desarrollados, el diseño y construcción de estructuras de grandes luces con uso intensivo de cables y cubiertas flexibles ha tenido un desarrollo notable en las últimas décadas. Constituyen hoy una alternativa técnicamente factible y de mucho menor costo que los sistemas convencionales. Las aplicaciones más llamativas corresponden a grandes recintos deportivos, ferias de exposición o áreas para espectáculos. Su uso, sin embargo, se ha extendido a un sinnúmero de aplicaciones, desde edificaciones y bodegas, hasta hangares e instalaciones industriales temporales. A la fecha, en Chile su uso ha sido escaso, limitado a algunos pocos recintos cubiertos en centros comerciales, cubierta parcial en estadios y unas pocas instalaciones industriales de carácter temporal.

Conforme avance el desarrollo económico del país, crecerá la necesidad de obras de gran envergadura, para las cuales las estructuras con uso de cables y cubiertas flexibles constituirán una opción técnica y económica a tener en cuenta. Por lo anterior, resulta recomendable familiarizarse con los fundamentos de su funcionamiento y abordar el análisis de los aspectos relevantes que, en cada caso, determinan su viabilidad.

Para materializar este propósito, se analizará el caso de la cobertura de una pila de acopio de mineral (stockpile). Este caso corresponde a una estructura de grandes luces típica de las faenas mineras, que ha sido resuelta con diversos diseños y, por tanto, permite establecer la conveniencia relativa de una estructura con cables y cubiertas flexibles, frente a otras soluciones.

1.2 Objetivos Generales

El objetivo general de esta memoria de título es analizar los conceptos de diseño y construcción de estructuras de grandes luces que utilizan cables y cubiertas flexibles, cuya utilización en muy poco frecuente en nuestro país.

Estos sistemas presentan diferencias notables respecto a las estructuras rígidas convencionales, desde las bases mismas del diseño hasta el análisis estructural y el dimensionamiento. Un objetivo complementario que se pretende abordar con este trabajo

es la difusión de los conceptos básicos del diseño de este tipo de estructuras, de manera de facilitar su estudio y aplicación.

Como objetivo específico, se evaluará la factibilidad técnica y económica del uso de una estructura con cables y cubiertas flexibles para la cobertura de una pila cónica de acopio de mineral (stockpile), de 108 m de diámetro y 45 m de altura. La evaluación comparará, en términos gruesos, costos, plazos y riesgos respecto a otras 2 alternativas: una estructura de acero convencional, y una estructura geodésica (tipo domo). La estructura convencional será diseñada, valorizada y evaluada. En general, la solución de domo responde a un diseño patentado y metodología de montaje propia de cada proveedor por lo que la estimación de costos de esta alternativa será sustentada con información comercial de estudios y proyectos ya ejecutados.

1.3 Metodología

En primer lugar, se entregarán las características del caso de estudio. Se definirá la geometría básica de la pila de acopio, se establecerán las condiciones de sitio y operación y los criterios de diseño.

Luego, se estudiarán soluciones estructurales conceptuales a utilizar por cada alternativa (convencional, domo, y basada en cables y cubiertas flexibles) para el caso en cuestión.

En el caso de la estructura con cables y cubiertas flexibles, se revisará la bibliografía de aspectos teóricos (distintos sistemas y sus fundamentos, análisis, dimensionamiento) y de proyectos ejecutados. Considerando que estas estructuras presentan una variedad prácticamente ilimitada de configuraciones, esta fase de revisión de antecedentes aportará el conocimiento necesario para decidir (de entre varias opciones) el diseño que será finalmente desarrollado y evaluado.

Una vez determinado el diseño conceptual para cada alternativa, se procederá a desarrollar el diseño básico que sustentará la evaluación técnica y económica.

Para la estructura de acero convencional, se desarrollará un modelo computacional de análisis, que permitirá realizar el dimensionamiento

Para el domo estereométrico, se contactará a proveedores y se revisará información histórica de estudios y proyectos ya ejecutados, todo esto con el fin de definir las características generales de la estructura.

Para la estructura con cables y cubiertas flexibles se desarrollará un modelo de análisis computacional. Se estudiará la capacidad de los programas de análisis computacional disponibles, para modelar cables y cubiertas flexibles. De ser necesario, por las limitaciones del software, se implementará un modelo simplificado. El modelo aportará la información requerida para el dimensionamiento.

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS

2.1 Conceptos básicos

En muchas obras de ingeniería se utilizan cables para soportar y transmitir cargas de un elemento a otro debido a sus propiedades estructurales características. Uno de los ejemplos más conocidos del uso de cables son los puentes colgantes. Ésta es solo una de las muchas formas en las que se puede usar este elemento. Esta memoria pretende, entre otras cosas, mostrar otras aplicaciones posibles.

Los cables son elementos estructurales lineales, en otras palabras, las dimensiones de sus secciones son muy pequeñas en comparación a las longitudes que pueden alcanzar. Una característica importante es que estos poseen gran flexibilidad y de los tres esfuerzos posibles en elementos estructurales, los cables solo son capaces de ofrecer resistencia a cargas axiales de tracción lo que los hace uno de los elementos con propiedades estructurales más específicos.

Otra de las propiedades importantes de los cables es que gracias a su flexibilidad y cualidad de entregar solo rigidez a los esfuerzos de tracción es que, dependiendo de la magnitud de las cargas que se le impongan, adquiere diferentes configuraciones geométricas, acorde a las ecuaciones de equilibrio de fuerzas internas. Tómese el caso de un cable inextensible, colóquese este en dos puntos de apoyo, uno en cada extremo del cable y aléjense el uno del otro hasta estar a una distancia igual a la longitud del cable. Este se mantendrá recto si no hay otra fuerza externa siendo aplicada (**Figura 1 (a)**). Si en el ejemplo anterior se tensara más en forma axial el cable no cambiaría de forma porque se encontraría en equilibrio. Tomando el mismo ejemplo del cable inextensible pero esta vez los apoyos se encuentran a una distancia menor a la longitud de este, sin otro tipo de cargas más que las de su propio peso, entonces tomará forma de catenaria (ver **Figura 1 (b)**). Si al ejemplo anterior de la catenaria ahora se le agrega una carga uniformemente distribuida por sobre el cable, este adoptará ahora una forma parabólica (Ver **Figura 1 (c)**). Por último, si a un cable en estado de catenaria, proporcionada solo por su peso propio, se le colocan varias cargas puntuales a lo largo del mismo, este tomará una forma poligonal acorde a las magnitudes de las cargas y con tramos rectos entre los puntos de aplicación de las mismas (Ver **Figura 1 (d)**).

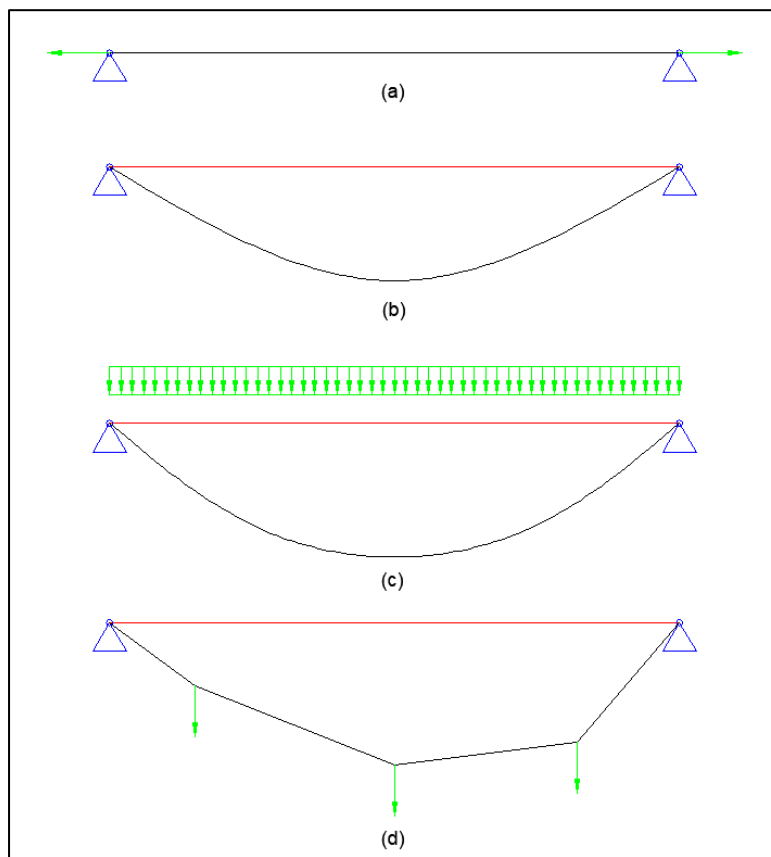


Figura 1. Formas adoptadas por los cables bajo la acción de diferentes fuerzas (Autor).

Este comportamiento tan dinámico del cable respecto a las cargas que se le aplican, y su disposición acorde al equilibrio interno, hace que los cálculos que contengan cables resulten más engorrosos que los que solo contienen elementos rígidos. Muchas veces es necesario que los programas computacionales realicen cálculos no lineales, por la geometría cambiante, para poder obtener resultados aceptables y que reflejen los comportamientos reales de los mismos.

Se puede hacer una analogía del funcionamiento de los cables con la de los arcos ya que ambos parecieran tener elementos en común. Si se observa la forma parabólica que toma el cable cuando es sometido a una carga uniforme, esta es idéntica a la de un arco que soporta una carga uniforme sobre él. La diferencia es que el cable presenta esfuerzos de tracción puro mientras que el arco trabaja a compresión. En ambos casos ninguna estructura presenta momentos de flexión sobre ella por la correcta distribución de las cargas en el arco y las propiedades intrínsecas del cable. Otra diferencia es que los cables pueden mantenerse sin momentos a pesar de que el estado de cargas cambie ya que, como vimos anteriormente, se adapta a la forma óptima en donde las ecuaciones internas se satisfacen. No ocurre lo mismo con los arcos ya que, fuera de este estado ideal de cargas uniformes, la más mínima diferencia induciría a la presencia de momentos debido a que no puede cambiar su forma al ser construido de materiales rígidos.

Esta analogía fue utilizada como herramienta de diseño en el pasado. La geometría requerida para los arcos era determinada en un modelo “inverso” de cuerdas

y pesos. Como ejemplo, en el pasado reciente, tenemos los modelos de cuerdas y pesos utilizados por Gaudí en el estudio de varias de sus obras. Una de las más famosas es la Catedral de la Sagrada Familia ubicada en Barcelona, España. En la **Figura 2** se muestra el “plano” que diseñó para la estructura basada en la propiedad inversa mencionada de los cables. Gaudí estimaba las cargas que los arcos soportarían y las colocaba en el modelo como sacos para determinar la forma de manera tal que se diera la funicular de cargas y los arcos no presentaran momentos flectores.

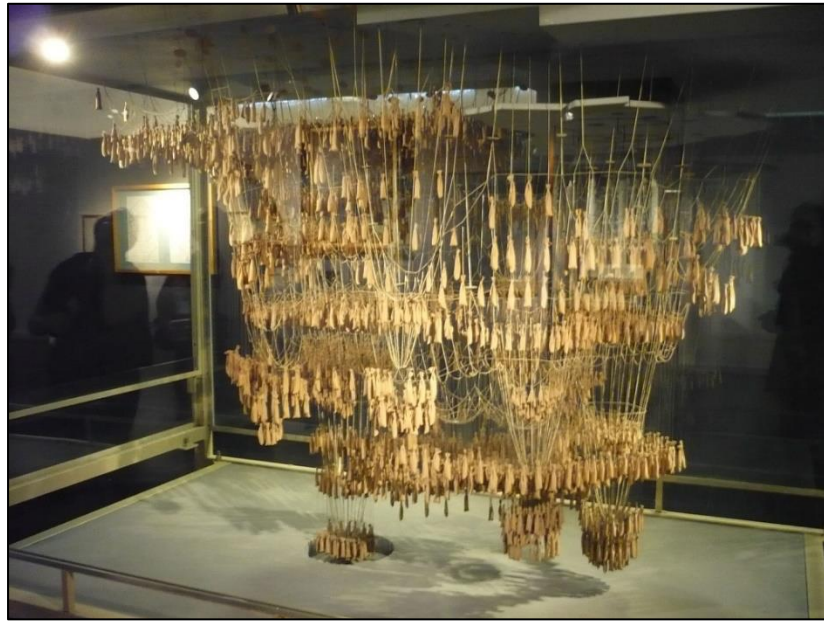


Figura 2. Modelo hecho por Gaudí de cuerdas y pesos de la catedral de la Sagrada Família para determinar su forma. (<https://www.cloudfreephotography.com/Travel/Barcelona-2011/Barcelona-2011-La-Sagrada/i-P37vfk6>).



Figura 3. Acercamiento de modelo de cuerdas y pesos. En la imagen se observan las formas que adoptan acorde a las cargas solicitadas. (Memetican 2007).

Tal como se ve en la **Figura 3**, las formas que adoptan los cables debido a los pesos colocados corresponde a lo indicado en los comportamientos de los mismos en base a que en ese estado de equilibrio no hay esfuerzos en ellos más que tensiones axiales. Colocando las cargas adecuadas y la cantidad de arcos (cables en el modelo) en la estructura para darle las dimensiones necesarias, se puede obtener la forma en la que sea sustentable.

2.2 Componentes y partes de un cable

Los cables como se explicó anteriormente son elementos lineales considerados muchas veces como uni-dimensionales al momento de modelar sus efectos en las distintas estructuras. Pero su composición es mucho más compleja de lo que se representa en modelos o se simplifica para los cálculos.

Los cables y cuerdas pueden ser separados en dos grandes grupos dependiendo de su comportamiento mecánico. Existen los que se denominan cuerdas dinámicas las que tienen como característica especial que pueden elongarse más fácilmente que su contraparte las cuerdas estáticas. Estas últimas se deforman acorde a las propiedades de sus materiales, secciones y módulos de elasticidad pero sin facilitar este proceso. Según la literatura, la variación de las cuerdas dinámicas es de alrededor de 3-5% superiores a las de las estáticas bajo el efecto de cargas. Esta propiedad puede alcanzarse con varios materiales, sobre todo los compuestos por polímeros o fibras naturales. Los cables, que son fabricados con acero inoxidable, que son los usados en la construcción, son del tipo estático y pueden ser utilizados en sistemas estructurales de hasta tres direcciones. Como para la construcción de sistemas tensados que utilicen cables se usan solo los fabricados en acero, se explicará en detalle este caso.

Los cables de acero pueden presentar varias geometrías, secciones efectivas de cables, modos de fabricación, tipos de protecciones, etc., pero todos cuentan con un elemento esencial, el alambre, que es la base de su construcción. Un alambre puede ser usado como elemento central, el cual es tejido en forma de espiral con más alambres de acero, los cuales pueden estar en varias capas, para formar un cordón. La denominación

de cordón es usada cuando este elemento es posteriormente tejido por sobre otro elemento el cual es llamado alma del cable, para formar un elemento más robusto y con mejores propiedades resistentes. Sin embargo el cordón también puede ser usado como elemento independiente y formar un cable por sí mismo para ser utilizado en algún proyecto. Los cordones, al igual que los alambres que lo conforman, pueden ser incorporados alrededor del alma del cable en varias capas formando así un elemento con mayor sección y por lo tanto mayor resistencia. El alma de un cable puede ser de varios tipos. Usualmente se compone de un cordón de acero que se utiliza como base para las posteriores espirales del mismo material, pero también existen los que son de fibras sintéticas o que simplemente son rellenos de polímeros sólidos (**Figura 4**).

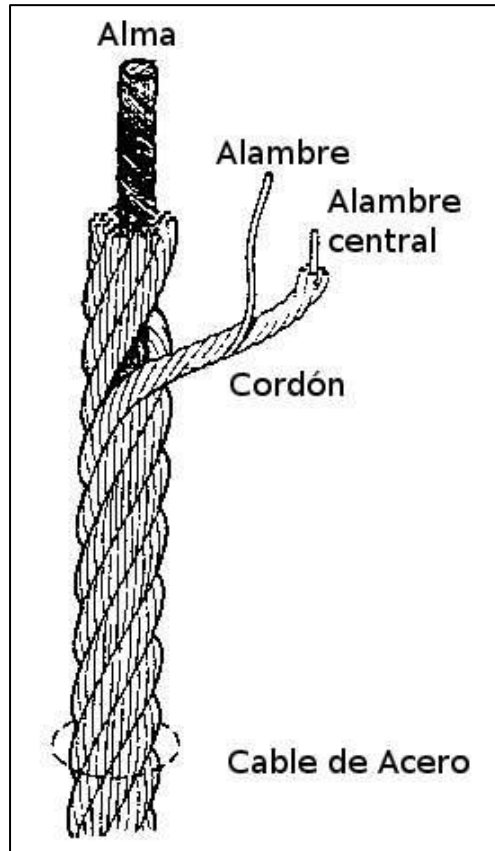


Figura 4. Identificación de las diferentes partes y componentes de un cable. (ASTM A1023/A1023M-15).

Los cables o cordones pueden ser clasificados y separados en varios tipos según diferentes criterios, como sección transversal, modo de confección o construcción, dirección de las fibras, etc.

2.2.1 Cordones

Los cordones, como se dijo anteriormente, son un conjunto de alambres tejidos en espiral alrededor de un elemento central que usualmente suele ser otro alambre. La primera diferenciación que se puede dar es por la forma de la sección de cordón que se usa. Puede tener forma triangular (**Figura 5 (a)**) o redonda (**Figura 5 (b)**) que son las más

utilizadas. Además, el cordón puede ser del tipo compactado y los alambres adoptar formas no definidas como se observa en la **Figura 5** (c). Para adoptar estas formas es necesario de procesos adicionales como que el arreglo interno de los cables cumpla ciertas características. Las formas redondeadas son las más comunes y simples de fabricar ya que partiendo de un núcleo central, al ir enrollando y embarrilando otros alambres de forma uniforme, es posible lograrla. Pero para poder formar secciones triangulares se deben adoptar medidas extras que básicamente son arreglos de grupos de alambres como pirámides (pirámide de 6 alambres como base por ejemplo) o elementos sólidos como base central. Las compactaciones se realizan una vez construido la sección de cordón el que es posteriormente pasado por rodillos especiales y así reducir el espacio libre entre alambres. Los cordones compactados pueden alcanzar hasta un 95% de ocupación y son generalmente utilizados como cables por los que pasan poleas o rodamientos sobre ellos.

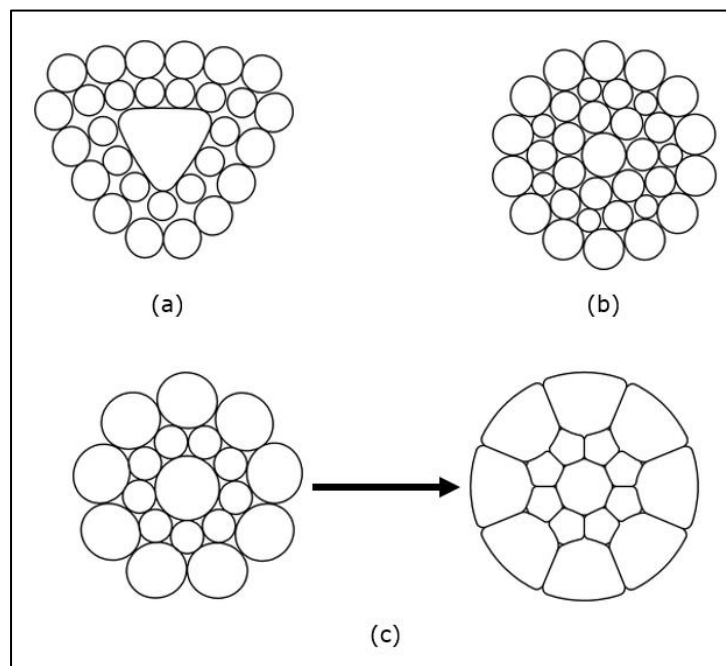


Figura 5. (a) Cordón con forma triangular, en el que se usa como núcleo un elemento sólido o polímero en vez de un alambre. (b) Cordón con forma circular con diferentes capas de alambres de distintos diámetros. (c) Cordón compactado, antes y después de la compresión. Se observa que los alambres adoptan distintas formas de manera que no queden espacios en la sección. (ASTM A1023/A1023M-15)

Otra forma de diferenciar los cordones es por el tipo de construcción que tienen. Esto se ve en la forma del arreglo que tienen los alambres dentro de ellos ya sea por la cantidad o por los diferentes diámetros que poseen. Hay dos grandes grupos dentro de esta categoría que son los cordones tejidos en operaciones múltiples y los paralelos.

Los cordones fabricados en varias operaciones pueden ser de dos tipos: los compuestos que son aquellos que poseen a lo menos tres capas de alambres los cuales fueron entramados en varios intentos pero que siguen la misma dirección de giro; y los cruzados, en que las diferentes capas no tienen el mismo largo de entramado y por

consiguiente no poseen el mismo ángulo de giro. Esto produce que entre las diferentes capas existan puntos de contacto no continuos lo que hace que la distribución de cargas no sea lineal.

Los cordones que son entramados en paralelo son aquellos en que a lo menos dos capas de alambres son colocadas en una sola operación y poseen cuatro sub-grupos: los combinados que son el uso de dos o más métodos de entramado de alguno de los otros sub-grupos de la clasificación (**Figura 6 (a)**); los rellenos que son aquellos que la capa externa de alambres posee el doble del número que la interna y para ocupar el espacio que se forma entre las capas se usan alambres de menor diámetro llamados 'alambres de relleno' (**Figura 6 (b)**); las Seale que son aquellos cordones que la capa exterior de alambres posee el mismo número que la interior (**Figura 6 (c)**); y por último las Warrington que son los que la capa exterior posee el doble de cantidad de alambres que la interior pero alterna los diámetros de estos (**Figura 6 (d)**).

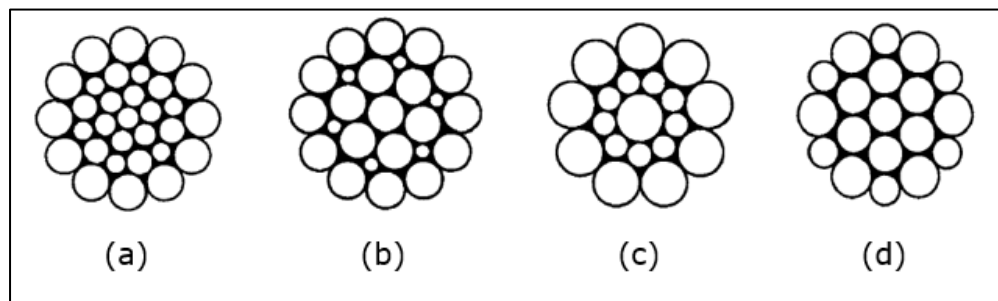


Figura 6. (a) Cordon compuesto. (b) Cordon relleno. (c) Cordon tipo Seale. (d) Cordon tipo Warrington. (ASTM A1023/A1023M-15).

Los alambres dentro de los cordones pueden ser clasificados también acorde a las funciones que estos presentan. Los alambres de relleno son usados para ocupar el espacio que puede haber entre las diferentes capas de alambres y usualmente son de menor diámetro que el resto. Los alambres principales o captadores de carga son aquellos que se consideran que aportan a la resistencia del cordón a la rotura. Los alambres no captadores de carga son aquellos que no son considerados en la determinación de la resistencia del elemento. Los alambres sujetadores son aquellos que son utilizados como apoyo para sostener otro conjunto de alambres en la posición de ensamblaje.

Otra propiedad importante y que diferencia a los cordones es el largo del entramado de los alambres que se están colocando. El largo se mide como la distancia paralela al eje de dirección del cordón que se obtiene entre dos puntos de un mismo elemento que da una vuelta completa alrededor del eje central o núcleo (**Figura 7**). El largo del entramado está determinado directamente por la cantidad de giros que se den de un alambre alrededor del núcleo dado una longitud del cordón específica. Un largo mayor significa que los alambres entramados tienen una dirección más cercana a la del eje del cable por lo que se usará menor cantidad para llegar de un extremo a otro que un cordón que posea un largo de entramado menor.

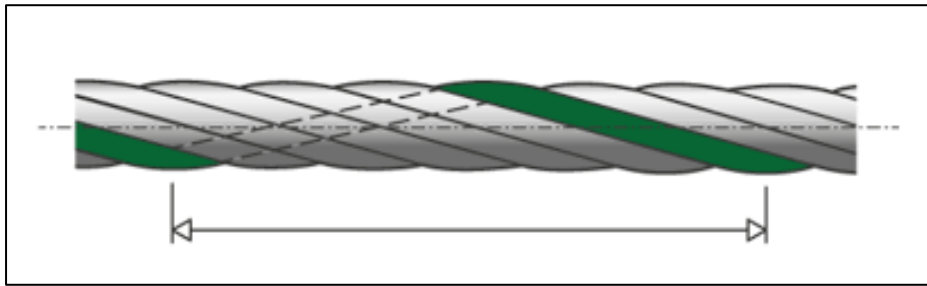


Figura 7. Demostración del largo del entramado de un alambre en un cordón (<https://www.vornbaeumen.de/en/service/technical-notes/length-of-lay-type-of-lay-and-direction-of-lay.html>).

Dentro del mismo tema del entramado, la dirección en la que los alambres son enrollados con respecto al eje del cordón toma relevancia sobre todo cuando se usan varias capas de alambres o los cordones son luego utilizados en la construcción de cables. Hay dos posibles direcciones de entramado: izquierda o derecha. Cada una se identifica con una letra siendo la 'z' para cuando el entramado es hacia la derecha y una 's' si este es en dirección izquierda. Esto viene de la parte diagonal de las letras que va en una dirección u otra (**Figura 8**).

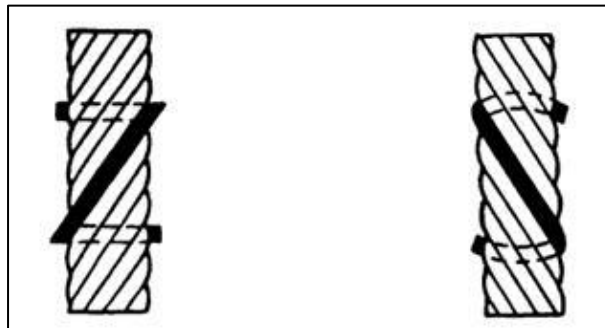


Figura 8. Ejemplo de las 2 direcciones en la que un alambre puede ir en un cordón. La z representa una dirección hacia la derecha y una s representa la dirección hacia la izquierda. (ASTM A1023/A1023M-15).

2.2.2 Cables de alambres

Los cables poseen una cantidad de configuraciones considerables y por lo tanto las clasificaciones de estos se hacen necesarias, además de tener en consideración las características que diferencian unos de otros. Una de las principales formas de diferenciar los cables es que la dirección del entramado de los alambres en los cordones exteriores sea igual o contraria a la que presenta el mismo cordón en torno al núcleo. Existen varias denominaciones y posibilidades en que se presenten los cables: está la forma regular, en la que la dirección del entramado de los cordones exteriores es contraria a la que lleva el cordón alrededor del núcleo central (ya sea izquierda-derecha (zS) o derecha-izquierda (sZ)) y está la forma en la que el entramado exterior y el del cordón en torno al núcleo central se mantienen en la misma dirección (zZ o sS), el cual es llamado entramado de Lang (**Figura 9**). Los cables que se construyen con la forma de Lang son extremadamente duraderos y más flexibles que los entramados de la forma regular, pero

estos últimos tienen menor tendencia a torcerse y son menos susceptibles a daños por tierra y deformaciones.

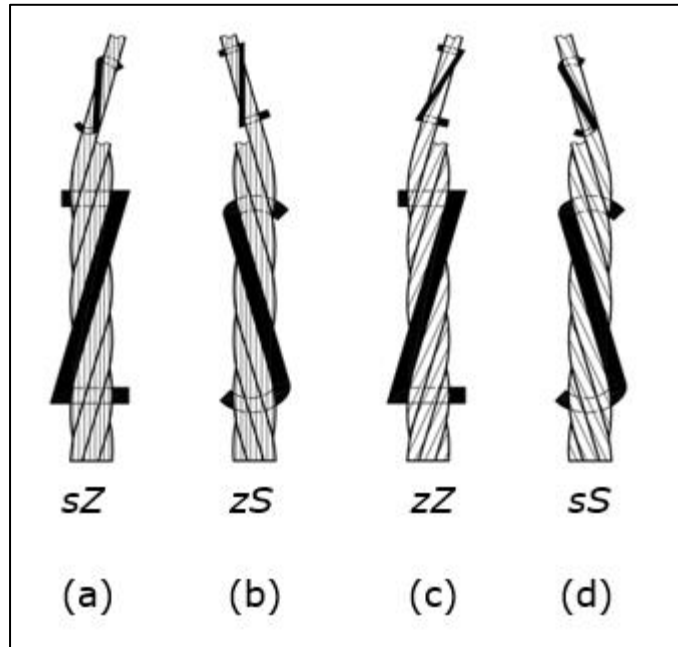


Figura 9. Diferentes configuraciones posibles de cables. (a) Entramado regular hacia la derecha. (b) Entramado regular hacia la izquierda. (c) Entramado de Lang hacia la derecha. (d) Entramado de Lang hacia la izquierda. (ASTM A1023/A1023M-15).

Siguiendo con la clasificación de los cables, también se pueden separar en los tipos de cordones que presenta. Existen cables compactados en los cuales, luego del entramado, estos pasan por un proceso de compactación con rodillos para lograr lo mismo que se describió en la fase de compactación de cordones. Existen también cables en los que los cordones son compactados en la fase previa al armado.

2.3 Descripción de Bases de Sistemas con Cables

2.3.1 Problemas encontrados en el diseño de estructuras con cables

Uno de los principales problemas encontrados con el diseño de estructuras de cables es poder determinar su geometría. Si bien las estructuras convencionales de sistemas viga-columna, de los que tanto se ha estudiado y se tiene tanta experiencia e información, resultan de determinar una forma solicitada por el proyecto y en base a eso calcular los esfuerzos solicitados en cada elemento para saber que sección es necesaria para que los resista, para las basadas en cables este concepto no es del todo aplicable. La geometría final influye de gran manera en la distribución de esfuerzos ejercidos para los distintos elementos constituyentes del sistema de manera que el diseño final se basa en la geometría que uno está imponiendo. Lo anterior complementa lo dicho en la introducción respecto al comportamiento de los cables. Como las estructuras reales no son solicitadas de manera uniforme, poseen cargas puntuales específicas y además

dadas las diferentes configuraciones que pueden tener, se da que presentan cargas transversales a la dirección el cable, produciendo geometrías en donde se alcanza el equilibrio de fuerzas con formas no triviales o simples que terminan complicando los cálculos y diseños base.

Esto se puede ver con la fórmula de la flecha ' f ' de un cable cuando este se encuentra bajo la acción de una carga uniformemente distribuida ' q '. Posee una distancia desde el punto en que se quiere medir la flecha hasta un apoyo de largo ' L ', los cuales poseen reacciones horizontales ' H ' y verticales ' V '. La suma de momentos en cualquier punto del cable debe ser 0. Es por esto que la ecuación de la flecha de un cable desde un punto hacia un apoyo es la siguiente:

$$f = \frac{q}{2 \cdot H} \cdot L^2 - \frac{V}{H} \cdot L$$

Debido a lo anterior es necesario pasar por una primera fase de diseño, a la cual las estructuras rígidas habitualmente no se someten, denominado en inglés 'Form-Finding', que consiste en determinar mediante modelos matemáticos de comportamiento de estructuras y equilibrio de fuerzas, la forma óptima o en equilibrio del sistema de cables en base a las condiciones de borde e iniciales. Si bien los cables están de alguna manera determinados en su forma a lo que el proyecto requiera, este se debe ajustar a que sea estable pasando por este paso adicional.

Por lo anterior, puede decirse que el principal aspecto del diseño de sistemas estructurales flexibles es el diseño geométrico.

Una de las razones de este comportamiento y condicionamiento en el diseño es debido a que las estructuras basadas en cables, a diferencia de las rígidas constituidas en acero, es que son sometidas a grandes deformaciones. Dichas deformaciones son lo suficientemente grandes como para tener que aplicar cálculos y modelos matemáticos no lineales, es decir, que tiene que ser calculados de forma recursiva a medida que la geometría se va adaptando a las cargas solicitadas.

Dentro del aspecto de las deformaciones, al momento de consultar los distintos estándares internacionales de diseño (americano, europeo, etc.) en ningún caso se indica un valor específico que deben cumplir las estructuras en relación a cuanto es el asentamiento máximo que pueden aceptar para que se garantice que no ocurran fallas estructurales. Lo único que las normas indican es que para las estructuras basadas en cables (sobre todo las que cumplen finalidad de cubrir grandes áreas) o que tengan gran cantidad de estos elementos, es que las deformaciones no pueden ser tales que dejen de cumplir la utilidad pensada para esta.

La práctica europea indaga aún más profundo en los requerimientos de las membranas y cubiertas flexibles tensadas, restringiendo en algunos casos a que, dada cierta curvatura por geometría o diseño arquitectónico, esta no debe ser invertida, entendiéndose esto, por el hecho de suceder inflexión dentro de la misma (e.g. de convexo a cóncavo).

Sin embargo también indica, como se mencionó anteriormente, que los límites de deflexiones en los proyectos que posean membranas o cubiertas que utilicen cables para su estructuración, deben ser fijados y acordados con el mandante de manera específica a ese proyecto.

Otro factor importante dentro de la determinación de la geometría en una estructura basada en cables, sobre todo en las que cumplen funciones de techo, es que esta se encuentra afectada en su forma por las cargas que estén aplicadas sobre esta. No es lo mismo que esté solo con el peso propio de los elementos a que se aplique la combinación establecida de presiones de viento, sismo, uso, etc., modificando y acentuando aún más la no linealidad del cálculo necesario. Es por esto que el rango de deformaciones aceptables varía considerablemente comparado con las estructuras rígidas, pero sin dejar de ser tan importantes en su control.

En materia del montaje y construcción se encuentran nuevas dificultades. Las estructuras de cables, al presentar en su mayoría pretensado de elementos, deben ser construidas de manera secuencial y no siempre esta es la más adecuada para un rápido montaje. Además requiere de maquinaria especializada con personal calificado en obra, dificultando aún más su construcción.

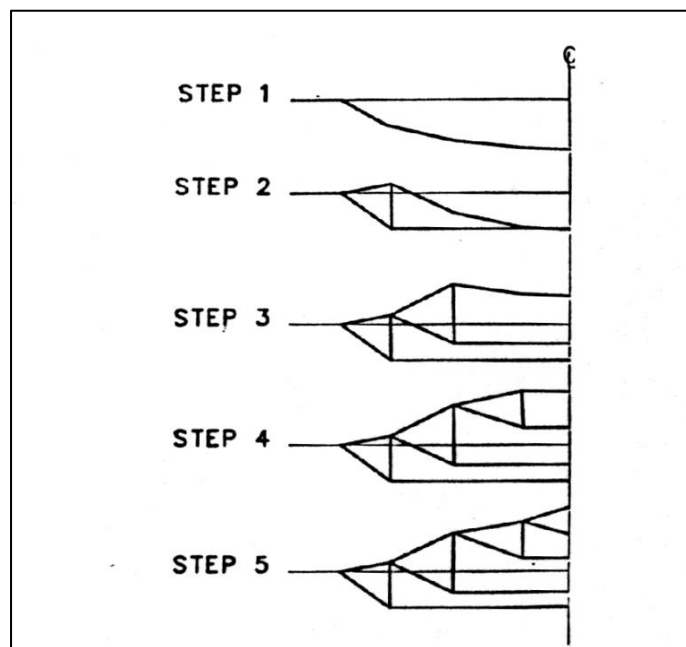


Figura 10. Secuencia de montaje de techo con estructuración tipo Tensegrity.
(<http://www.pages.drexel.edu/~nrr24/ae390/a003/parameters.htm>).

Sumado a todo esto se encuentra el factor de que en la construcción de estructuras basadas en cables, sobre todo las que tienen como finalidad techumbres flexibles, son utilizados materiales no convencionales. Estos pueden ir desde polímeros resistentes a esfuerzos axiales (agregando aún más complejidad en los cálculos), cubiertas de acrílicos transparentes, etc.

Si se consideran todos los factores antes mencionados es posible obtener, para un mismo problema, infinitas soluciones dependiendo de la geometría impuesta. Todo esto se ve reflejado al momento del diseño, en que no se tiene una pauta guiada como existe para otras estructuras y cada problema tiene que ser abordado de forma íntegra mirando cada variable con detalle y modificando los resultados finales de forma iterativa y así alcanzar una de las soluciones posibles.

2.3.2 Consideraciones al momento de elegir un sistema basado en cables

Antes fueron mencionadas algunas de las problemáticas enfrentadas al momento de elegir trabajar con una estructura basada en cables, las cuales son fundamentos suficientes como para decantar en los métodos tradicionales de estructuración, pero también usar las soluciones propuestas en esta memoria posee grandes ventajas.

La principal ventaja, y la que queda más en evidencia, es que las estructuras que eligen cubiertas con cables poseen menor cantidad de acero por metro cuadrado, y con esto, menores costos de materiales para el proyecto en general. Si bien esta afirmación entrega una buena referencia de los beneficios de usar menos materiales en el ámbito de costos, esto no es del todo cierto si se engloba el proyecto total, debido a que estos mismos materiales menos costosos requieren mano de obra calificada (por lo tanto más escasa) la cual significaría menor oferta dentro de los posibles empresas constructoras. Otro punto que incrementa los costos finales es que los métodos de montaje distan de lo comúnmente visto en estructuras, sobretodo en Chile. Dichos métodos requieren de montajes secuenciales con maquinaria especializada para cada labor.

Por lo tanto la mayor ventaja dentro del ámbito estructural es que las cargas solicitantes por peso propio en la estructura son considerablemente menores, necesitando así menores secciones de elementos para alcanzar la estabilidad lo que hace a estas estructuras ser consideradas en su gran mayoría 'livianas'. Que una estructura sea liviana implica, dentro del ámbito estructural, que son menos susceptibles a que le afecten los sismos ya que entregan menos masa sísmica por lo que las cargas son considerablemente menores. Luego, a este tipo de edificación la controlan las cargas de viento por sobre el sismo.

Otra consideración al momento de elegir una estructura que presente cables (sobre todo aquellas auto-sostenibles como se ahondará en capítulos posteriores de esta memoria) es el diseño estructural del mismo. La tecnología ha logrado implementar programas de diseño estructural en base a elementos finitos de diversos desarrolladores los cuales funcionan de excelente manera para la gran mayoría de las estructuras presentes en el mundo, sobre todo las que utilizan elementos rígidos, pero como los elementos que usan cables pueden presentar, según su diseño, deformaciones considerables, estos programas computacionales no pueden abarcar todas las consideraciones que se necesitan o no contienen la cantidad de herramientas necesarias o funciones implementadas para un diseño íntegro de este. Es por esto que diferentes empresas han desarrollado software especializados en el diseño de estructuras basadas en cables o que posean membranas flexibles.

2.4 Descripción de membranas flexibles tensionadas

Las estructuras tensadas, o denominadas en inglés 'tensile structures' son la categoría de estructuras que mediante esfuerzos de tensión, ya sea tracción o compresión, pueden generar la rigidez necesaria para resistir las cargas impuestas sobre ellas. Estos esfuerzos son aplicados a la mayoría de sus componentes los cuales son generalmente cables, membranas o telas especiales. También pueden estar compuestas por elementos que cubren un esqueleto o marco fabricado por elementos rígidos y que mediante las tensiones sobre la tela le da la continuidad, resistencia y utilidad requerida. El concepto de 'tensile structures' puede ser sub dividido en membranas tensionadas, estructuras neumáticas y mallas de cables pre-esforzados.

Las estructuras tensadas pueden ser imaginadas como elementos de área los cuales son traccionados desde todos sus lados dándole así cierta rigidez, a la cual si se le aplica una carga normal al plano de este elemento, esta será repelida por las tensiones internas.

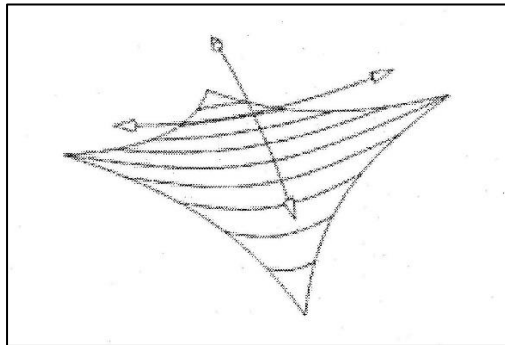


Figura 11. Diagrama de tensiones sobre una membrana con doble curvatura (<http://www.architen.com/articles/basic-theories-of-tensile-membrane-architecture/>).

Uno de los grandes beneficios de este tipo de cubiertas es que estas pueden fácilmente adoptar formas curvas, ideales para construir techos como se muestra en la **Figura 12**. Pero a medida que aumentan las dimensiones de las membranas libre de apoyos también lo hace el nivel de pre-tensado que esta misma requiere por lo que las estructuras deben pasar, en su diseño, por la fase de búsqueda de geometría o llamado 'form-finding' lo que encuentra un equilibrio, dada las condiciones de borde de las membranas tensionadas y el nivel de pretensado que se le imponga, a la estructura.



Figura 12. Techo sobre centro deportivo. En esta imagen se muestran las curvaturas que pueden alcanzar las membranas. (<http://www.architen.com/products/standard-system-3/>).

Las características o propiedades estructurales que tienen que tener estas membranas y las que se tienen que tener en consideración al momento del diseño, distan de las que se ven generalmente en estructuras convencionales, por la naturaleza intrínseca que ha sido descrita a lo largo de este capítulo.

El primer parámetro que se debe tener en consideración en este tipo de estructuras es su resistencia a la tracción, la cual es expresada en newton por cada 50 milímetros [N/50 mm] o kilos por 5 centímetros [kg/5 cm]. Esta resistencia puede ser ensayada tanto uniaxial como biaxial y expresada de la misma forma. Otro parámetro no visto comúnmente y que se requiere en el diseño es la resistencia al rasgado, siendo lo más importante de este la resistencia a la propagación del mismo. Se expresa en Newton [N] o kilogramos [kg] y se determina mediante un ensayo en una pieza de 100 [mm] de longitud a la cual se le ha hecho un corte de 25 [mm] de forma transversal.

Sumado a lo anterior hay varios otros parámetros que deben ser considerados fuera del ámbito estructural. Uno de esos son las propiedades de conservación que indican factores para que la estructura se mantenga en buen estado durante el tiempo. Estos factores son condicionados principalmente por el entorno en el cual se desea colocar el proyecto y depende mucho también de la utilidad que se le da. Uno de los más importantes, pero no el único, es el de resistencia a la intemperie. También debe considerarse la permeabilidad de las membranas al momento del diseño, facilidad a la limpieza, facilidad a ser reparados y también los requerimientos específicos para la utilidad pensada como sería el nivel de transparencia que puedan tener o el nivel de protección UV.

Luego de tener en consideración todos los efectos antes mencionados es necesario también indicar la relajación o estiramiento de la estructura tensada de forma inicial y la que se da a través del tiempo. Como se mencionó al principio de este capítulo las estructuras tensadas requieren que sus elementos se encuentren constantemente bajo estrés para poder funcionar correctamente, por esto mismo que se debe garantizar

este estado tensional en todo momento bajo cualquier tipo de carga y combinaciones de las mismas y el hecho de que con el tiempo los materiales puedan estirarse y perder elasticidad debe ser puesto en consideración al momento del diseño.



Figura 13. Velódromo de Peñalolén. El techo es construido con membranas tensadas como se observa en la imagen (<http://www.disenoarquitectura.cl/velodromo-penalolen/>).

Dentro de los materiales de los que son fabricadas las membranas hay varios tipos dependiendo de la utilidad que se le quiera dar. Las opciones varían desde fibras naturales como lino y lana, pasando por materiales sintéticos como el poliéster o los acrílicos. También los hay metálicos con fibras de acero o aleaciones de cobre y por último con fibras minerales como lo son la fibra de vidrio o de carbón. Actualmente las más usadas son mezclas de muchas fibras y así obtener lo mejor de las propiedades de cada una. Dentro de estas están las fibras de poliéster con laca acrílica recubierta de PVC, fibra de vidrio recubierta con Teflón y fibra de Nylon recubierto en PVC. Todas estas poseen propiedades resistentes, estructurales y de elongación distintas, pero cada una puede ser usada ocupando este método estructural y así alcanzar la utilidad requerida.

Como se mencionó anteriormente las formas que pueden adoptar las estructuras tensionadas, si bien se adaptan de buena manera a lo solicitado o requerido esto no es del todo correcto debido a que al mantenerse tensados los elementos de forma uniforme, estos tienden a adoptar diferentes figuras para alcanzar el equilibrio y estas formas están condicionadas por el nivel de pretensado que presente el material como por las condiciones de borde, o más bien, por los apoyos que esta presenta. Dicho esto, la forma del esqueleto toma gran relevancia en su diseño, tanto así que las estructuras pueden ser sub-clasificadas acorde a los elementos rígidos que presenten. Se pueden diferenciar dos grandes tipos, las que son sostenidas o presentan dentro de su diseño mástiles para poder formar desniveles o puntos altos de apoyos y puntos bajos de anclaje (**Figura 12**), como también las que son sostenidas por enrejados o marcos rígidos desde los cuales son apoyadas las membranas estructurales. En esta última categoría se encontraría el velódromo de Peñalolén de la **Figura 13**.

2.5 Descripción de Sistema Tensegrity

El concepto de 'Tensegrity' se relaciona particularmente, y de forma muy general, con un sistema estructural basado principalmente en elementos que pueden estar tanto en compresión o en tracción, nunca ambos para un mismo tipo de elemento, de manera de construir figuras espaciales auto sostenibles dadas ciertas características. El mismo nombre proviene del concepto de 'tensional integrity'.

Si se revisa la historia y ahonda un poco más en sus creadores y principales impulsores, se llegará a tres nombres de los cuales no es posible determinar quién fue el creador original de este sistema, o por lo menos dentro de aspectos legales como generación de patentes. Estas personas son David Georges Emmerich, Kenneth Snelson y Richard Bickminster quienes poseen respaldos suficientes como para considerarse desarrolladores de la idea del 'Tensegrity'. Es por esto que la mejor definición de este sistema viene dicha por ellos mismos, se muestra en el cuadro siguiente y será explicada posteriormente.

Los sistemas de 'Tensegrity' son sistemas reticulados en un estado de auto-estrés. Todos sus elementos poseen una fibra media recta y son de tamaño equivalente. Elementos tensados no tienen rigidez a la compresión y constituyen un conjunto continuo. Elementos comprimidos constituyen un conjunto discontinuo. Cada nodo recibe un y solo un elemento comprimido. – René Motro, Tensegrity: Structural Systems for the Future

La afirmación anterior tiene varias implicancias dentro de la misma. Primero indica que el 'Tensegrity' pertenece a los sistemas espaciales reticulados debido a que tiene elementos que por sí solos no agregan rigidez en compresión. Posee elementos que trabajan a compresión pura pero también contiene elementos que trabajan a tracción pura y son estos elementos los que deben ser pretensados para mantenerse trabajando en todo momento y por lo tanto el 'Tensegrity' es una sub clase de los sistemas reticulados. Luego se indica que el sistema se encuentra en un estado de equilibrio debido a sus esfuerzos propios, esfuerzos producidos por su configuración inicial de pretensado de cables.

Posteriormente se menciona que los elementos son, en su fibra media o lo que podría entenderse como la definición de la trayectoria principal o resultante final de cada elemento, rectos y de tamaño equivalente. Esta última afirmación no es del todo correcta por lo visto en todas las estructuras diseñadas con este método que se ven actualmente pero al momento de que los autores definieron sus patentes legales solo trabajaban con elementos de tamaños similares.

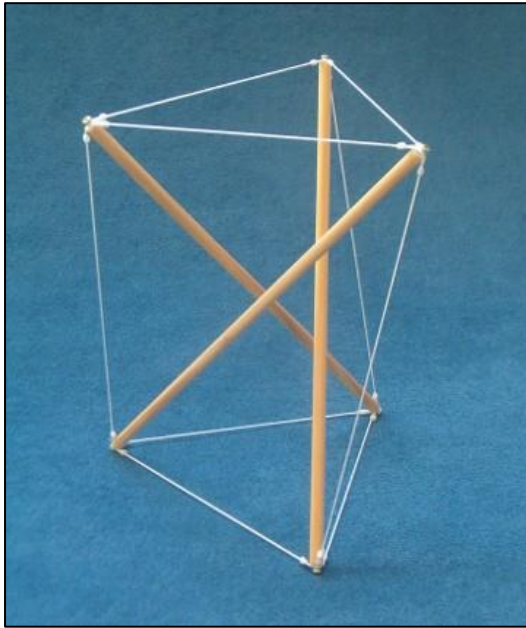


Figura 14. Elemento base de estructura espacial utilizando Tensegrity. Las cuerdas (color blanco) se encuentran en tracción pura mientras que los palos (color café) presentan esfuerzos de compresión pura. (<http://www.tensegriteit.nl/e-simple.html>).

En la definición los autores afirman que los elementos tensionados no aportan rigidez a la compresión y conforman un sistema continuo. Esto se debe a que todas las estructuras construidas utilizando el sistema 'Tensegrity', o la gran mayoría de ellas, son compuestas por cables que como bien se sabe, solo pueden ofrecer resistencia a esfuerzos de tracción y como los únicos elementos que perciben estas solicitaciones son los cables, es que esta afirmación tiene sentido en la definición. Para que la estructura pueda mantenerse erguida de manera autónoma, es necesario que exista una conexión entre todos los elementos, conexión que viene dada por los cables instalados, lo que constituye un sistema continuo.

También se indica que los elementos a compresión son de carácter discontinuo lo cual para los estándares comunes de construcción no podría ser posible, pero dentro del 'Tensegrity' las fuerzas son equiparadas, las fuerzas de compresión son respondidas con fuerzas de tracción, lo que permite mantener las estructuras erguidas sin la necesidad de conectar todos los elementos a compresión directamente, sino que a través de elementos a tracción.

Por último, la definición indica que para cada nodo se percibe solo un elemento a compresión. Esto para el momento en que los autores patentaron sus creaciones, al igual que sucedió con los elementos de similar tamaño, era correcto, pero con el paso del tiempo y el surgimiento de nuevos diseños se determinó que no era una condición necesaria para la confección de estructuras usando 'Tensegrity'.

Dentro de la categoría de los domos, el 'Tensegrity' ha sido utilizado, no de forma masiva, pero hay varias referencias de estructuras utilizando este sistema. Los domos diseñados de esta forma presentan eso si diferencias sustanciales respecto a los

sistemas con 'Tensegrity' definidos anteriormente, sobre todo los domos diseñados de la forma que se muestra en la **Figura 15**.

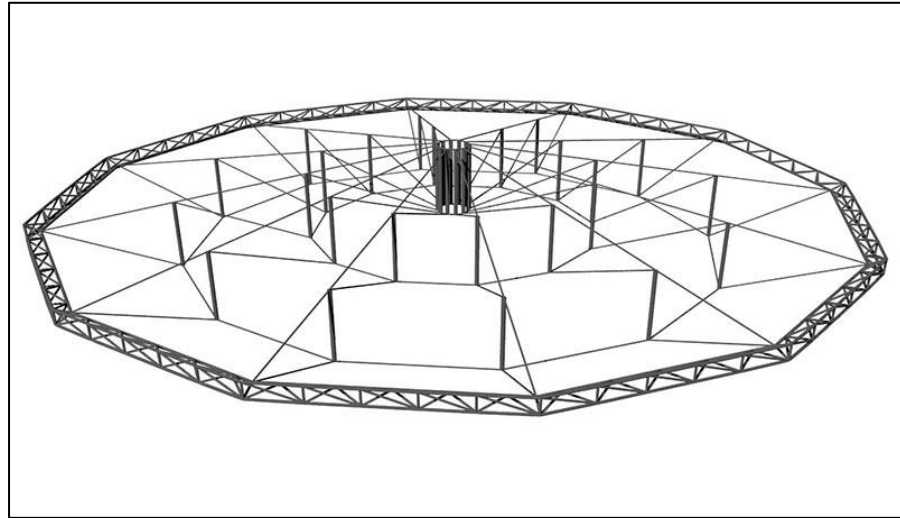


Figura 15. Domo diseñado mediante sistema Tensegrity "falso" según lo estipulado por Snelson. (<http://www.structuremag.org/?p=7578>).

Dentro de las definiciones de 'Tensegrity' dadas por sus creadores se encuentran los conceptos de "verdadero" y "falso". Para Snelson, los domos como los mostrados en la figura anterior no son constituidos puramente de forma tal que puedan ser considerados estructuras basadas en 'Tensegrity' debido a que para él, los bordes de la misma no pueden ser confeccionados por elementos a compresión, sino que únicamente se deben utilizar cables. Es por esto que para él el domo anterior está considerado dentro de los que están contruidos en base a un 'Tensegrity' "falso". No es del todo incorrecto llamar a esa estructura un techo diseñado en base a la tenso-integridad porque la forma en que se sostiene y puede alcanzar la luz sin requerir más apoyos que los perimetrales hace deducir que entra dentro de esta categoría. En los capítulos sucesivos se ahondará más en este tipo de domos de 'Tensegrity' "falso".

Para entrar más en detalle la confección de domos usando 'Tensegrity' es de gran ayuda observar la **Figura 16**.

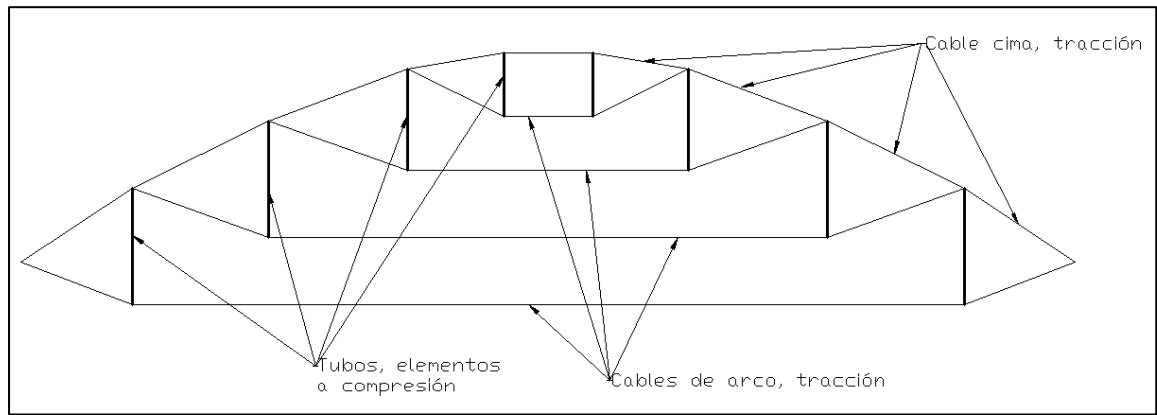


Figura 16. Corte en elevación de domo construido mediante 'Tensegrity' indicando sus componentes (Autor).

En la figura anterior se muestra una elevación de un domo usando 'Tensegrity' falso de cuatro niveles. Tal como se indica en la imagen, los únicos elementos a compresión del domo son los tubos verticales los cuales son tensados en ambos extremos por cables. La existencia de los cables de arco a tracción es necesaria para mantener erguida toda la estructura.

2.6 Descripción de Comportamientos sistema Cable-Stayed

Los sistemas Cable-Stayed son usados principalmente en puentes a lo largo del mundo pero tienen un uso no menor en estructuras de techos por la reducción de costos que presentan respecto a estructuras convencionales. En esta sección se hablarán de estructuras Cable-Stayed para techos.

Las estructuras Cable-Stayed poseen dos tipos de elementos principales los cuales pueden ser diferenciados por su comportamiento. El primer elemento es lo que muchas veces se considera como mástil, que básicamente es un elemento alto (sobresale del límite del techo de la estructura) y usualmente es de concreto o acero, el cual trabaja a compresión principalmente. Es el elemento que se encarga de distribuir los esfuerzos del edificio hacia el suelo por lo que son considerados como el alma de la edificación.

El segundo tipo de elementos son los cables que, como ya fue expuesto, solo trabajan a tracción (ignoran momento y corte) y son los que se encargan de sostener el techo principalmente. Usualmente son suspendidos desde el mástil hasta la estructura de techo, traspasando así los esfuerzos verticales hacia dicho mástil y luego al suelo, completando el sistema estructural. De un mismo mástil pueden salir varios cables por lo que se necesita una reducida cantidad de ellos para sostener un área de techo determinada.

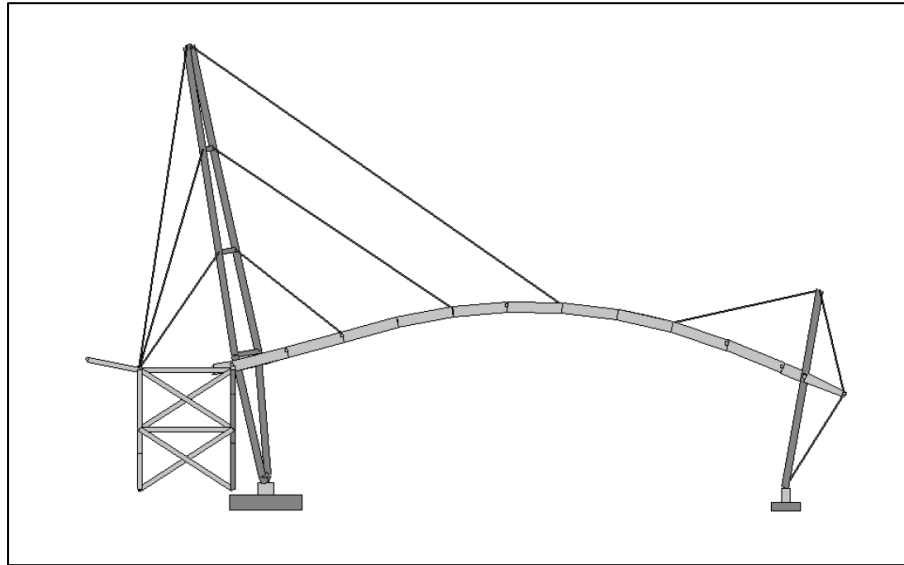


Figura 17. Diagrama Corte de centro atlético de la Universidad de California. Se distingue mástiles de cables y estructura de techo (Design Considerations in Cable-Stayed Roof Structures, David E. Eckmann, Stephanie J. Hautzinger, Thomas R. Meyer).

Una de las principales desventajas de usar este tipo de estructuración es que los mástiles pueden resultar muy robustos y de dimensiones mucho más grandes que la geometría que se quiere cubrir, elevando los costos de construcción y dificultando su montaje. También, como toda estructura de cables, son muy sensibles a asentamientos en sus fundaciones siendo este uno de los mayores riesgos que presentan. Como muchos cables llegan a un mismo mástil, si este se asienta, lo más mínimo que sea, una gran área sufre las consecuencias.

CAPÍTULO 3: BASES DE DISEÑO

3.1 Cables

Los materiales usados en la construcción de estructuras que usen cables se basan en lo dictado en el ASCE y contempla una gran variedad dependiendo de lo que el proyecto requiera. Pero dentro de la revisión bibliográfica que se hizo y los proyectos ya construidos, hay dos tipos de cables con materiales específicos que son más comúnmente usados debido a su gran resistencia a tensiones.

Para las membranas, los materiales distan de lo que usualmente se usa en los cables, que son principalmente elementos metálicos. Las membranas requieren que sean materiales resistentes no solo a tensiones debido a las cargas a las que son sometidas sino que se requiere que sean capaces de aguantar todos los agentes climáticos y abrasiones químicas a la que son afectados.

3.1.1 Materiales

Durante la historia los cables han sido confeccionados de varios materiales cumpliendo todos con las propiedades básicas que debieran tener pero a medida que se van desarrollando nuevas tecnologías se llegan a materiales más resistentes los cuales se encuentran dentro de los identificados y normalizados para el uso en estructuras. Este listado de materiales se encuentra en el capítulo 4 del Standard ASCE 19-16 'Structural Application of Steel Cables for Buildings' (Aplicaciones estructurales de cables de acero para edificios), norma que es exigida por los distintos proveedores de elementos estructurales de cables y las empresas encargadas de los diseños.

En esta norma se mencionan los distintos materiales con que deben ser fabricados los cables y el respectivo estándar que las regula. Todos los cables son de acero inoxidable pero están diferenciados en su construcción o en el recubrimiento que poseen, el cual está constituido principalmente por otros metales que entregan propiedades adicionales fuera de resistencia a tensiones. A continuación se muestran dichas normas (**Tabla I**).

Tabla I. Estándar aplicados a materiales usados en cables de acero	
Estándar	Descripción
ASTM A368-95a (2013)	Standard specification for stainless steel wire strand.
ASTM A474-03 (2013)	Standard specification for aluminum-coated steel wire strand.
ASTM A475-03 (2014)	Standard specification for zinc-coated steel wire strand.
ASTM A492-95 (2013)	Standard specification for stainless steel rope wire.
ASTM A586-04a (2014)	Standard specification for zinc-coated parallel and helical steel wire structural strand.
ASTM A603-98 (2014)	Standard specification for zinc-coated steel structural wire rope.
ASTM A855/A855M-03 (2014)	Standard specification for zinc-5% aluminum-mischmetal Alloy-coated steel wire strand.
ASTM A1023/A1023M-15	Standard specification for carbon steel wire ropes for general purposes. Table 7.

Como se ve por los títulos de las distintas normas, los cables utilizados para la construcción se diferencian, principalmente, por su composición, si están hechos de cordones simples o cuentan con espirales enroscados a su contorno además de indicar si poseen recubrimiento de algún otro metal como zinc o aluminio.

3.1.1.1 ASTM A368-95a /2013) Standard specification for stainless steel wire strand.

Este estándar aplica para los cordones de alambre de acero inoxidable compuestos por una multiplicidad de alambres redondos. En esta norma se pueden encontrar todas las especificaciones y propiedades de estos elementos tabuladas acorde a los diámetros que se pueden encontrar en el mercado. Para cada diámetro se especifica la cantidad de alambres necesarios para poder llegar a la sección requerida, se muestran todos los requerimientos para la confección de los cordones sobre todo en las disposiciones para el tejido del mismo. Se indican las tolerancias para las dimensiones de diámetros, se especifica la periodicidad del muestreo en los elementos y la cantidad de ensayos que se deben hacer acorde al tamaño del lote que se confeccionó. Por último en esta norma se dan directrices para las uniones acorde a la envergadura de los cordones, se entregan las composiciones químicas requeridas y se indica cómo manejar y almacenar los elementos.

3.1.1.2 ASTM A474-03 (2013) Standard specification for aluminum-coated steel wire strand.

Este estándar aplica para 5 grados de cables de alambres recubiertos por aluminio y compuestos por elementos redondos de acero inoxidable. Los 5 grados posibles se determinan en base a la resistencia a la rotura mínima que pueden alcanzar para un mismo diámetro. Los grados son utilitario, común, Siemen-Martin, alta resistencia y extrema resistencia y cada tensión mínima se encuentra tabulada en el interior de la norma. También se encuentran todas las propiedades que se deben asegurar en la confección de los cables, ítem que se verá en mayor profundidad más adelante en este capítulo, como también las dimensiones de diámetros, pesos unitarios y cantidad de alambres necesarios para alcanzar las secciones indicadas. Por último se especifica la forma del encadenamiento de los alambres, las uniones y empalmes, inspección necesaria, criterios de rechazo y almacenaje.

3.1.1.3 ASTM A475-03 (2014) Standard specification for zinc-coated steel wire strand.

Este estándar aplica para cinco grados de cables de alambres compuestos por elementos redondos de acero inoxidable y recubiertos en zinc. Los cinco grados posibles se determinan en base a la resistencia a la rotura mínima que pueden alcanzar para un mismo diámetro. Los grados son utilitario, común, Siemen-Martin, alta resistencia y extrema resistencia y cada tensión mínima se encuentra tabulada en el interior de la norma. El recubrimiento de Zinc se encuentra clasificado en base a la cantidad de material, medida en peso, que presenta por superficie de alambre. Las clases posibles son Clase 1, Clase A, Clase B y Clase C ordenadas de menor cantidad de material a mayor. También se encuentran todas las propiedades que se deben asegurar en la confección de los cables, ítem que se verá en mayor profundidad más adelante en este capítulo, como también las dimensiones de diámetros, pesos unitarios y cantidad de alambres necesarios para alcanzar las secciones indicadas. Por último se especifica la forma del encadenamiento de los alambres, las uniones y empalmes, inspección necesaria, criterios de rechazo y almacenaje.

3.1.1.4 ASTM A492-95 (2013) Standard specification for stainless steel rope wire.

Este estándar se aplica solo para el tipo de alambre de acero inoxidable redondo usado especialmente en la confección de cordones para cables de acero. Se mencionan las composiciones de los minerales que pueden haber en los cordones de acero y propiedades generales como embalaje o requerimientos mecánicos acotados ya que esta norma es solo un complemento de las normas más generales y estos elementos no son usados de manera autónoma sino que son parte de conjuntos más grandes los cuales están regidos por sus propios criterios.

3.1.1.5 ASTM A586-04a (2014) Standard specification for zinc-coated parallel and helical steel wire structural strand.

Este estándar se aplica a todos los cables de alambres recubiertos con zinc para el uso en donde se requieran elementos que posean alta resistencia, altos módulos de elasticidad o con múltiples cables en tensión. En ella se catalogan dos grados presentes en los cables los que son determinados por la resistencia a la rotura de los mismos. Para el recubrimiento de zinc se presentan tres clases distintas, las Clase A, Clase B y Clase C que se diferencian en la cantidad de material que existe en los alambres siendo la Clase A la con menor cuantía. El galvanizado puede ser de Clase B o Clase C en las cuerdas exteriores si se requiere mayor protección a la corrosión pero no se utiliza otra clase que no sea Clase A en las cuerdas interiores. Las tensiones de rotura se encuentran tabuladas por diámetro y separadas por grado de acero y combinación de clase de recubrimiento posible. También se encuentran todas las propiedades que se deben asegurar en la confección de los cables, ítem que se verá en mayor profundidad más adelante en este capítulo, como también las dimensiones de diámetros, pesos unitarios y cantidad de alambres necesarios para alcanzar las secciones indicadas. Por último se especifica la forma del encadenamiento de los alambres, las uniones y empalmes, inspección necesaria, criterios de rechazo y almacenaje.

3.1.1.6 ASTM A603-98 (2014) Standard specification for zinc-coated steel structural wire rope.

Este estándar se aplica a todos los cables de alambres recubiertos de con zinc para el uso en donde se requieran miembros pre-esforzados o no pre-esforzados de alta resistencia y relativa flexibilidad. En esta norma se catalogan tres clases de recubrimiento de zinc que son la Clase A, Clase B y Clase C que se diferencian en la cantidad de material que existe en los alambres siendo la Clase A la con menor cuantía. El galvanizado puede ser de Clase B o Clase C en las cuerdas exteriores si se requiere mayor protección a la corrosión pero no se utiliza otra clase que no sea Clase A en las cuerdas interiores. Las tensiones de rotura se encuentran tabuladas por diámetro y separadas por grado de acero y combinación de clase de recubrimiento posible. También se encuentran todas las propiedades que se deben asegurar en la confección de los cables, ítem que se verá en mayor profundidad más adelante en este capítulo, como también las dimensiones de diámetros, pesos unitarios y cantidad de alambres necesarios para alcanzar las secciones indicadas. Por último se especifica la forma del encadenamiento de los alambres, las uniones y empalmes, inspección necesaria, criterios de rechazo y almacenaje.

3.1.1.7 ASTM A855/A855M-03 (2014) Standard specification for zinc-5% aluminum-mischmetal Alloy-coated steel wire strand.

Este estándar aplica para cinco grados de cables de alambres compuestos por elementos redondos de acero inoxidable y recubiertos con una aleación de zinc al 5% de aluminio y mischmetal (aleación de elementos de tierras raras en diferentes proporciones de forma natural). Los cinco grados posibles para este tipo de cables se determinan en base a la resistencia a la rotura mínima que pueden alcanzar para un mismo diámetro.

Los grados son utilitario, común, Siemen-Martin, alta resistencia y extrema resistencia y cada tensión mínima se encuentra tabulada en el interior de la norma. El recubrimiento se encuentra clasificado en base a la cantidad de material, medida en peso, que presenta por superficie de alambre. Las clases posibles son Clase 1, Clase A, Clase B y Clase C ordenadas de menor cantidad de material a mayor. También se encuentran todas las propiedades que se deben asegurar en la confección de los cables, ítem que se verá en mayor profundidad más adelante en este capítulo, como también las dimensiones de diámetros, pesos unitarios y cantidad de alambres necesarios para alcanzar las secciones indicadas. Por último se especifica la forma del encadenamiento de los alambres, las uniones y empalmes, inspección necesaria, criterios de rechazo y almacenaje.

3.1.1.8 ASTM A1023/A1023M-15 Standard specification for carbon steel wire ropes for general purposes. Table 7.

Este estándar abarca los requerimientos generales de los tipos más comunes de cables de alambre de acero y cordones. Esta norma difiere un poco de las vistas anteriormente por que se presenta como indicaciones generales de muchos tipos de cables y sirve como introducción a los conceptos asociados a estos elementos. Inicia con la terminología asociada a cables, cuerdas y alambres definiendo las partes que poseen cada uno de estos y los materiales que las pueden constituir, las dimensiones características que deben cumplir y tipos en que estos son separados. También esta norma identifica las propiedades mecánicas que deben cumplir los diferentes tipos de cables de manera exhaustiva, al igual que todos los otros parámetros que las normas recién mencionadas tienen, como uniones, empalmes y almacenaje. Pero la norma que rige las aplicaciones de cables de acero para uso estructural (ASCE 19) no cita a este estándar en su totalidad sino que solo indica que se debe usar la Tabla 7 contenida en esta lo que permite el uso de cables de menores diámetros para diseño sísmico de estructuras.

3.1.1.9 ASTM A1007-15 'Standard specification for carbon Steel wire for wire rope'

La confección de los distintos tipos de cables usados en la construcción y mencionados en la **Tabla I** viene normada por la ASTM A1007 (Especificaciones para alambres de acero de carbono para cables) en donde se especifica los tipos de alambres y los revestimientos aplicables a ellos. La normativa exige que el alambre sea forjado en frío en uno de 5 tipos distintos, cada uno con propiedades de recubrimientos distintos como se muestra a continuación:

- Uncoated: Sin recubrimiento. Alambre con una película de lubricante residual en su superficie como resultado del proceso de formación
- Drawn-galvanized: Galvanizado previo. Alambre con recubrimiento de zinc aplicado al cable antes del último proceso de moldaje mediante el método de electro-deposición o galvanizado en caliente

- Final-galvanized: Galvanizado final. Alambre con recubrimiento de zinc aplicado al cable después del último proceso de moldaje mediante el método de electro-deposición o galvanizado en caliente
- Drawn-Zn5 Al-MM: Aleación Zn5 Al previa. Alambre recubierto de aleación de zinc al 5% con aluminio aplicado antes del último proceso de moldaje mediante el método de revestimiento fundido
- Final- Zn5 Al-MM: Aleación Zn5 Al final. Alambre recubierto de aleación de zinc al 5% con aluminio aplicado después del último proceso de moldaje mediante el método de revestimiento fundido

La sigla Zn5 Al-MM corresponde a la abreviación en ingles de Zinc-5% Aluminum Mischmetal que es el la aleación de zinc a 5% con aluminio y Mischmetal, que es una aleación de varios minerales que se usa como complemento en otras aleaciones.

La norma también caracteriza y clasifica los alambres en niveles acorde a la resistencia a la rotura que presenten para un diámetro dado, estos niveles van desde el Nivel 1 al Nivel 5 siendo el primero el que resiste mayores cargas. Todos estos están tabulados en tablas ordenadas con cada uno de los diámetros disponibles para los casos de cables sin recubrimiento y con recubrimiento previo al último paso de moldaje. Para el caso con recubrimiento final, las mismas tablas aplican pero con una disminución de un 10% del valor mínimo de tensión de rotura. También se encuentran todas las propiedades que se deben asegurar en la confección de los alambres, ítem que se verá en mayor profundidad más adelante en este capítulo y que difieren de las propiedades que se verifican en los cables ya terminados, como también las dimensiones de diámetros y pesos unitarios. Por último se especifican las inspecciones necesarias, criterios de rechazo y almacenaje.

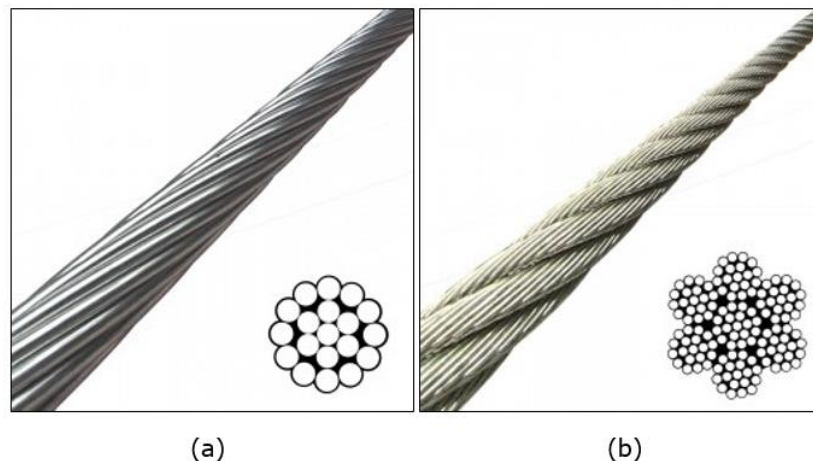


Figura 18. Identificación de los dos tipos principales de cables que se usan como elementos estructurales en construcciones. (a) 'Steel wire strand', que corresponde a cordón de alambres único. (b) 'Steel wire rope'

que corresponde al cable compuesto por varios cordones.
(<http://www.uscargocontrol.com/Rigging-Supplies-Hardware/Wire-Rope>).

3.1.2 Parámetros físicos y mecánicos

Como todo elemento estructural los cables deben cumplir ciertos parámetros para asegurar su utilidad, resistencia, funcionalidad y durabilidad en el tiempo, además de cumplir ciertas propiedades para poder ser montados en los proyectos. Cada uno de estos parámetros están normados por ensayos específicos y poseen márgenes estrictos que cada uno debe cumplir para garantizar todo lo anterior. Para todos los tipos de cables, como tienen propiedades estructurales similares, se exigen los mismos tipos de parámetros y ensayo a excepción de aquellos que son compuestos por varios cordones por sobre un núcleo central.

Elongación

Los cables deben ser estirados y su deformación medida y comparada acorde a cada normativa. Cada estándar especifica un largo de sección de cable que debe ser traccionado hasta que deje de percibir carga y medida la deformación unitaria, la cual no debe ser menor al porcentaje especificado para cada tipo o grado de material.

Tensión de rotura

Para cada cable se debe supervisar que las tensiones de rotura sean superiores al mínimo especificado en cada estándar, dado el grado del cable y la clase de recubrimiento que posea.

Tanto para la determinación de la elongación como para la de tensión de rotura existen parámetros necesarios que hacen válido el ensayo. Estos dependen de la normativa y del tipo de cable (si es con cordones enrollados en el exterior o es un núcleo central simple).

Ductilidad

La ductilidad es un parámetro necesario para la confección de cables tanto o más que para el diseño estructural. En todos los cables se requiere que los alambres no se fracturen al ser envueltos a una tasa de 15 vueltas por minuto en una hélice cerrada de al menos 2 vueltas alrededor de un mandril cilíndrico.

Peso de recubrimiento

El recubrimiento dado a los alambres en la primera etapa de la confección de los cables, debe ser regulado en base a la cantidad de este recubrimiento que es puesta sobre los elementos debido a que en base a esto se determina propiedades cruciales como la tensión de rotura. Los cables que presentan recubrimientos con zinc (ya sea zinc por sí solo o en aleación con aluminio) son clasificados por la cantidad de este metal que tengan, medido en gramos por metro cuadrado [gr/m^2] de superficie de cable sin protección, de acuerdo al SI. La normativa indica que para cierto grado de recubrimiento se debe tener un peso superior al mínimo tabulado acorde al estándar que corresponda.

El ensayo para determinar el peso del recubrimiento está estandarizado bajo el código ASTM A90/A90M 'Standard test method for Weight [mass] of coating on Iron and Steel articles with Zinc or Zinc-Alloy coatings'.

Adherencia al recubrimiento

Es importante que el recubrimiento se mantenga en los cables a pesar de los diferentes acciones que puedan pasar sobre este ya sea transporte, colocación en la obra y también en la fabricación de elementos más grandes. Como el recubrimiento es colocado en la primera fase, cuando es confeccionado el alambre que posteriormente es agregado a los diferentes elementos compuestos como son los cordones y el cable final, es que debe ser capaz de resistir las mismas sollicitaciones a las que son impuestas en el test de ductilidad. Para determinar la correcta adherencia del recubrimiento de cables es necesario que este se mantenga sin agrietarse o descamarse si el alambre es sometido a dar dos vueltas al ser envueltos en una hélice cerrada a una tasa que no supere las 15 vueltas por minuto alrededor de un mandril de diámetro 3 veces el del alambre que está siendo testeado.

Terminaciones

Las terminaciones en cables se refieren a que estos no presenten imperfecciones en la superficie que sea cubierta por el galvanizado. El recubrimiento debe ser continuo y razonablemente uniforme.

Esfuerzos a 0,7% de deformación

Los cables que son compuestos por varios cordones envueltos por sobre un núcleo central requieren cumplir un parámetro especial en su fabricación. Los estándares para este tipo de elementos indican que los cables deben alcanzar un nivel tensional mínimo tabulado cuando se tiene una elongación de un 0,7%. En la norma se especifican dos métodos de medición de este parámetro utilizando extensómetros. Los cables que requieren cumplir esta propiedad son los que se encuentran dentro de los estándares ASTM A586 y ASTM A603.

Módulo de elasticidad

Los cables, en especial los que son en base a cordones, poseen módulos de elasticidad inferiores a los que una viga rígida del mismo material y sección equivalente tienen. Debido principalmente a la forma en que están contruidos, al ser un conjunto de alambres entramados en torno a un eje central y que luego son entramados nuevamente para formar los cables, se presenta una pérdida de resistencia. Otro aspecto por el que los cables tienen menores módulos de elasticidad es que estos tienden a comportarse de manera no lineal cuando hay cambios en las tensiones que son aplicadas. Es por esto que los cables requieren ser testeados y mantener un módulo de elasticidad mínimo después de una prueba de pre-tensado. Esta prueba lleva al cable a una tensión de 55% de la resistencia a la rotura del elemento y luego lo descarga, para posteriormente verificar si el comportamiento no lineal de la elasticidad se encuentra dentro de los parámetros aceptables.

Los alambres como elementos independientes de los cables también deben cumplir ciertos requerimientos y propiedades que aseguren su resistencia y la posibilidad de ser utilizados en la confección de elementos más complejos.

Diámetro del alambre

Los alambres se encuentran tabulados en todos los diámetros posibles de confección que van desde 0,010 [pulgadas] (0.254 [mm]) hasta los 0.250 [pulgadas] (6.36 [mm]) con un incremento de 0.001 [pulgadas] (0.025 [mm]). Es por esto que la precisión en el diámetro es relevante con lo que se deben mantener ciertas tolerancias en la confección las cuales se encuentran especificadas para cada tipo de alambre.

Tensión mínima de rotura en alambres

Los alambres requieren una resistencia a la rotura mínima para cada nivel especificado en el cable. Se tiene una diferencia entre los alambres que son recubiertos al final del proceso de los que no lo son. Las tablas de resistencia mínima son las mismas que para el caso sin protección solo que reducida en un 10%.

Torsión en alambres

Los alambres deben ser ensayados a la resistencia a la torsión, acorde a lo especificado en el estándar ASTM A938 que consiste en colocar el elemento en una máquina con 2 mandíbulas a una distancia y tensión especificada para posteriormente hacerla revolucionar con una velocidad angular constante. El alambre debe ser capaz de resistir las tensiones que se encuentran tabuladas en la norma y depende del diámetro y nivel del elemento.

Envoltura en alambres

Se debe realizar el mismo ensayo sobre un mandril metálico como se contempla para los cordones o cables pero este debe tener un diámetro dos veces mayor al del alambre y este debe ser capaz de dar 6 vueltas sin que se fracture para ensayar la ductilidad. Para ensayar la adhesión del recubrimiento se debe utilizar un mandril de diámetro acorde al del alambre pero de número de veces mayor según lo que se especifica en el estándar. El alambre debe dar 6 vueltas al mandril de diámetro correcto y el recubrimiento no se debe agrietar o descamar para considerar que paso el ensayo.

Peso del recubrimiento en alambres

Los alambres al igual que los cables deben contener la cantidad correcta de recubrimiento que garantice que se están entregando todas las propiedades al acero y este se va a comportar como se especificó. En el estándar se indican los pesos mínimos de recubrimiento para los 4 casos de alambres que contemplan su uso, por metro cuadrado de superficie libre. El ensayo es el mismo que para el caso del cable el cual es estandarizado como ASTM A90/A90M.

3.1.3 Vida Útil, protecciones a la corrosión

Uno de las principales amenazas que se presentan a los elementos que son fabricados en acero, y por sobre todo a los elementos tensados, es la pérdida de material en ellos y la forma en que eso se logra es cuando existe corrosión. Es por esto que la protección a este ataque químico es de vital importancia y la forma en que se realiza para los cables es mediante el galvanizado. Como se mostró en secciones anteriores de esta memoria el proceso de galvanizado se aplica a cada alambre por separado que posteriormente forma cordones y cables logrando así una protección completa de todo el elemento.

La protección del zinc tiende a salirse si no se toman medidas extra en contra de la corrosión por lo que, si hay espacios vacíos dentro de los cables, una vez realizado el galvanizado no es posible corregir en caso de ser necesario. Para evitar que haya corrosión interna en los cordones es que se aplica un lubricante por el interior y a lo largo de todo el cable que está hecho principalmente de polvo de zinc disuelto en aceite sintético, formando una pasta. Este proceso se lleva a cabo al final del entramado de manera que la pasta quede sellada al interior de los cables.

Es posible que al momento del montaje o transporte de los cables se presenten daños en la cubierta de los mismos exponiendo parte de estos al medio ambiente, es por esto que se puede agregar protección adicional a la corrosión pintando la superficie exterior. Esto se realiza normalmente con pintura plástica pigmentada o no pigmentada en cuatro a seis capas.

Se debe poner especial énfasis en la protección a la corrosión en las conexiones. Los anclajes, los ganchos y terminaciones que se le agregan a los cables son puntos de debilidad en la protección debido al movimiento y roce que presentan, por lo que se recomienda sellar con material elástico estos puntos. Se debe tener especial cuidado con la lluvia en especial si esta puede escurrir a lo largo de los cables. Se recomienda asegurar que esta sea desviada fuera de los elementos para evitar corrosión (**Figura 19**).



Figura 19. Corrosión situada en la conexión y fijación de 2 cables debido a la pérdida de protección. (http://www2.ceab.csic.es/oceans/Web/News/2014_09_26.html).

3.1.4 Protección al fuego

Las protecciones que deben tener los cables al fuego deben ser acordes a lo especificado en las normas correspondientes a la jurisdicción de cada proyecto. En el estándar ASCE 19 se indican métodos de testeo de la protección característica de los cables y estos son los mencionados en la norma ASCE/SEI/SFPE 29-05 'Estándar para los métodos de cálculo para la protección de fuego estructural'. La calidad de la protección asociada a los elementos, y a la que se debe alcanzar acorde a lo especificado en cada proyecto, debe ser clasificado según el método indicado en el estándar ASTM E119 (2015). También puede utilizarse otra metodología que cumpla con ciertas características las cuales pueden ser suministradas por las normativas especiales del lugar en donde se construya la estructura, análisis de ingeniería detallados y particulares a los elementos o registros de proyectos pasados con buenos resultados.

3.1.5 Componentes de conexión, sistemas patentados

Las conexiones que pueden ser aplicadas a los cables son muchas, de diversos tipos, modos de actuar y propiedades mecánicas. Los esfuerzos que son aplicados a los cables deben ser transmitidos a otros elementos resistentes como lo son los mástiles, columnas, vigas o fundaciones y para esto se deben diseñar anclajes o conexiones especiales para cada ocasión. El diseño depende del tipo y diámetro del cable, la magnitud de la fuerza a ser conectada, el tipo de conexión deseado, el tipo de montaje y los requerimientos de mantención futura.

La forma más sencilla de conectar cables entre si es mediante el empalme. Si se desea conectar dos puntas de cables se deben liberar los cordones que conforman el cable en su punta y entretejerlos de manera alternada y así lograr una sección uniforme. Este método solo es posible en cables con cordones. Otra forma de conectar dos cables desde la punta es mediante el uso de varias abrazaderas a lo largo de un tramo de los dos cables pero este método produce tensiones excéntricas no deseadas.

El método más usado para la conexión de cables a otros elementos estructurales es mediante encajes. Estos encajes son elementos de acero forjado de alta resistencia y paredes gruesas que en cuyo interior se encuentran con forma cónica. El cable es introducido en esta sección cónica y sellado con materiales plásticos o metálicos. En este caso la fuerza se traspaasa del cable al encaje mediante la fricción que se produce entre los elementos y el relleno vertido en su interior (**Figura 20**).



Figura 20. Tramo de cable con conexión encajada en un extremo. (<http://shawsent.com/products/wire-rope-slings>).

Otro método para conectar los cables es mediante el uso de cabos o estrobo. La principal diferencia que existe entre este método de conexión y la que usa soquetes o encajes es que en esta el cable es doblado para crear un “ojo” por el cual son traspasadas las cargas hacia los otros elementos, no como el caso anterior en el que solo se introducía un extremo del cable y que mediante la fricción y sellos se fijaba a la conexión. Los cables son doblados y fijados de forma lateral con prensas y sellados o también pueden ser apernados con tornillos en U (**Figura 21**). Muchas veces se requiere colocar una protección especial al cable para que este no resulte dañado con los sucesivos usos o se pierda la protección del galvanizado. Existen también casos en que el cabo formado por el cable es fijado a un soquete sellado y este hace la conexión a los otros elementos estructurales como se ve en el caso de la conexión a fundaciones de la **Figura 22**.



Figura 21. Sección de cable con cabo en un extremo. En esta imagen se aprecia la protección a en la punta para evitar daños en el cable

(<https://www.gamut.com/c/material-handling-storage/wire-rope-sleeves-clips-thimbles>).

Las conexiones a fundaciones requieren de elementos adicionales que los otros tipos de conexiones no presentan. Estas son principalmente hacia pedestales de hormigón y por lo tanto requieren de diseño de placas base, uso de pernos, entre otros. También existen conexiones de cables directo al suelo las cuales son resueltas mediante conexiones embebidas en concreto bombeado a alta presión.



Figura 22. Conexion de 3 cables hacia el pedestal de una fundación. Se puede ver que el cable está conectado a un cabo o estrobo y este a la placa metálica situada en el pedestal. (<https://www.vastavalo.net/isoneva-pomarkku-isoneva-pomarkku-tukivaijerien-ankkurointi-maahan-505928.html>).

En lo que respecta a los cables usados en edificios, aplicables según la norma ASCE 19, en cada caso dentro de los estándares mencionados anteriormente se indican las restricciones que estas conexiones deben tener y cuando puede un método ser usado o no. En la mayoría de los cables de alta resistencia y secciones grandes está prohibido el uso de conexiones mediante empalmes o estrobos abiertos en donde el cable es el que traspasa las cargas a los otros elementos sin algún soquete de por medio. Usualmente la magnitud de las cargas que deben ser transferidas es alta y se debe velar por mantener la integridad de los cables interviniéndolos lo menos posible o reducir la posible exposición a daños como sería el caso de los estrobos.

A modo de requerimiento general el estándar ASCE 19 menciona, en el capítulo 5 relacionado a los elementos de conexiones, que estos deben ser posicionados de manera que no sean un punto de acumulación de polvo y suciedad y se debe entregar protección adicional a la corrosión en estos elementos si la condición anterior no puede ser cumplida. En esta norma se indica también los tipos de materiales que pueden ser vertidos en las conexiones que utilicen estos métodos (encajes). Se debe utilizar aleaciones de zinc que cumplan los requerimientos indicados en los estándares ASTM B6 para Zinc puro y ASTM B86 para aleaciones de zinc, o se pueden verter resinas especiales siempre y cuando sean aprobadas tanto por los proveedores como por los mandantes acorde a los

requerimientos del proyecto. Para el diseño se debe considerar que las conexiones inducen una pérdida de la resistencia a la rotura de los cables acorde a la transferencia de cargas de estos a los diferentes métodos de conexión. Se debe ponderar la resistencia a la rotura mínima por un factor que se encuentra tabulado acorde al tipo de conexión que se está usando y la forma del cable, ya sea este con cordones o con un solo elemento embarrilado helicoidalmente.

Todos los sistemas de conexiones que se pueden encontrar en el mercado cuentan con patentes propias y son diseñados por cada empresa proveedora. Es por esto que la cantidad de variaciones en soquetes, estrobos y sistemas completos de conexiones son tan diversos y se pueden encontrar muchas soluciones para un mismo problema. Cada empresa cuenta con catálogos para cada uno de sus productos y cumplen con estándares internos de calidad además de los requerimientos generales de resistencia impuestos por las normativas.

3.1.6 Sistemas de Tensado, durante la construcción

Muchas estructuras que son construidas en base a cables o tienen sistemas que contemplen este tipo de elementos, como son las estructuras tensadas con membranas, requieren para la construcción y/o para el estado final que los cables sean pretensados. Las cargas de pretensado deben ser aplicadas durante la construcción y acorde a ciertos requerimientos que permitan un montaje seguro, eficiente y no dañen o perjudiquen los cables en el proceso. Para lograr esto existen tres métodos distintos los cuales son sistemas eléctricos, hidráulicos o mecánicos.

Sistemas eléctricos de tensado

Los sistemas eléctricos son básicamente un conjunto de motores eléctricos que van enrollando una serie de cables en un cilindro denominado huinche. Los huinches pueden ser usados para controlar el movimiento a medida que van tensionando los cables y requieren estar siempre anclados para su funcionamiento. Muchas veces el uso de huinches es combinado con un sistema de poleas, sobre todo cuando se requieren tensar grandes extensiones de cable o si se requieren niveles altos de pretensado en ellos. Para extensiones cortas de cable se pueden usar sistemas de poleas solamente. Las poleas van en grupos de 2, 4, 6 o más dependiendo de la fuerza que se desee aplicar y pueden ser colocadas en paralelo para una mejor distribución de las cargas.

Sistemas hidráulicos de tensado

Uno de los métodos más comunes de tensado hidráulico es el que utiliza gatos o prensas. Este sistema consiste en dos cilindros de diferente sección conectados el uno con el otro y cerrados por un pistón. Estos están acoplados a un sistema de líquidos que mediante el bombeo de ellos en las diferentes cámaras, y por las propiedades hidráulicas que poseen, logran mover el pistón y así traccionar los cables (**Figura 23**). Las principales ventajas de este sistema es que es de alta precisión y capacidad, además que se pueden colocar varias presas en paralelo y controlarlas todas al mismo tiempo.

Es necesario para el uso de presas hidráulicas que en los cables sean montados en equipos especiales temporales los cuales deben ser construidos y diseñados para cada proyecto. Muchas veces el aparataje es para poder conectar un extremo de los cables con la maquinaria que se encuentra fija en algún anclaje a cierta distancia. Estos pueden ser construidos utilizando barras de acero u otros cables. El tiempo de montaje de las maquinarias y equipos es usualmente mucho mayor al necesario para lograr el pretensado requerido y muchas veces estos no pueden volver a ser usados lo que hace que sean relativamente más caros que otros sistemas.



Figura 23. Presa hidráulica (<http://www.fpt-worldwide.com/en/works/hydraulic-system-for-tensioning-ropes/>).

Sistemas mecánicos de tensado

Dentro de los sistemas mecánicos de tensado, el más utilizado es el 'tirfor' o huinche operado manualmente accionado por palancas (**Figura 24**). Trabajan utilizando el principio de sujeción excéntrica que consiste en 2 mandíbulas que pueden sujetar el cable, una inmóvil al huinche y otra que es controlada por la palanca, que funcionan de manera alternada, es decir, cuando la mandíbula fija no está trabajando si lo hace la móvil desplazando el cable una cierta distancia y cuando se requiere que esta vuelva a la posición inicial se suelta y la primera actúa para mantener las tensiones aplicadas sobre el elemento. El modo de uso consiste en que un extremo del cable a tensar es sujeto al aparato mediante el uso de mandíbulas, posteriormente se mueve una palanca hacia adelante y atrás para lograr el movimiento del cable y por consiguiente que este sea tensionado. Los huinches mecánicos cuentan con una palanca para la carga y otra para la descarga o de operación inversa la cual puede ser aplicada de forma gradual de ser necesario.

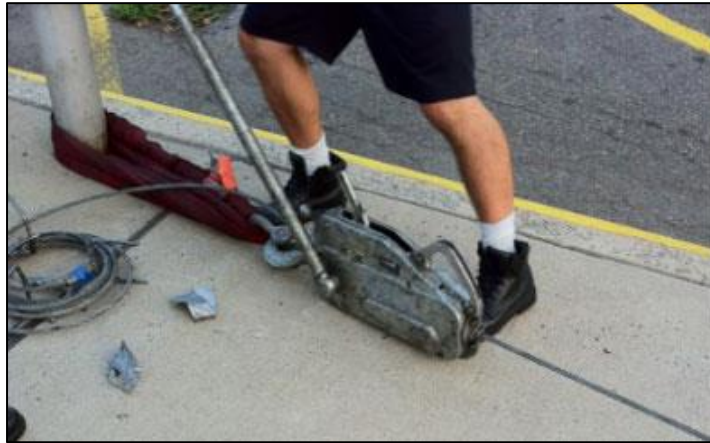


Figura 24. Huinche manual siendo utilizado.
(<http://www.fireengineering.com/articles/urban-firefighter/print-articles/volume-01/issue-07/griphoist.html>).

Otros métodos mecánicos de tensado, lo hacen mediante un trinquete o tecla. El modo de operación es el mismo que para el huinche manual. También se pueden tensar cables que no presenten o requieran grandes cargas con un tensor, que es un aparato que cuenta con fijaciones hiladas en sus dos extremos y que están apernados a un elemento central. Los hilos de los extremos son de dirección contraria de manera que al girar el elemento central del tensor provoque que los extremos se junten, produciendo el tensado.

3.1.7 Propiedades especiales de los cables

Los cables embarrilados de forma helicoidal, y que presentan cordones en su composición, al ser sometidos a cargas axiales tienden a desenvolverse y quedar en su estado natural debido a que hay una componente de fuerzas transversales. Este efecto sumado a las tensiones residuales, debido a deformaciones plásticas en los alambres, podría desencadenar torques internos dentro del cable en torno al eje central. Esto puede ser evitado, en caso de que un proyecto lo requiera, al darle giros contrarios en las diferentes capas de cordones y alambres, que sean intercalados hacia la derecha y luego hacia la izquierda.

Al flexionar un cable a lo largo, este no ofrece mayor resistencia debido a sus propiedades básicas estructurales pero aun así al ser elementos no bi-dimensionales se pueden presentar esfuerzos no deseados. Los cables son considerados flexibles y estos pueden solventar de mejor manera los esfuerzos si están entramados en forma de hélice ya que al flexionar los cordones, como van cambiando de un lado a otro, todos comparten y reparten los esfuerzos de tracción y de compresión. Los parámetros que rigen el comportamiento al pandeo de los cables son principalmente el diámetro de este y el largo del entramado.

Existe un problema asociado a la confección de cables con entramados helicoidales y es que estos causan esfuerzos adicionales si son tensados debido al ángulo de giro de los alambres o cordones. Si son estirados, tienden a retomar la forma

recta que debiesen adoptar de forma natural y este efecto produce cargas transversales a la dirección del cable produciendo que este se desenrolle. Esto se ve reflejado en que los cables no presentan la misma resistencia nominal que un elemento rígido de la misma sección y se debe considerar esta pérdida al momento del diseño

3.2 Membranas

Las membranas son usualmente compuestas de varios materiales los que combinados generan una serie de propiedades idóneas para las distintas situaciones en las que se necesiten. Esto está determinado principalmente con el uso estructural que se le va a dar a la tenso-estructura, a las condiciones climáticas y las necesidades específicas del proyecto. Constan normalmente de una trama de fibras de algún material resistente, ya que estos son los encargados de entregar la resistencia a la estructura tensada, al cual se es cubierto por otro más resiliente capaz de resistir las acciones externas no estructurales a la que la cubierta pueda ser sometida.

Dentro de las fibras utilizadas se pueden separar en 4 categorías: naturales, sintéticas, metálicas y minerales.

Las fibras naturales son las que primero se usaron en la fabricación de membranas tensadas como lo eran las velas de barcos (al momento de ser empujadas por la acción del viento) o en la aviación. Dentro de los materiales están el lino, el cáñamo, el algodón y la lana. Las fibras sintéticas corresponden principalmente a polímeros como el poliéster, polietileno, poliamida, Aramida entre otras. Las fibras metálicas son usualmente de acero, aleaciones de cobre y aluminio y las sintéticas pueden ser de fibra de vidrio o fibra de carbón.

Se pueden clasificar las membranas actuales en dos grandes grupos acorde a como están construidas y son las más ampliamente usadas. Un primer grupo corresponde a las que son fabricadas utilizando películas de plásticos. Este tipo de materia posee una sola capa casi transparente de poco peso y resulta útil en proyectos que requieran bajas tensiones impuestas en la membrana ya que posee una capacidad reducida y no puede ser utilizada en grandes luces.

El segundo grupo de membranas son las de tela recubierta. Estas normalmente consisten en tres capas de polímeros sintéticos en la que la parte central cuenta con un tejido de hilos, los cuales pueden ser en una dirección de forma paralela, de forma ortogonal en dos direcciones o retorcidos juntos (**Figura 25**).

El recubrimiento de estas telas es necesario para darle protección adicional a efectos externos a los mecánicos. Usualmente se usan dos combinaciones de materiales: fibras de poliéster cubiertas de PVC y fibras de vidrio de alta resistencia cubiertas en PTFE (teflón).

Las fibras de poliéster sintético (PET) son las más usadas en las telas de poliéster recubierto en PVC. La principal ventaja de este material es que mantiene la estabilidad dimensional a los efectos químicos y físicos que se le presentan y que además no se deteriora con el tiempo.

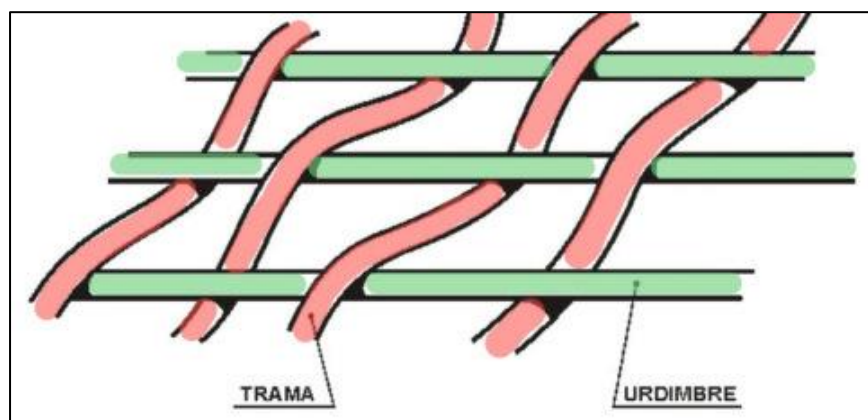


Figura 25. Indicación de cuál es la trama y cuál es la urdimbre (<https://unmundodemateriales.wordpress.com/2016/02/09/que-son-las-fibras-textiles/>).

3.2.1 Parámetros físicos y mecánicos

Los parámetros físicos de las membranas vienen dados por sus comportamientos a las cargas, tiempo y temperatura de manera externa y a la forma de fabricación, componentes que presenta y materiales usados de manera interna. Las propiedades más importantes en las membranas para la correcta descripción en sus comportamientos físicos, geométricos y de materiales bajo cargas mecánicas son su comportamiento elástico, fuerza y rigidez, tendencia a las rajaduras a extenderse, posibilidad de plegarse y el efecto de creep.

Comportamiento elástico

Como se mencionó en capítulos anteriores de esta memoria, las membranas presentan un comportamiento no lineal geométrico esto significa que, al aplicar cierta carga de manera uniforme, las deformaciones que esta presenta no son acordes a ella. Se profundizará más en este tema en la sección de análisis estructural de la memoria.

Otro factor que determina el comportamiento elástico, o inelástico de las membranas es que estas poseen características anisotrópicas. De la forma en que las membranas están construidas, poseen una dirección que presenta mayor resistencia que en la dirección ortogonal. Es por esto que las membranas deben obtener los valores de resistencia y rigidez de varias direcciones diferentes.

La forma en que las fibras están hiladas en las membranas también influye en la resistencia que esta produce. La trama tiende a tener menos curvaturas internas al momento de ser tejida que la urdimbre y es gracias a esta diferencia geométrica que se tiene una rigidez mayor al lado de las fibras que posean mayores curvaturas, pero se tiene una resistencia axial superior en las que están más rectas.

Resistencia de la tela

Los comportamientos mecánicos de las membranas son determinados en gran parte por los comportamientos de las fibras y la geometría de la forma en que fueron hiladas la trama y urdimbre. Para evaluar los comportamientos mecánicos de las membranas se realizan ensayos separados de cargas permanentes o de peaks de corto período de aplicación. Para determinar el punto de rotura de la membrana en varios años se realiza un ensayo de aproximadamente 1000 horas de largo plazo, tanto de manera axial como biaxial, y el material debe mantenerse en todo momento con tensiones inferiores a las de rotura para pasar el ensayo. Los ensayos de corto plazo usualmente cargan las membranas con mayor fuerza que lo hacen los ensayos de largo plazo, y lo hacen tensándolo hasta alcanzar el punto de rotura. Se debe tener en consideración al momento de diseñar una membrana tanto los comportamientos de largo como de corto plazo en una dirección o en dos direcciones.

Resistencia de la costura

Muchas veces las membranas no pueden ser producidas de la forma que se desea o necesita sino que deben ser fabricadas por partes y ser cocidas para formar secciones más grandes. Las costuras deben ser capaces de resistir por lo menos la misma cantidad de carga que el material que están juntando. La principal función mecánica de estas juntas es que puedan traspasar la totalidad de las cargas de una sección de membrana a otra y estas son realizadas en secciones grandes de la misma. El principal método para lograr estas uniones es el uso de traslapos.

La resistencia de la membrana es tan grande como la resistencia del traslapo y estas uniones determinan el comportamiento ante las cargas de la misma. La causa de esto es por un lado, el material del que están construidas las uniones y por otro la forma en que son capaces de trabajar en torno a las fuerzas principalmente debido a que son materiales discontinuos, a diferencia de la membrana misma.

Si la costura es cargada de forma transversal entonces se tiene un 20 – 25% de pérdida de resistencia en comparación a la que posee la membrana, produciendo que este sea un punto de falla recurrente en este tipo de estructuras. La resistencia de las costuras debe ser un parámetro a tener en consideración al momento de diseñar las membranas pero también se deben tener en cuenta la forma en que la carga es aplicada en las membranas, por ejemplo, si las cargas son aplicadas de forma transversal a la línea de la costura entonces esta se comporta como corte y no como tensiones axiales. Es por esto que es importante determinar el arreglo de las conexiones y costuras en la membrana que garantice que las cargas son aplicadas de manera eficiente.

Comportamiento de propagación de rajaduras

Si las membranas son dañadas por agentes externos y está bajo los efectos de las diferentes cargas, entonces existe la posibilidad de que la dimensión del daño aumente. Como la mayoría de las fallas en las membranas se deben a la propagación de las rajaduras, es por esta razón que este parámetro debe cumplir ciertas características indicadas en las normas y determinadas para cada proyecto. Se puede determinar la velocidad de rajaduras mediante ensayos biaxiales, aunque también se tienen resultados para ensayos uniaxiales, pero estos no son fidedignos del comportamiento real de una rajadura en presencia de cargas.

Resistencia al corte

Si existen fuerzas que no actúan en la dirección principal de las fibras, sino que actúan en la superficie a través de los bordes, entonces la resistencia al corte tiene gran relevancia. Para estos casos la membrana debe permitir deformaciones de corte entre la trama y la urdimbre, las cuales corresponden al caso en que se tengan fuerzas de corte en los materiales. Mientras no se interfieran las fibras de la trama y la urdimbre entonces solo se crea una pequeña distorsión entre en el revestimiento sin causar esfuerzos considerables en ellos. La resistencia de las membranas al corte se puede verificar mediante ensayos axiales o biaxiales en donde el comportamiento se mide en relación a la curva de corte-deformación.

Resistencia al plegado

Este parámetro es usado básicamente en todas las situaciones anteriores a la construcción, ya sea en el proceso de montaje, al doblar las telas y soltarlas cuando los soportes auxiliares ya no son necesarios. Algunos materiales son más susceptibles al daño por pliegues que otros y se debe tener en consideración el modo de montaje de estos al momento de diseñar una membrana. El ensayo para determinar la resistencia al plegado se realiza colocando la membrana plegada y pasando un rodillo de peso determinado y ver cuando esta tiene pérdida de resistencia.

Reducción de resistencia por efectos de carga, tiempo y temperatura

Como todos los elementos estructurales, el efecto de las cargas en el tiempo produce un debilitamiento en la capacidad de los mismos y las membranas no son la excepción. Si hay un aumento en la deformación bajo la aplicación constante de cargas en un cierto período de tiempo, entonces este efecto es llamado creep. La variable relevante en el creep es el tiempo. A una carga constante, la deformación aumenta a medida que se aumenta el tiempo y el material es menos capaz de resistir las cargas permanentes. El ensayo para determinar el creep de una membrana es colocándola bajo tensión por un largo período de tiempo y registrando las deformaciones.

En condiciones de aumento de las temperaturas, y bajo la acción de cargas, en las membranas se producen mayores deformaciones. Incluso existen ciertos grados en que este efecto es superior, produciendo que las membranas pasen de comportamientos relativamente elásticos a comportamientos plásticos. Es por esto que la protección al fuego es de gran relevancia y muchas de las membranas requieren que sean consideradas ignífugas.

3.2.2 Vida Útil, protecciones a agentes externos y al fuego

Las membranas son susceptibles y están expuestas a varios tipos de agentes externos de los cuales deben ser protegidos como efectos químicos y biológicos y los efectos del clima. También son propensos a debilitarse debido al envejecimiento y efecto de cargas permanentes sobre ellas (creep). Es por esto que el recubrimiento y protección adicional es un parámetro tan importante y existe tanta variedad en el mercado.

El material usado para proteger las telas de poliéster es el PVC-P (Cloruro de polivinilo con plastisol y aditivos adicionales). Este es un material termoplástico hecho de polímeros con cadena lineal de moléculas el cual al ser calentado puede fluir y ser aplicado a las telas. El proceso de colocación comienza aplicando una película del recubrimiento con componentes adhesivos en forma de pasta sobre la tela la cual es esparcida con diferentes cuchillos. Una vez aplicada esta pasa por un proceso de horneado en el cual se calienta el adhesivo produciendo que este penetre las fibras y se funda con el material sintético. Posteriormente este compuesto se enfría y aprieta mediante el uso de agua y rodillos para dejarlo listo para la aplicación de la siguiente capa, que consiste en el mismo proceso de colocación del recubrimiento solo que sin el componente adhesivo. Normalmente las membranas poseen recubrimientos en ambos lados por lo que este proceso deben ser repetido por el otro costado.

La protección que es aplicada en las membranas es directamente proporcional al espesor del recubrimiento que es colocado. Usualmente se colocan espesores de 0.08 [mm] a 0.25 [mm]. Para membranas típicas la cantidad de recubrimiento es de 500 [g/m²] de superficie, en donde 200 [g/m²] son aplicados en la parte inferior y 300 [g/m²] en la superior, siendo el recubrimiento base para ambos lados de 100 [g/m²]. Si se necesita protección adicional en las membranas entonces el recubrimiento base es ahora de 200 [g/m²].

Existe otra protección adicional a las ya mencionadas y son las que se colocan por sobre la superficie terminada. Hay dos procesos posibles, la aplicación de pinturas y aplicación de películas laminadas.

La laminación consiste en colocar una capa delgada, sólida y transparente de PVC, que contiene agentes protectores lo cual la hace resistente a los rayos UV, además que gracias a los pigmentos de color blanco puede reflejar la luz ultravioleta. Las principales desventajas es que al aplicar esta película las membranas se vuelven menos manejables y más rígidas.

La pintura aplicada sobre las membranas es usualmente de PVDF (fluoroplástico) y acrílicos y no produce un efecto rigidizante en la tela. Se agrega una pequeña película de pintura por ambos lados mediante solventes en pequeñas capas.

Las membranas son muy susceptibles al fuego, ya que los polímeros si son calentados pierden rápidamente las propiedades resistentes que poseen. Es por esto que la protección al fuego debe ser estricta, a tal nivel que las telas deben ser consideradas en su gran mayoría como inflamables. El ASCE 55 entrega los requerimientos de disposiciones de combate del fuego como colocación de alarmas, sprinklers o extinguidores además de que se cumplan los requerimientos de la norma NFPA 10.

Existe una clasificación de las membranas acorde a la resistencia que deben tener al fuego, las Clase I, Clase II y Clase III. La Clase I de resistencia al fuego son aquellas que son definidas como no combustibles acorde a los estándares locales y deben cumplir con el estándar NFPA 701 acerca de la propagación de las llamas y generación de humo. Las pertenecientes a la Clase II son aquellas que se les permite un límite combustible en caso de fuego acorde al estándar NFPA 701. Las Clase III son todas aquellas que no cumplen con los requerimientos para pertenecer a alguna de las otras dos.

3.2.3 Componentes de conexión, sistemas patentados

Las formas de conexión en membranas son muy variadas y de diferentes tipos y formas las cuales pueden ser categorizadas acorde a su funcionamiento, componente que incluyen y a cuales elementos son conectados. A continuación se separará entre aquellas que son usadas para conectar dos piezas de membranas entre ellas de las que se usan para unir otros elementos.

Conexión entre membranas

Las membranas no pueden siempre ser fabricadas de las dimensiones que los proyectos requieran, es más, la mayoría de las veces es necesario que estas sean cortadas en paneles y unidas entre ellas para cubrir las superficies que le son solicitadas y para lograr esto existen varios métodos.

En primer lugar están las conexiones que son de carácter permanente, es decir, se mantienen en la estructura durante toda su vida útil y son tan importantes como la tela misma y dependen de las características de la estructura. Los métodos de conexión permanentes pueden ser mediante soldadura, costuras, una combinación de ambas y pegadas con adherentes especiales. Las uniones permanentes son usualmente flexibles pero existe una diferencia entre la rigidez de la zona unida que la de las membranas.

El sistema de costuras soldadas es el más usado en estas uniones. Pueden ser producidos mediante traslape de las membranas o en un cordón en el borde de dos telas y a lo largo de todo el perímetro. La resistencia de la soldadura depende del proceso en el que se haya construido además de la adhesión que se produzca entre el recubrimiento y la tela y es entre un 65 %– 95 % de la resistencia de la membrana. Las costuras soldadas son usualmente a prueba de agua y con protección UV.

El proceso de soldadura de telas recubiertas es posible solo con termoplásticos. Los plásticos son pobres conductores del calor, luego el soldado de telas delgadas produce menos problemas que si se hiciera en capas gruesas. El proceso de soldado une dos o más piezas de tela del mismo material bajo la influencia del calor y sin el uso de adhesivos. Este proceso puede ser con o sin la necesidad de aplicar presión. Las formas de soldado de materiales son usualmente dos, las de alta frecuencia o la que utiliza elementos calientes.

Las soldaduras de alta frecuencia constan de unir dos trozos de tela mediante un proceso de calor y presión. Estos son colocados, al momento de ser soldados, bajo un campo de altas frecuencias lo cual produce que ciertas moléculas oscilen acorde a esta vibración y tomen temperatura para posteriormente ser unidas. La presión se mantiene incluso después de dejar de aplicar las vibraciones y se deja enfriar logrando así la conexión deseada.

La calidad de la conexión depende de la presión aplicada, de la forma de la prensa usada, del proceso de temperatura y la velocidad de soldadura. Las membranas de poliéster recubiertas de PVC son unidas con este método y alcanzan resistencias del 90% de la tela.

El proceso de soldaduras con elementos calientes consiste en calentar las dos piezas de membrana que se quieran unir mediante contacto a altas temperaturas. Con esto, las partículas de plástico, que son termoplásticas, se funden y separan unas de otras y mediante la presión ejercida penetran en las fibras de la tela principal logrando la soldadura.

Otro sistema de unión es en el cual las membranas pueden ser cosidas ya sea para formar una superficie mayor entre dos elementos similares o para colocar una conexión hacia otros elementos estructurales. Este método no es muy usado últimamente debido a que requiere que la membrana sea perforada, dañando la protección que tenga a la humedad y rayos UV además de crear puntos de debilidad más importantes que si se realiza este propósito usando soldaduras. Se debe tener especial cuidado con las costuras debido a que estas pueden presentar hebras demasiado juntas entre ellas.

Por último los sistemas de unión con adhesivos solo son usados para unir las membranas de fibra de vidrio con recubrimientos de silicona ya que este tipo de material no puede ser soldado. Se deben tratar ambas superficies que se desea unir antes de aplicar el pegamento y pueden alcanzar resistencias similares a la del material que está uniendo.

Conexiones a otros elementos

Uno de los principales problemas con las membranas es que deben ser tensadas en todo su borde, siendo esto interpretado como un desafío ya que deben poseer una especie de conexión continua con otros elementos estructurales. Esta problemática se dificulta más cuando las membranas toman formas de varias curvas por lo que elementos rectos no pueden ser usados siempre, por eso, la solución más factible para estas estructuras es el uso de cables de borde. Los bordes de las membranas pueden sufrir cambios en su forma a medida que son aplicadas las cargas. Es por esto que la flexibilidad de los cables juega un papel importante en el detallamiento de borde. Otro problema que se presenta al usar un sistema de perímetro rígido es que este no le entrega la posibilidad a las membranas de relajarse ante los peaks de estrés que pueda sufrir.

Debido a que las estructuras que presentan membranas usualmente poseen elementos rígidos en ella, se debe restringir las deformaciones de manera que sean compatibles entre ellos. Esto implica que se debe tener en consideración la relación de rigideces entre la membrana y el sistema de conexión con los bordes de esta a los diferentes elementos.

La conexión de borde de las membranas puede clasificarse en dos tipos. Si un elemento de borde es solidario a toda la orilla de la membrana y se le traspasan las cargas en una línea curva que posteriormente son guiadas hacia un anclaje, entonces ese elemento se considera un elemento de borde flexible. Estos elementos solo pueden ser cargados a tensión la cual es uniformemente distribuida a lo largo de su sección transversal.



Figura 26. Modos de conexión de bordes en membranas. Se puede ver que por un lado la membrana esta unida a una viga metálica y que por el otro se encuentra conectada a un cable. (<http://alluae.ae/tensile-fabric-structures-ajman/>).

Si las fuerzas tangenciales son traspasadas a elementos lineales, fijos o formados por múltiples componentes y estos conectados a otros elementos estructurales ya sea de forma puntual o a lo largo de una línea entonces es llamado un elemento de borde rígido (**Figura 26**).

Conexiones flexibles

El método más usado para conexiones de borde flexibles es el uso de cables o cuerdas. Los cables son instalados a lo largo de todo un borde de las membranas y se conectan a otros elementos estructurales en las puntas con alguno de los métodos mencionados en la sección anterior de esta memoria.

En lo que respecta a la membrana, se coloca una orilla que envuelve al cable y se suelda nuevamente a esta manteniendo ciertos parámetros de largos para esto. La profundidad de la orilla depende de la tensión que haya en la membrana y en el cable de forma perpendicular. Se deben realizar ensayos uniaxiales o biaxiales para determinar la resistencia efectiva de las conexiones de borde.

Si las fuerzas de fricción entre el cable y la membrana no son suficientes para evitar que exista desplazamiento entre estos dos elementos entonces se deben colocar elementos auxiliares a lo largo del borde que suplan este problema.

Existen conexiones con los cables que no requieren de mangas con orillas y pueden ser montadas en la membrana posterior al montaje de los cables. Estas conexiones constan de mandíbulas que se conectan a la membrana y poseen lazo metálicos fijados por pernos para ser sujetos en los cables (**Figura 27**).



Figura 27. Conexión de borde utilizando cables. Aquí se aprecia las conexiones individuales utilizando el método de prensa. (<http://www.spaziosolare.com/velarias/>).

Conexiones rígidas

La conexión principal usada dentro de esta categoría es la de placas de sujeción. Esto consiste en una serie de placas que son sujetas a la membrana mediante pernos, los cuales son fijadas a otra placa que se encuentra en el elemento que se quiera conectar mediante el uso de una tela auxiliar. En las placas que se conectan a la membrana también va una tela que forma un arco fuera de los límites de su superficie, colocado sobre una cuerda que va alineada a las placas del elemento rígido que se quiera unir logrando así la conexión (**Figura 28**). Mediante este método se debe perforar la membrana por lo que el espaciamiento de estos agujeros debe tenerse en consideración para no producir un debilitamiento excesivo en las propiedades de la tela. El largo de las placas y cuanto deben penetrar en la superficie de la membrana debe tenerse en consideración también. Esto depende de cada proyecto y de las cargas que le son transmitidas a las membranas.



Figura 28. Conexión rígida de membrana con viga. Se puede observar la placa que está siendo utilizada para este fin. (Birdair).

Elementos de esquina

Cuando dos bordes de membranas se juntan en un extremo, se considera que se está en una esquina y entonces la membrana puede tener anclajes a una placa metálica para luego ser conectada a otros elementos externos. La necesidad de aplicar en esos lugares los pretensados hace que las esquinas sean puntos de riesgo de sobrepasar los límites resistentes, ya sea de los cables como de las membranas.

Desde el punto de vista de la membrana, la extensión y dirección de las fuerzas a ser resistidas son dependientes también del ángulo en el área de la placa de esquina. Los elementos de borde en el área de placa de la membrana son prácticamente paralelos a la curvatura principal de la membrana. Los esfuerzos en la membrana, los cuales cercanos al borde van de manera axial al borde de la cuerda tangente, son introducidos en la placa de la membrana casi de manera paralela. Mientras más agudo el ángulo de la esquina, más importante es que esta sea capaz de resistir las cargas que le son impuestas.

Si solo se presentan cargas bajas hacia los ejes entonces los elementos de borde de tela pueden ser continuados hacia la esquina y conectados sin la necesidad de elementos adicionales (**Figura 29**).



Figura 29. Placa de esquina en donde confluyen dos bordes. Se pueden ver los elementos de borde (cables) siendo conectados a la placa de manera paralela (<http://www.eksentent.com/icerik/89/147/ASMA-GERME-MEMBRAN-TEKN%C4%B0K-DETAYLAR>).

3.2.4 Sistemas de Tensado, durante la construcción

Para aplicar las fuerzas en las membranas muchas veces es necesario, a diferencia de los cables, que varios mecanismos actúen desde varias direcciones distintas a modo de crear el campo tensional uniforme en toda la superficie deseada. Al igual que para los cables, los sistemas pueden ser mecánicos, eléctricos o hidráulicos y estos actúan muchas veces en los bordes de la tela. Las membranas rígidas pueden ser fácilmente tensionadas mediante el uso de sistemas de trincas. Consisten en una serie de cuerdas tubulares principalmente de poliéster con ganchos u otro tipo de sujeción en los extremos las cuales son tensadas mediante un teclé. Este sistema de tensado tiene la ventaja de que es relativamente de bajo costo, pero puede usarse solo en sistemas que no requieran grandes cargas. Si se requieren tensar grandes extensiones de membrana entonces los sistemas hidráulicos son los más recomendados, los cuales pueden usar cintas tubulares y reemplazar el teclé por este mecanismo.

Para poder ser montadas y posteriormente tensionadas, es necesario que las membranas sean situadas en la posición final. Pero este estado de auto sustentación muchas veces solo puede alcanzarse cuando las cargas ya están siendo ejercidas en ella, por lo que se deben colocar soportes auxiliares en parte del borde para ayudar en el levantamiento y servir de anclaje para el tensado. Estos elementos son fabricados en acero y sujetos en los bordes de la membrana con mandíbulas por un lado y con espacio para que se le coloquen otros elementos testadores en el otro. Puede haber elementos temporales o fijos y estos pueden estar en bordes o zonas donde haya confluencia de cargas. Se deben colocar placas en la membrana si se desea tener un agarre mayor (**Figura 30**).



Figura 30. Placa de agarre en al membrana. Se puede ver que por un lado se conecta la fijación hacia otros elementos estructurales y por el otro la placa que se conecta a la membrana y los cables de borde (<http://www.downerint.com/service/tensile-canopy-structures-2/detail/>).

3.3 Análisis estructural

Los criterios de diseño para las estructuras basadas en cables, como fue indicado en capítulos anteriores, difieren de lo establecido para las estructuras convencionales. El análisis estructural de los cables o membranas debe ser realizado teniendo en cuenta los comportamientos de estos a las cargas, ya que tanto los cables como las membranas presentan relaciones no lineales entre los esfuerzos que son aplicados y las deformaciones que resultan de ellos.

3.3.1 No linealidad en cables

La norma que rige a las construcciones con cables es la ASTM 19 y en ella se indica que una de las consideraciones al momento del análisis estructural más importantes es la no linealidad que estos presentan. Los cables presentan dos tipos de no linealidades, una no linealidad geométrica y otra no linealidad en los materiales, pero se ha demostrado que esta última no posee gran impacto en el comportamiento de los elementos.

La no linealidad geométrica ocurre cuando no se presenta un comportamiento elástico en la curva de deformación-desplazamiento, explicado de otra manera, si a un cable se le carga el doble de lo que está en un estado inicial, este no tendrá deformaciones el doble de grandes. Es por esto que la determinación de un módulo de elasticidad nominal para los cables no resulta trivial y se requiere hacer una ponderación entre los módulos de un cable que está siendo cargado y el módulo del mismo cable cuando es descargado.

Como se observa en la **Figura 31** la curva de carga y descarga de un cable no sigue el mismo camino de tensión-deformación y tampoco se observan incrementos lineales en ellos quedando demostrada la no linealidad de los mismos. Se puede apreciar que existen varios módulos de elasticidad presentes en el cable, dependiendo de si está en carga o descarga y de cuanta tensión se le esté entregando al mismo. Los módulos de elasticidad importantes a tener en consideración para un cable son el apreciado cuando no se tiene cargado el cable o módulo inicial y la ponderación entre los módulos cuando se encuentra con menor tensión y cuando está en su máximo.

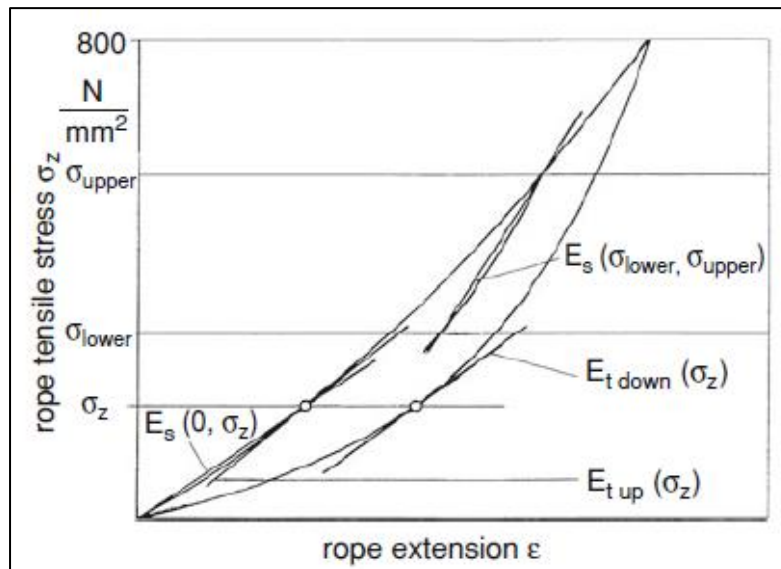


Figura 31. Curva de tensión-deformación de un cable en carga y descarga. En ella se rotulan los diferentes módulos de elasticidad. $E_{t\ down}(\sigma_z)$ y $E_{t\ up}(\sigma_z)$ corresponden a los módulos de elasticidad a una tensión dada que se aprecian en un cable cuando este va en descarga o carga respectivamente, $E_s(0, \sigma_z)$ es el módulo cuando no presenta carga y $E_s(\sigma_{lower}, \sigma_{upper})$ como la ponderación de los módulos cuando está con menor y mayor carga. (Wire Ropes tension, endurance, reliability. Feyrer, K.).

Todos estos comportamientos no lineales geométricos de los cables deben tenerse en consideración en el análisis estructural sobre todo porque podría ocasionar efectos en los desplazamientos de las uniones, no linealidad en las ecuaciones para el cambio de largos y no linealidad para las ecuaciones constitutivas.

Una característica de la no linealidad geométrica que presentan los cables es que se presenta en rangos de tensiones bajas, es decir, cuando un cable se carga lo suficiente

este vuelve a comportarse de forma lineal. Es por lo anterior que en casos en que el peso muerto de una estructura o los niveles de pretensado de los cables sean grandes o comparativamente mucho mayores que los de cargas vivas, entonces el análisis no lineal puede no ser requerido.

3.3.2 No linealidad en membranas

Las membranas al igual que los cables presentan no linealidad geométrica debido a que no se puede establecer una relación lineal entre la carga aplicada y la deformación que presenta. Estudios indican que en las membranas se tiene un aumento en la resistencia a medida que se le aplican mayores cargas sobre ella y que la curva de descarga de esta difiere, al igual que lo que pasa con los cables, de la de carga. Además de esto, se observa que las membranas no presentan un comportamiento elástico, sino que tienden a sufrir de deformaciones plásticas muy fácilmente, aunque si después de un proceso de carga y descarga este es cargado nuevamente se podrá apreciar un aumento en la resistencia a la deformación.

3.4 Normativas de Diseño

3.4.1 Cables

En la práctica de Estados Unidos, el diseño de cables está normalizado por el estándar ASCE 19 el cual entrega todas las indicaciones, consideraciones y comentarios necesarios para garantizar la estabilidad estructural del proyecto. A continuación, se mencionan los parámetros que deben tenerse en consideración al momento de diseñar estructuras con sistemas de cables.

Los sistemas de cables deben incluir en su diseño los elementos colocados específicamente para sostenerlos y estos no deben exceder las tensiones admisibles. Además, se deben diseñar de manera que posean una rigidez suficiente como para limitar los desplazamientos que puedan afectar a la estructura. Se debe diseñar la estructura global del proyecto, incluido los cables, de manera tal que posea la máxima redundancia y robustez posible, además de garantizar que la falla de uno elemento local no desencadene fallas en gran escala. Se debe considerar la posibilidad de reemplazo de elementos en caso de ser necesario.

La determinación de cargas estimadas en el proyecto debe ser acorde a lo que se presenta en la norma ASCE 7 o según los requerimientos locales del proyecto. De ser necesario estudios particulares como túneles de viento, fatiga de material o vibraciones especiales se podrán realizar cumpliendo con los estándares respectivos.

Las combinaciones de cargas son especificadas en el estándar ASCE 19 y solo deben ser aplicadas a los cables. Para otros elementos dentro de la estructura se deben utilizar las combinaciones indicadas en la norma ASCE 7 y la ASCE 55 en caso de presentar membranas. Se puede requerir un estudio e implementación adicional a los cálculos de cargas temporales situadas en el momento de la construcción, usando para esto el estándar ASCE 37.

Para todos los cables en un proyecto es necesario que la resistencia nominal sea mayor a las tensiones de la combinación más desfavorable, pero se deben tener en cuenta varios factores y ponderaciones al momento de establecer la resistencia de los elementos:

- Factor de reducción de encaje: este factor está determinado por el tipo de conexiones que se presenten en los cables y simula su efecto en la resistencia de los elementos. Se encuentra tabulado acorde a los tipos de cables y conexiones.
- Factor de reducción de deflexión: este factor pretende ajustar la resistencia de los cables acorde a los efectos que son generados en ellos las monturas o curvaturas.
- Factor de seguridad: este factor se aplica al valor final de la resistencia de los cables. Tiene un valor de 2.2
- Efecto de temperatura elevada: si se tiene una temperatura de servicio elevada por sobre los 93 °C se debe tener en consideración al momento de diseñar los elementos y las conexiones, además de ajustar el valor de la tensión de rotura y módulo de elasticidad de los cables.
- Fatiga de los materiales: es posible que se tenga que reducir el valor de la resistencia de los cables cuando estos son sometidos a fluctuaciones repetitivas de cargas ya sea por vibraciones o viento.
- Efecto de creep: para cargas aplicadas por largos períodos se debe considerar el efecto de creep sobre todo para las dimensiones de los cables y la estabilidad geométrica.

3.4.2 Membranas

El diseño de estructuras con membranas tensadas esta normada por el ASCE 55-16 en el cual se entregan todas las indicaciones y requerimientos además de comentarios y consideraciones para poder llegar a una estructura que se mantenga estable en el tiempo.

En primer lugar, se deben definir las cargas que serán aplicadas a la estructura, las que están normadas por el ASCE 7. A continuación se entregan algunas definiciones:

- Cargas muertas: el diseño de membranas debe considerar el peso muerto de la membrana, de los refuerzos y sistemas de conexiones, elementos estructurales que estén integrados a la membrana misma y cualquier otra carga que sea soportada directamente por la esta.

- Cargas superpuestas: cargas superpuestas como luces, ductos, etc. deben ser tratadas como cargas muertas cuando sean permanentes o cargas vivas si son colocadas de manera temporal. Estas cargas deben ser consideradas ausentes si se contrarrestan al momento de analizar la estructura con otras cargas como las de viento.
- Cargas de nieve, lluvia y sísmica: estas cargas deben ser aplicadas acorde a lo mencionado en el ASCE 7 y si las normas respectivas al proyecto lo requieran.
- Cargas de viento: Las cargas de viento deben ser aplicadas acorde a lo mencionado en el ASCE 7 o las normas locales.
- Cargas de techo, hielo, temporales o de presión interna: estas cargas deben ser regidas por los estándares respectivos y son mencionadas en el ASCE 7.

Algunas consideraciones adicionales se entregan en esta sección, sobre todo respecto a las cargas de viento debido a que el ASCE 7 no siempre tiene tabulado el procedimiento para las formas que las membranas pueden adoptar. En estos casos se puede realizar un estudio en túnel de viento u otro equivalente para estimar la magnitud y comportamiento de las cargas.

El diseño de membranas debe tener en consideración los siguientes factores especiales:

- Pérdida de pretensado debido a desplazamientos, tolerancias de construcción de elementos, creep del material o relajación de cualquier elemento.
- Variación de las presiones internas de la estructura en casos que se requiera.
- Deformaciones de cualquier elemento soportante.
- Acumulación de agua o nieve en las membranas.

Se debe tener en consideración la no linealidad mencionada en la sección de análisis estructural, tanto de las membranas como de los cables que formen parte del sistema.

Se debe mantener la estabilidad estructural cuando esta sea dependiente de las tensiones que ejerza la membrana sobre ella. Los elementos estructurales a los que son descargadas las tensiones de la membrana deben ser diseñados de manera que si ocurren fallas locales no induzcan a un colapso general de la estructura ya sea por pérdida de capacidad del elemento en cuestión o por movimientos excesivos de la estructura. La estructura debe tener en consideración los efectos permanentes de las cargas sobre la membrana (creep).

Las combinaciones de cargas son especificadas en el estándar ASCE 55 y solo deben ser aplicadas a la membrana. Para otros elementos dentro de la estructura se deben utilizar las combinaciones indicadas en la norma ASCE 7 y la ASCE 19.

La membrana debe ser capaz de resistir los esfuerzos aplicados a ella cumpliendo varias condiciones. Las membranas como fue explicado en secciones anteriores de esta memoria poseen dos direcciones de entramado, la trama y la urdimbre, siendo el primero considerado como el principal. Con esto en consideración las membranas deben ser diseñadas de manera que resista las acciones de cargas uniaxiales y biaxiales, las cuales son reducidas de la resistencia nominal gracias a los efectos de factor de ciclo de vida y factor de reducción a la resistencia. Se debe tener en consideración el proceso de montaje al momento de determinar las cargas máximas que le son solicitadas a la membrana ya que estas pueden alcanzarse al momento de la construcción en un paso previo al estado final. Para el factor de reducción a la resistencia es usualmente considerado el valor 5.

El factor de ciclo de vida debe ser aplicado a todos los elementos de la membrana. La finalidad de este factor es ajustar la capacidad de la membrana a los efectos del envejecimiento debido a agentes ambientales o la presencia de recubrimientos que la protejan. Los factores que condicionan el valor final del ponderador de ciclo de vida son varios; si la membrana mantiene por lo menos un 75% de la carga inicial de diseño a lo largo de su vida se deberá aplicar un factor de 0,75; si mantiene una carga menor al 75% de la carga inicial entonces ese factor debe ser reducido, si la membrana está sujeta a manejo constante se debe usar un factor de 0,6 y así sucesivamente.

3.4.3 Consideraciones y procedimiento en el diseño de membranas

El proceso de diseño de membranas tensadas requiere que quien se encargue de ello tenga en consideración todos los aspectos estructurales y comportamientos especiales que tanto los cables como las mismas membranas poseen en términos de no linealidad principalmente.

Lo primero que se debe tener en consideración al momento de diseñar una membrana es determinar la forma base que la estructura va a adoptar al momento de estar construida. Las membranas que poseen un campo de tensiones uniforme a lo largo de toda su superficie se comportaran como una película de jabón. Si no se puede imaginar una película de jabón adoptando la forma que se pretende imponer a la estructura, entonces la membrana tampoco va a ser capaz de hacerlo.

El siguiente paso es determinar las condiciones de borde de la membrana. Las posibilidades son varias ya sea que esté sujeta con cables en su perímetro o que se conecten directamente a elementos rígidos como vigas o columnas. También existe la posibilidad de que exista un poste o mástil sosteniendo las cargas desde el punto más alto o sea todo montado sobre un esqueleto enrejado.

Otro aspecto importante es decidir que software computacional se utilizará en el diseño. Es necesario que este posea una rutina que pueda determinar las formas que adoptan las membranas (form-finding).

Cuando ya se tiene definida una forma, se procede al diseño mismo de la estructura y para esto hay que tener varias consideraciones. Las membranas solo trabajan bien las cargas si estas son transferidas hacia el perímetro en donde están construidos. El perímetro debe ser del tamaño suficiente como para resistir las cargas que le son transferidas. Muchas veces esto significa colocar anillos de compresión o algún tipo de apoyo extra si es que no se cuenta con un perímetro continuo. Se debe evitar diseñar áreas que sean horizontales o que tengan poca pendiente por los problemas con la acumulación de lluvia o nieve, además que no trabajan de manera óptima en el traspaso de cargas.

Un diseño integral puede ser alcanzado con el programa computacional adecuado y este debe incorporar las propiedades de las diferentes secciones de elementos estructurales, los materiales, sus resistencias y propiedades. Se deben aplicar las cargas correspondientes a las características del proyecto, y deben incluir cargas muertas, cargas vivas y cargas de viento en todos los casos. Las cargas de temperatura o sísmicas solo son aplicadas si las características de la estructura lo permitan, además de realizar un chequeo de estabilidad. Se debe usar un factor de seguridad de 5 en la resistencia de las membranas.

El paso siguiente al diseño estructural propiamente tal es el que todos los elementos presentan esfuerzos menores a los límites resistentes y con los factores de seguridad aplicados de manera correcta se debe considerar los detalles que no se contemplan regularmente al momento del cálculo. Se debe considerar la construcción de los elementos como por ejemplo si los elementos perimetrales deben ser conectados o soldados por que exceden las longitudes comerciales o si a un punto llegan muchos cables y no hay espacio suficiente como para colocar la placa que los conecte a todos.

También se debe tener en consideración que las membranas deben ser unidas en ciertos puntos y que no son de extensión ilimitada como se muestra en los programas computacionales. También se deben diseñar las conexiones que se deben realizar en los cables con las membranas o a otros elementos estructurales. Las mismas membranas deben ser conectadas a los elementos a los que se les traspasará la carga y estas uniones tienen que ser diseñadas.

Existen otras consideraciones a tener en cuenta. Una es en relación a la orientación de las fibras de las membranas. Es sabido que existe un lado principal donde la dirección de las fibras hace que tenga mayor resistencia y este debe usarse en el lado más desfavorable de la estructura que presenta mayores esfuerzos. Otra consideración es la cantidad de membrana que va a ser desechada para reducir los costos finales del proyecto. Se recomienda el uso de secciones triangulares y trapezoidales por sobre las que posean forma cuadrada o rectangular.

Por último, se debe poseer un entendimiento avanzado de las propiedades de las membranas antes de mandar a fabricar. Las membranas deben ser diseñadas con cierta cantidad de pretensado uniforme y al variar estas en su espesor y rigidez puede que al momento de montar la estructura no se alcance la magnitud deseada. Se deben realizar ensayos biaxiales de esfuerzos a modo de determinar las compensaciones necesarias que se deben aplicar, es decir determinar el tamaño del cual deben ser cortadas las

secciones de membrana para que al momento de ser instalado se deba estirar y así alcanzar los valores de pretensado requeridos.

3.4.4 Control de deformaciones

Un factor común para todas las estructuras es la necesidad de controlar las deformaciones dadas las diferentes combinaciones de cargas. Para las estructuras convencionales, esto viene determinado en función de la luz de un elemento del proyecto y posee un valor característico, el que puede variar en base a las condiciones específicas de este, y es un número que define la máxima deflexión que se le permite. Para las estructuras que son diseñadas con elementos en base a cables, pueden ser determinados de esta misma forma, si se combinan con elementos rígidos como es el caso de un puente colgante, pero no todas cumplen esta normativa. Muchas estructuras, sobre todo las que son sostenidas por un sistema complejo de cables (como es el caso de estructuras que usen tensegrity o que posean membranas) tienen grandes deformaciones por su naturaleza, sin que estas representen una amenaza a la estructura misma. Es por esto que no se puede determinar un valor característico del límite de las deformaciones que son capaces de existir en una estructura, sino que esto queda a criterio del mandante, en acuerdo con las partes involucradas, dada la utilidad que se le quiera dar al proyecto. Esto se ve reflejado en las diferentes normas que rigen este tipo de estructuras.

“Cables shall be so proportioned that the maximum deflections under the combined action of applied loads, temperate change, and cable stretch will satisfy the serviceability requirements.” – ASCE 19-16

Como se lee en la cita anterior, la ASCE indica que *“las deflexiones máximas debido a la aplicación combinada de cargas, los cambios de temperatura y estiramiento del cable, deben satisfacer los requerimientos de la utilidad”*.

Esto se complementa con lo mencionado en la normativa europea que aplica a los cables. Es más, en una recomendación francesa se indica que en los cables

o membranas no deben ocurrir cambios en la curvatura que presentan, es decir, que haya inflexiones y estas pasen de tener una forma cóncava a una convexa.

Code Review No. 23

French recommendations:

For covering structures more than 250 m², or more than 20 m of radius of curvature

- *The absence of inversion of curvature must be checked for the combination: prestress + own weight + normal snow*

- *Inversions of curvature may be admitted, provided that the repetition does not affect fatigue or durability of the membrane and their connections for the combination: prestress + own weight + normal wind*

En el párrafo anterior se indica que “para estructuras que cubran más de 250 [m²] de superficie o que tengan curvaturas de radio mayores a 20 [m], se debe chequear que no existan cambios o inversiones en la curvatura para la combinación de pretensado + peso propio + nieve. Se pueden admitir cambios en la curvatura si se verifica que su acción repetitiva no afecte la durabilidad de la membrana o produzca fatiga en ella”.

Lo anterior es complementario a lo que especifica la misma norma en un párrafo posterior, donde se indica que los “límites de deflexiones verticales y horizontales deben ser especificados para cada proyecto y aceptados por el cliente”.

Eurocode Outlook No. 41

(1) *With reference to EN 1990 – Annex A1.4 limits for vertical and horizontal deflections should be specified for each project and agreed with the client.*

NOTE: The National Annex may specify the limits.

CAPÍTULO 4: CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS

Como fue mencionado en capítulos anteriores de esta memoria, el proceso de construcción de estructuras que presenten cables o membranas flexibles toma una mayor relevancia que la de estructuras convencionales por la naturaleza de las mismas, sus propiedades y comportamientos, a tal punto que deben ser consideradas al momento de diseñar un proyecto, sobre todo, en el aspecto de la secuencia constructiva.

El propósito del estudio del montaje también está justificado por el tema monetario ya que una correcta implementación de maquinarias u orden en que se colocan los elementos puede llevar a una reducción en los costos de construcción. Pero este no es el único factor que se debe tener en cuenta al momento de la construcción sino que también es necesario considerar las condiciones del emplazamiento del proyecto como del transporte de los materiales.

4.1 Preparación del trabajo y pre ensamblado

La mayoría de los sistemas con cables o membranas requieren de varios elementos unidos entre sí de este tipo que trabajen en conjunto para poder sustentar tanto geométrica como estructuralmente el proyecto. Estos en su mayoría no pueden ser contruidos en las fábricas como sí lo son las estructuras de acero o concreto en las que muchas veces se pueden prefabricar las conexiones u otros elementos. Es por esto que para muchas obras se utiliza el pre-ensamblaje en sitio de elementos antes de que estos puedan ser montados.

La preparación de cables para el pre-ensamblaje incluye esencialmente pasos de descarga, acopio temporal y desenrollado. Los cables son transportados principalmente en rollos, los que poseen las longitudes solicitadas y las conexiones en las puntas establecidas en el diseño. Estos rollos pueden llegar a pesar 30 toneladas por lo que la capacidad de las maquinarias de carga y descarga de materiales deben ser tomadas en consideración. También se pueden transportar enrollados sobre si mismos, en caso que las dimensiones lo permitan, o en carretes. Dependiendo de las dimensiones de los cables, deben ser desenrollados mediante el uso de herramientas hidráulicas para no generar daños en ellos y debido al peligro de daños por plegamiento es que se debe desenrollar cerca del suelo para que no se haya un gran pandeo en estos. Para evitar daños en los cables, deben ser transportados en rollos en los cuales la curvatura del enrollado sea por lo menos 50 a 100 veces el diámetro de los mismos.

Para evitar daños en las conexiones o en los cables mismos es que, al momento del pre-ensamblaje, deben ser colocados en el suelo sobre una protección para evitar así el contacto con agentes externos que puedan facilitar los efectos de corrosión o ensuciar las conexiones y generar problemas a futuro.

El trabajo de pre-ensamblado de los cables se reduce a todos los pasos necesarios del levante, colgado y pretensado de los mismos. También la colocación de elementos tensantes, para la posterior introducción de cargas del pretensado o elementos

secundarios para el montaje de la estructura, puede ser considerada en el proceso de pre-ensamblaje.

Las membranas también son transportadas en rollos o en paquetes pero a diferencia de los cables suelen ir protegidos con algún tipo de envoltura. Las consideraciones de maquinaria para carga y descarga son las mismas que para los cables debido al gran peso que los rollos o paquetes pueden presentar. La forma de embalar para el transporte depende en gran medida de la forma que tenga la estructura ya que las superficies generalmente deben ser divididas en varias secciones.

Se deben empacar las membranas con la menor cantidad de dobleces posible para así evitar el debilitamiento del material. Además es necesario indicar el detalle de cómo fueron realizados los dobleces en los paquetes para así poder planificar la forma de desarmarlos sabiendo que lado se está trabajando y poder ponerlo en el lugar indicado en el pre-ensamblaje, evitando así que se deba volver a embalar o que haya que manejar de manera excesiva el material por no lograr identificar rápidamente el borde con que se desea trabajar.

Las membranas se deben dejar estirada, evitando los pliegues, además que la superficie en donde es colocada debe estar limpia de objetos punzantes o filosos además de piedras u otros elementos que puedan dañarla.

Las membranas que son transportadas en forma de rollos, tienen la particularidad que deben ser desempacadas en una sola dirección y requieren de mayor espacio para hacerlo que las que vienen empaquetadas. La principal ventaja es que pueden permanecer enrolladas hasta el momento del montaje, en donde mediante la ayuda de una grúa pueden ser levantadas por sobre la estructura mientras es desenrollada.

Al igual que los cables, el pre-ensamblado en las membranas consta también de la colocación de elementos de borde, como los esquineros o conexiones de borde a cables, antes de que esta sea levantada por sobre la estructura.

4.2 Levantamiento y colgado de elementos

Una vez que el pre-ensamblado está terminado viene el proceso de levantamiento de los elementos para su posterior montaje. Para los cables, se requiere maquinarias y herramientas como separadores de cables, poleas, huinches o elementos que puedan tensarlos, además de grúas y otras máquinas que puedan elevar estos elementos. Se debe tener en cuenta al momento del levantamiento de las cuerdas que estas no sobrepasen la curvatura máxima permitida y así no resulten dañadas.

Los cables pueden ser levantados fijando un extremo de estos a una grúa y ser tirados hasta la posición que se requiera. También se puede colocar todo el rollo en la grúa y que se vaya desenrollando a medida que sube. Muchas veces se deben colocar amarras temporales en las cuerdas para no concentrar toda la carga del levante de los cables en un solo punto y así distribuirla para evitar daños.

Para poder colocar las membranas en la estructura, es necesario que esta sea levantada y situada en la posición de ensamblaje. El proceso de levantamiento depende de la geometría que tenga la estructura, de la secuencia de montaje que se elija y del tamaño y del peso de la membrana a ser levantada.

El levantamiento puede ser de los paneles sueltos, del paquete entero o de los rollos. En muchos casos las membranas son levantadas en conjunto con la estructura rígida que la sostiene. Este proceso puede tomar varios días dependiendo de la magnitud del proyecto como de las condiciones ambientales. Esta parte del montaje es una de las más importantes y que genera más riesgo para la estructura debido a que las membranas no se encuentran tensadas y son susceptibles a daños por viento. Se debe realizar el proceso de levantamiento cuando no haya viento o este sea muy bajo.

Para levantar paquetes doblados de membranas, normalmente son colocados en cinturones temporales que le permiten al paquete desenvolverse en varias direcciones y no solo en una dirección como ocurre con los rollos. Los paquetes enrollados son desenvueltos con aparatos especiales que controlan que no haya tensiones adicionales en el material y como se dijo anteriormente, este solo se puede extender en una dirección.

Una tercera forma de levantar membranas es que hayan sido desarmadas en el sitio antes de su montaje y sean izadas estiradas. Esto se hace normalmente utilizando de guía la misma estructura en la que será colocada la membrana posteriormente. Se debe tener especial cuidado en los puntos de debilidad como esquinas agudas o agujeros que pueda tener la membrana por su diseño ya que al ser levantada desde un punto en específico pueden generarse tensiones concentradas en estos lugares y dañar el material.

Se puede también levantar las membranas con elementos rígidos de manera simultánea. Para lograr esto, se debe realizar el levantamiento completo de la estructura con la membrana conectada con los elementos rígidos a ella y se debe verificar en todo momento que las conexiones no sobrepasen los esfuerzos resistentes. En muchos casos es necesario colocar apoyos temporales en la estructura para una mejor distribución de las cargas mientras la membrana no comience a actuar, lo cual sucede cuando ya presenta su estado tensional final.

4.3 Introducción de cargas y pretensado

El comportamiento de las estructuras de grandes luces y bajo peso está determinado en gran medida por el pretensado de sus elementos y la interacción de estas fuerzas con los materiales y la geometría que adoptan. La forma en que las cargas de pretensado son colocadas son de vital importancia en el montaje.

La introducción de cargas de pre-tensado crea una condición de esfuerzos internos dentro de los sistemas, lo cual estabiliza la estructura para soportar adecuadamente las solicitaciones de servicio. Las cargas introducidas para lograr el estado de pretensado deben estar en equilibrio con los esfuerzos esperados.

El nivel de pretensado, en estructuras con membranas, depende de la forma que esta tenga debido a que no es lo mismo tensar una sección plana a una que presenta curvatura. Las superficies planas poseen una rigidez insuficiente bajo la acción de las cargas. La deformación bajo la acción de estas es grande y no es posible alcanzar el equilibrio. Solo incrementando la curvatura de la superficie es posible aumentar la rigidez. Un aumento en la curvatura significa una reducción en las reacciones de los soportes y la influencia en el nivel del pretensado disminuye.

CAPÍTULO 5: CASO DE ESTUDIO Y POSIBLES SOLUCIONES

5.1 Descripción del caso a estudiar

Si bien todas estas formas de estructuración basadas en cables buscan resolver la misma problemática de cubrir grandes espacios sin la colocación de elementos en los puntos medios que puedan intervenir el volumen al cual se está protegiendo, cada una es útil en distintas situaciones, Para el alcance de esta memoria se trabajará en una estructura específica a modo de ejemplificar la problemática asociada al diseño de estructuras de cables.

Si bien en capítulos anteriores se caracterizaron los cables hasta su estructura más fundamental como es el alambre, pasando por las formas de construcción del mismo y las diferentes alternativas de presentación, en la parte del desarrollo del modelo computacional no se toma en cuenta eso debido a que el programa viene implementado con este nivel de detalles en los elementos. Los cables dentro del programa SAP 2000 son modelados de manera bidimensional, es decir, son líneas capaces de ser dibujadas en el espacio tridimensional, pero que no poseen grosor. Con esto es imposible representar el efecto de la dirección de entramado de los cordones o si un cable posee varias capas de alambres o no, pero esto no afecta a los resultados del comportamiento del mismo ni la de los modelos dentro de esta memoria.

Se trabajará diseñando una cubierta para una pila de acopio de mineral o stockpile. Los stockpiles son grandes cúmulos de material chancado, normalmente de baja ley, almacenados para luego ser repartidos en las cantidades requeridas para su posterior procesamiento y enriquecimiento. Estos suelen ser depositados por una correa transportadora (stacker) desde cierta altura, por lo que tienden a poseer forma cónica. Los hay también con forma de cono alargado debido a que la correa puede ser desplazada o posee varios puntos de depósito del material; o de forma circular si el material es dejado por un brazo rotatorio como se muestra en la **Figura 32**.



(a)



(b)



(c)

Figura 32. (a) Stockpile con forma cónica; (b) Stockpile con forma de cono alargado; (c) Stockpile circular. (<http://www.perilya.com.au/our-business/operations/cerro-de-maimon>).

Como los stockpiles son acopios temporales del material a la espera de ser procesados, requieren tener algún mecanismo de extracción o reclamo del mismo, ya sea de forma mecánica, mediante maquinaria pesada, o que contenga un sistema de vaciado en su base. En esta memoria se trabajará considerando el vaciado en la base, lo que requiere que la estructura tenga comunicación con el exterior para el ingreso de maquinarias que puedan movilizar el material a los buzones de vaciado en caso de que éste no pueda fluir por su propia cuenta.

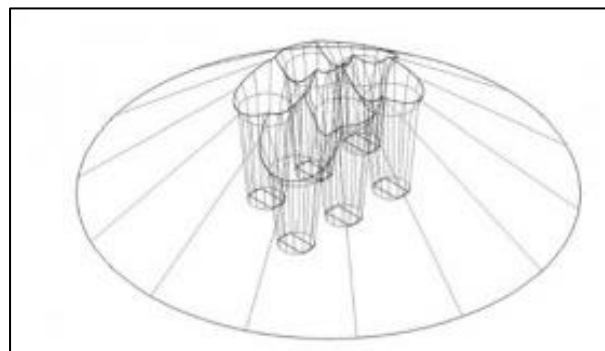


Figura 33. Configuración de carga viva en un acopio por vaciado en su base (<http://jenike.com/engineering/stockpiles/>).

El 'stockpile' objetivo para esta memoria corresponde a uno cónico, cuyas dimensiones son 108 [m] de diámetro y 45 [m] de altura, tal como se muestra en la **Figura 34**.

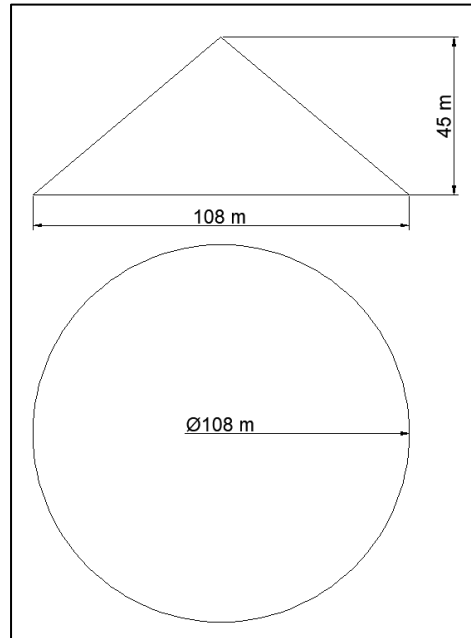


Figura 34. Dimensiones generales del stockpile (Autor).

Tal como fue mencionado anteriormente, la finalidad de este “ejercicio” es poder plantear, a nivel conceptual, dos posibles soluciones de diseño de una cubierta utilizando cables y membranas, para luego poder realizar un estudio cuantitativo y comparar los distintos escenarios llevados a la realidad de Chile y así determinar de manera general cual podría ser una solución aplicable en un futuro para su desarrollo en el ámbito minero.

Las características del lugar donde se desarrolla esta estructura es la zona norte de Chile, a mediana altitud, lugar árido y seco el cual no presenta grandes lluvias torrenciales ni tropicales y tampoco presenta nieve en estaciones frías, por lo que dichas cargas serán despreciadas para este análisis. Para las cargas de viento y uso sobre las estructuras se decidió utilizar las que se muestran en la **Tabla II**.

Tabla II. Cargas utilizadas	
Tipo de carga	Cargas
Texto	[kgf/m ²]
Presión de Interior de viento	100.0
Presión Exterior de viento	50.0
Cargas de Uso	60.0

Dentro de las dos soluciones alternativas que se plantearán y desarrollarán más en detalle en los próximos capítulos, se encuentra un domo con sistema tensegrity y otra estructura mixta que combina vigas de acero con cubiertas de membrana flexible (Tensil Membrane). Estas posibles soluciones se compararán con una estructura desarrollada

de manera convencional, conformada por vigas y columnas de acero rigidizadas lateralmente por arrostros, por sobre las cuales van costaneras y cubiertas por placas de acero.

Cabe destacar que para efectos de este estudio se trabajará usando diseño a tensión admisible. Es por lo mismo que para los elementos rígidos de acero se utilizarán las siguientes combinaciones de cargas, indicadas en el estándar ASCE 7-10.

1. D
2. $D + L$
3. $D + (L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
4. $D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
5. $D + 0.6W$
6. $D + 0.75L + 0.75(0.6W) + 0.75(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
7. $0.6D + 0.6W$

En donde:

- D : Dead, cargas muertas, permanentes, peso propio
- L : Live, cargas de uso, estacionarias
- L_r : Live roof, cargas de uso de techo
- S : Snow, cargas por nieve (no aplican a ningún modelo de esta memoria)
- R : Rain, cargas por lluvia (no aplican a ningún modelo de esta memoria)
- W : Wind, cargas de viento

Para las estructuras que utilicen cables dentro de sus elementos también se trabajará con el método de tensiones admisibles y se usarán las combinaciones indicadas en el estándar ASCE 19-16 las cuales se muestran a continuación. Estas solo serán verificadas para los cables.

1. $D + P$
2. $D + P + L$
3. $D + P + (L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
4. $D + P + 0.75L + 0.75(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
5. $D + P + 0.6W$
6. $D + P + 0.75L + 0.75(0.6W) + 0.75(L_r \text{ o } S \text{ o } R)$
7. $0.6D + P + 0.6W$

Las abreviaturas de las diferentes cargas son las mismas de la lista anterior, y se agrega la carga P : Presstres, pretensado de los cables.

5.2 Descripción Solución Base

Como se dijo en la introducción, lo primero es obtener el modelo basado en las estructuraciones clásicas de la región y para lograr esto se pretende tomar las dimensiones del stockpile citado y cubrirlo por una estructura semi-esférica compuesta

principalmente de elementos de acero macizo, conexiones viga-columna estándar, arrostros, costaneras y techo de placas de metal.

Para lograr cubrir el stockpile, se desarrolló una estructura de 52 [m] de altura y 120 [m] de diámetro la cual cuenta con 8 vigas principales que se desarrollan desde la base hasta la punta del domo y 8 vigas secundarias las cuales tienen un largo inferior y menor perfil que las principales. Todo el sistema de vigas es apuntalado por arrostros diagonales y horizontales para darle la resistencia requerida (**Figura 35**). Para sostener los paneles de metal que cumplen, la función de cubrir y sellar la estructura, se colocaron costaneras por toda la superficie.



Figura 35. Domo en minera de Zinc Skorpion, Namibia. Estructura similar a la considerada en este trabajo. (<http://www.mining-journal.com/profit-amp-loss/news/1311390/zinc-production-prices-boost-vedanta-earnings>).

5.2.1 Cargas propias del modelo

Cada modelo de los mencionados en esta memoria es un diseño propio y cada uno posee características exclusivas que los hacen diferentes entre sí. Si bien lo anterior se cumple para todos los modelos por igual, hay ciertas características que están presentes en todas las soluciones a modo de dejar la menor cantidad de variables inalteradas, Dentro de estas se encuentran las cargas de viento y la carga de uso sobre el techo. Ambos valores se mantienen inalterados dentro de las tres soluciones y así dar mayor consistencia al resultado. Dichas cargas son referenciadas a la zona en donde se encuentra la estructura y a la normativa vigente.

Así como hay cargas inalteradas dadas por condiciones externas a la estructura, también hay ciertas variables que están presentes para algunas soluciones en particular.

Para el caso base, es el uso de costaneras en toda la superficie del domo, ya que no será diseñado con membranas flexibles ni nada similar. Otra característica de este modelo es el uso de placas metálicas que actúan de techo en todo el domo, agregándose también a este modelo cargas de peso propio en toda la estructura. Dichas cargas se muestran en la **Tabla III**.

Tabla III. Cargas especiales modelo	
Tipo de carga	Cargas
Texto	[kgf/m ²]
Costaneras	8.0
Peso Propio Cubierta	5.0

5.2.2 Modelo y resultados

A continuación se muestra el modelo computacional desarrollado para este modelo. Las características de pesos totales de acero utilizado dentro del diseño de la misma se muestran en la **Tabla IV**.

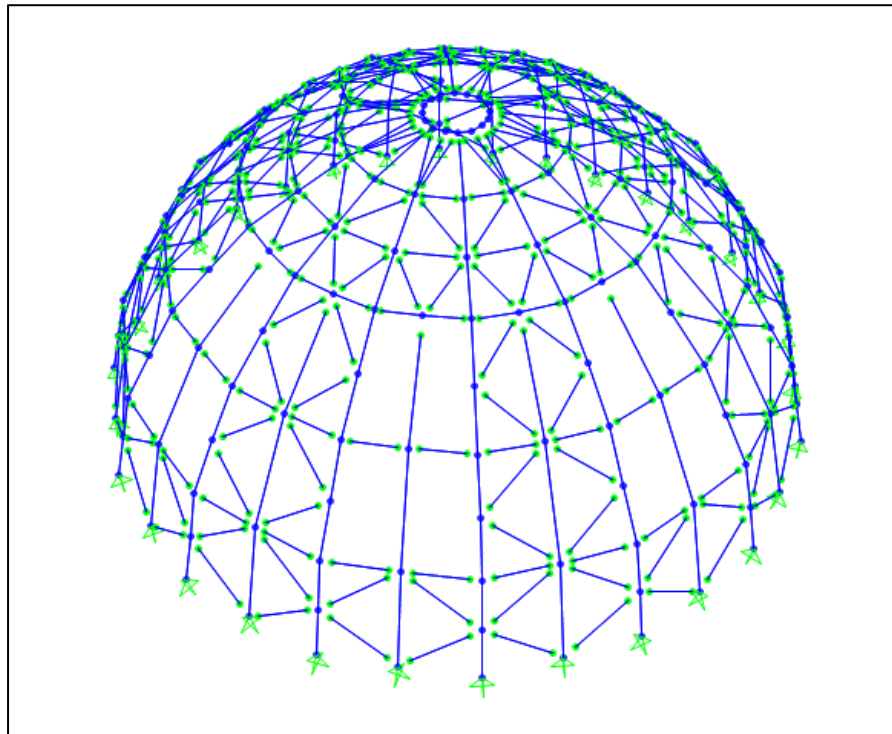


Figura 36. Modelo computacional de la solución base (Autor).

Tabla IV. Pesos elementos y estructura	
Elemento	Peso Total
Texto	[Tonf]
Viga Principal	159.8
Viga Secundaria	195.8
Puntales	97.7
Riostras	213.9
Total	667.1

El control de deflexiones de los puntos más desfavorables se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla V. Desplazamientos punto superior para cada combinación		
Combinación	Deflexión	Deflexión/Luz
Text	m	[-]
D	-0.02	-3/10000
D + L	-0.03	-7/10000
D+0.75L	-0.03	-7/10000
D+0.6W	-0.06	-12/10000
D+0.75L+0.75(0.6W)	-0.06	-11/10000
0.6D+0.6W	0.06	12/10000

5.3 Descripción Solución 1 al Caso de Estudio, domo Tensegrity

Como se explicó en capítulos anteriores, una de las opciones más viables para el desarrollo de cubiertas con grandes luces y que representaran bajos costos, son los sistemas con cables que ocupan la estructuración tipo Tensegrity. Como en Chile no se tienen registros de estructuras similares, se tuvo que buscar información en el extranjero.

Dentro de los proyectos más emblemáticos del cono sur de América se encuentra el 'Estadio Único de la Plata', ubicado en la ciudad de La Plata en la provincia de Buenos Aires, Argentina (**Figura 37**). Este estadio, con capacidad para 40.000 personas, fue construido en el año 2003 y es uno de los únicos complejos deportivos en Sudamérica que utiliza los conceptos del Tensegrity a tan gran escala. La cubierta fabricada con este sistema trabaja en un área de 190 [m] de ancho por 239 [m] de largo y se divide en dos grandes domos unidos en el centro, para simbolizar que en ese estadio dos equipos juegan de local pero ninguno es superior al otro, resultando en un empate, según palabras del arquitecto. Fue diseñado por el estudio de arquitectura Roberto Ferreira y Asociados, la ingeniería fue hecha por Weidlinger and Associates y Birdair Co., y la empresa subcontratada que proveyó el sistema de cables para el Tensegrity y también la membrana, fue Astillero Río Santiago. En este caso, la membrana fue hecha de PTFE (membrana de fibra de vidrio tejida cubierta de teflón).



Figura 37. Fotografía aérea del estadio Unico de La Plata. En ella se puede ver el entramado de cables que forman parte del sistema de Tensegrity. (<http://tensegritywiki.com/La+Plata+Stadium>).

Con este antecedente se empezó a diseñar una estructura acorde a los requerimientos dados principalmente, considerando las dimensiones del 'stockpile' y teniendo en cuenta todas las restricciones implícitas en los sistemas con 'Tensegrity'. Una de las mayores diferencias dentro del diseño planteado para el caso de estudio y el actual desarrollado para el Estadio de La Plata, es que este último no requería tener una zona abierta en la parte superior, como sí lo requiere el que cubrirá el 'stockpile', debido

a que necesita una zona en donde pueda ingresar el material chancado para ser depositado por la cinta transportadora. Este modelo consta también de una base cilíndrica de concreto armado y no un enrejado como lo presenta el Estadio de La Plata. Esto tiene una explicación y es debido a que el domo requiere tener accesos a maquinaria pesada (tales como retro excavadoras o bulldozers) para empujar el material a los distintos puntos de colecta situados en la base del 'stockpile', cuando ya el material no es capaz de fluir por su propia cuenta. Este muro cilíndrico a lo largo de toda la estructura, requiere ser de a lo menos 4 [m] de altura. La accesibilidad de maquinaria pesada debe existir en todos los casos ya que es un requerimiento del 'stockpile'. Se dispuso del muro en el caso del modelo 'tensegrity' debido a que por su naturaleza no debe haber discontinuidades en el desarrollo de los cables, obligando esto a tener que suspenderlos a cierta altura para permitir el acceso.

El modo de desarrollo para determinar las pendientes superiores e inferiores de las cuerdas que sostienen los diferentes niveles del techo son los siguientes: Primero se determinó la máxima pendiente alcanzada en el Estadio de la Plata y se comenzó a esquematizar el sistema desde el centro del 'stockpile' hasta llegar al borde del mismo, tratando de mantener las proporciones de dimensiones de las diferentes caras del techo, largos de tubos (elementos a compresión) y largos máximos de los cables.

Una vez determinada la luz máxima que podía alcanzar el sistema, basándose en lo construido en el estadio Argentino y manteniendo sus proporciones, se verificó cuanto es el desnivel que alcanzó la estructura, es decir, la diferencia entre el punto superior y el punto de apoyo inferior que actúa como base en donde se erige toda la estructura. En resumen se diseñó desde arriba hacia abajo por los requerimientos de desniveles mínimos y máximos.

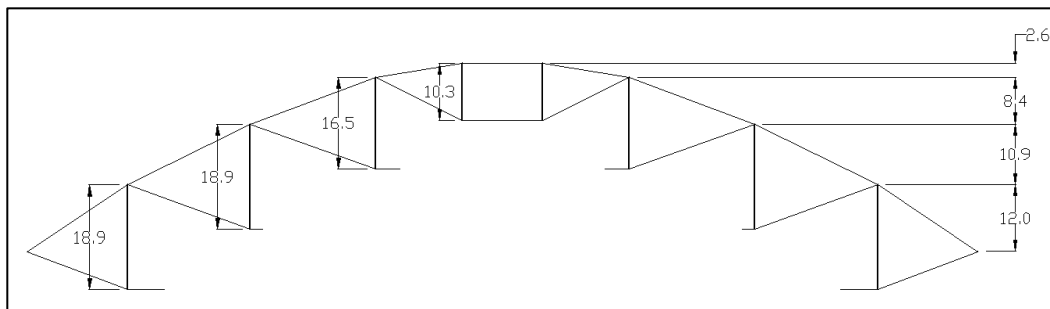


Figura 38. Corte en elevación de esquema del modelo Tensegrity. El diámetro de la estructura es de 171.24 [m]. (Autor).

Con el diseño base ya construido se procedió a modelar la estructura en el programa de elementos finitos SAP 2000 a modo de determinar su comportamiento, en especial, la magnitud de pretensado de cada cable incluido en la estructura y la deflexión máxima alcanzada para cada una de las cargas impuestas sobre el techo. Lograr el valor del pretensado de los cables óptimos significa que la estructura pueda ser soportada por sus cargas estáticas de manera razonable y que los cables no sobrepasaran sus límites de tensión axial característicos, tal como se muestra en la norma ASTM A 603 – 98 para los diámetros de cables existentes y sus respectivas resistencias.

Las dimensiones de este domo son similares a las del domo de estructuración base, el radio que alcanza es de 85.62 [m] y el desnivel máximo alcanzado desde la base hasta la cima del domo en su punto central es de 35 [m] aproximadamente. Al igual que el caso base, se mantuvieron las dimensiones del orificio central para dejar la caída del material chancado a la pila de acopio.

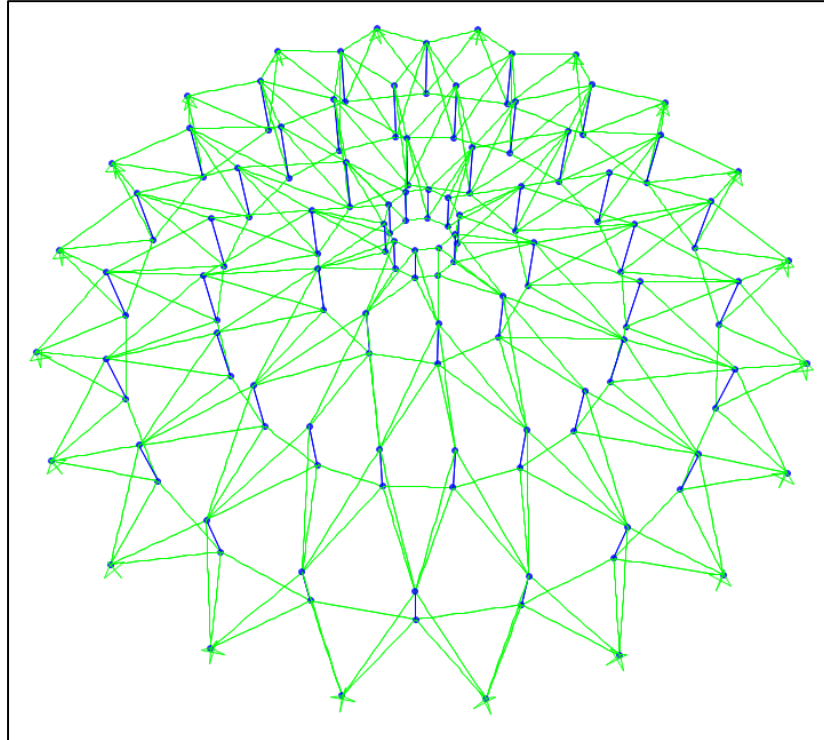


Figura 39. Modelo computacional SAP 2000 para la solución en base a Tensegrity (Autor).

El resultado del análisis computacional es de gran relevancia, para obtener la sección de los cables y la cantidad necesaria de ellos para cada zona de la estructura del Tensegrity así como la deflexión máxima alcanzada por la misma. Con la deflexión, para la combinación más desfavorable, se puede obtener la altura donde comienza la estructura de manera que esta no esté en ningún momento en contacto con el acopio, obteniéndose así, la altura en donde se encontrarían los apoyos basales del techo y estimar cuanta distancia hay desde este punto hasta el suelo.

Este proceso se repitió hasta lograr alcanzar una tensión de cables dentro de los parámetros de resistencia de los distintos elementos que componen el techo, logrando una deflexión máxima que no fuese impedimento al desarrollo completo del Stockpile en su máxima capacidad y que pudiese abarcar una gran parte de la altura total de manera que la base de concreto fuese la menor posible.

Luego del desarrollo del diseño y una vez corroborado que los esfuerzos de cada elemento no superasen sus resistencias, se llegó al modelo final en donde la cantidad de material utilizado para su desarrollo se muestra a continuación en la **Tabla VI**.

Tabla VI. Pesos elementos y estructura	
Elemento	Peso Total
Texto	[Tonf]
Tubos	143.4
Cables Anillos	141.7
Cables superiores	69.0
Cables inferiores	99.5
Total	453.6

Junto con esto se entrega la **Tabla VII** que indica la cantidad de cable usado de cada tipo (diámetro), medida en metros para su posterior análisis y comparación.

Tabla VII. Largos totales de los cables	
Diámetro cable	Largo
[mm]	[m]
Cable 50.8	3366
Cable 54.0	1035
Cable 63.5	141
Cable 76.2	2733
Cable 88.9	568
Cable 101.6	1713
Total	9556

Las deflexiones máximas desarrolladas por las distintas combinaciones medidas desde el punto más desfavorable (cima del domo) se muestran a continuación en la **Tabla VIII**. Al costado de la columna de deflexiones se muestra el cuociente entre la deflexión del mismo punto y la luz total del domo para hacer notar la magnitud de la deflexión en comparación a la longitud de los puntos opuestos de los apoyos del techo.

Tabla VIII. Desplazamientos punto superior para cada combinación		
Combinación	Deflexión	Deflexión/Luz
Text	m	[-]
T1 (D + P)	-1.67	-1/100
T2 (T3) (D + P + L)	-8.31	-5/100
T4 (D + P + 0.75L)	-7.21	-4/100
T5-1 (D + P + 0.6WInt)	-0.54	-3/1000
T5-2 (D + P + 0.6WExt)	-6.41	-4/100
T6a-1 (D + P + 0.75L + 0.45WInt)	-0.73	-4/1000
T6a-2 (D + P + 0.75L + 0.45WExt)	-9.12	-5/100

5.4 Descripción Solución 2 al Caso de Estudio

Ya se abordó el método clásico de estructuración para los Stockpiles mineros y se planteó una alternativa utilizando cables con el método del 'Tensegrity'. Pero falta estudiar la posibilidad de aplicar las estructuras tensadas para este caso.

Se tomó como ejemplo el Velódromo de Peñalolén **Figura 13**, en el cual el techo fue diseñado en base a un marco rígido enrejado en donde fue colocada la membrana y apoyado en cada viga para darle la estabilidad necesaria. La membrana usada corresponde a la denominada 'Précontraint 1202 S2' la cual tiene las características técnicas indicadas en la **Tabla IX**.

El velódromo de Peñalolén es un estadio cubierto con capacidad para 3000 espectadores que alberga eventos de ciclismo. Fue construido en el año 2013 especialmente para los X Juegos Sudamericanos. El diseño arquitectónico estuvo a cargo de Iglesias Arquitectos, los cálculos estructurales fueron realizados por la empresa RG Ingenieros y la membrana fue suministrada por Lonas Lorenzo. La estructura en si se soluciona con perfiles de acero que conforman una tenso-estructura con marcos articulados que salvan las grandes luces (**Figura 40**). El velódromo cuenta con una superficie de 9.851 [m²].

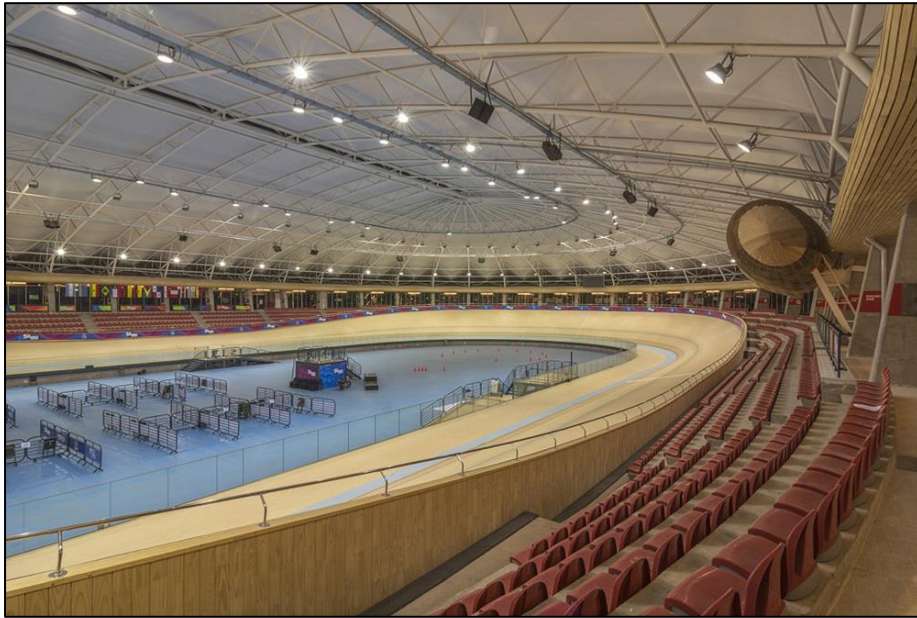


Figura 40. Vista interior del velódromo de Peñalolén. Se pueden apreciar las vigas que sirven de apoyo rígido a la membrana

Tabla IX. Parámetros estructurales de la membrana		
Parámetro	Valor	
Peso	1.05	Kg/m ²
Espesor	0.78	mm
Resistencia a la tensión	5600	N/5cm
Resistencia al rasgado	800	N/5cm

Con este diseño en consideración se decidió mantener la configuración de vigas principales del caso de la estructura convencional para el stockpile y eliminarle los arrostramientos y puntales extras para alivianar lo más posible la estructura.

La estructura final consta de 16 vigas principales que forman el esqueleto del domo por donde se colocan las membranas tensadas. En el modelo computacional esto se modeló colocando elementos tipo Frame como las vigas principales para luego confeccionar una malla de cables de acero a modo de cubrir los espacios que se forman y darle resistencia a la membrana que posteriormente se situará ahí. Estos cables son los encargados de resistir los esfuerzos ejercidos a la membrana, la que solo actuará como cobertura y protección del contenido del domo, no como en otros casos en donde esta misma es la encargada de soportar las diferentes cargas sobre el proyecto. En cada sección o lonja del domo se le dió una doble curvatura con forma cóncava la cual en ningún momento sobrepasa el plano que se forma entre dos secciones de vigas de marco contiguo.

Las vigas principales por sí solas no son capaces de entregar la rigidez suficiente en la estructura para cargas laterales o pandeos en la misma por lo que se deben agregar

elementos que puedan suplir este problema. En este modelo se decidió colocar diagonales de cables en vez de las típicas riostras de elementos rígidos para alivianar el peso de la estructura. Como se ve en la **Figura 41** se dispuso de diagonales en tramos intermedios del domo hasta una altura de 50 [M] (recordar que el domo cuenta con su punto más alto a 52 [m]) que era la posición que permitía conexiones directas entre uniones sin exceder la componente vertical máxima para que las diagonales trabajen de manera correcta. Desde este punto, y viendo que la estructura seguía teniendo problemas de pandeo, se dispuso de puntales y riostras rígidas hasta alcanzar la cima del domo.

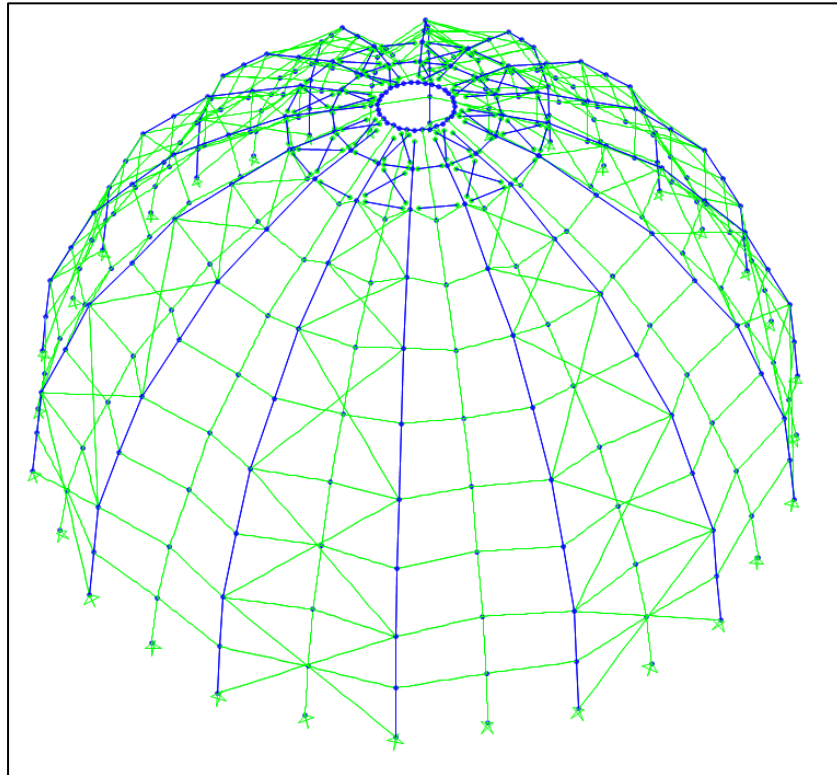


Figura 41. Modelo computacional SAP 2000 del domo con estructura tensionada. (Autor).

Luego de ser colocadas todas las cargas y diseñado las dimensiones de las vigas y cables tal que la estructura resista todas las combinaciones indicadas anteriormente en esta memoria, se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla X**:

Tabla X. Pesos elementos y estructura	
Elemento	Peso Total
Texto	[Tonf]
Vigas de acero	433.4
Puntales Y Riostras	120.4
Cables Horizontales	34.7
Cables Verticales	19.8
Cables Diagonales	34.7
Total	643.0

Al igual que para la solución mostrada usando 'Tensegrity', y para visualizar de mejor manera la cantidad de cable usado en el modelo, se muestra la **Tabla XI** con las longitudes totales de cables:

Tabla XI. Largos totales de los cables	
Diámetro cable	Largo
[cm]	[m]
Cable 50.8	5079.3
Total	5079.3

Con esto, las deflexiones máximas alcanzadas en el domo se muestran a continuación en la **Tabla XII**.

Tabla XII. Desplazamientos punto superior para cada combinación		
Combinación	Deflexión	Deflexión/Luz
Text	m	[-]
T1 (D + P)	-0.27	-2/1000
T2 (T3) (D + P + L)	-0.17	-1/1000
T4 (D + P + 0.75L)	-0.20	-2/1000
T5-1 (D + P + 0.6WInt)	-0.65	-5/1000
T5-2 (D + P + 0.6WExt)	0.21	2/1000
T6a-1 (D + P + 0.75L + 0.75(0.6WInt))	-0.54	-5/1000
T6a-2 (D + P + 0.75L + 0.75(0.6WExt))	0.20	2/1000

CAPÍTULO 6: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS

En este capítulo se procederá a comparar las tres opciones de estructuración mostradas a lo largo de la memoria para un 'stockpile' minero. Cabe mencionar que en este estudio no se busca entregar una respuesta definitiva a la problemática de estructuras mineras ni soluciones para cubiertas de 'stockpiles' sino que se usó este caso para ejemplificar el tema de la memoria con un caso práctico.

Las tres soluciones planteadas responden a la misma problemática que es diseñar una estructura capaz de cubrir en su totalidad, o la mayor parte de, un 'stockpile', cada una abordando el problema de diferentes maneras, integrando importantes propiedades y comportándose de forma diferente a las solicitaciones y al proyecto mismo. Cada una de las soluciones tiene sus ventajas y desventajas respecto a las otras e identificando estas, y sus aplicaciones en el problema, es que se pretende realizar este estudio.

El primer punto de comparación sería la cantidad de acero utilizado para lograr edificar la estructura. Este se muestra en la **Tabla XIII** comparando los tres casos. Es evidente que para el caso base se tienen pesos mayores de acero ya que está construida en su totalidad con elementos rígidos. En cambio, para el caso de las estructuras edificadas con 'Tensegrity' y las que poseen membranas tensadas (solución 2 y 3), gran parte de las funciones que correspondían a elementos rígidos son solventadas por los cables. Es por esto que esta información no es suficiente para determinar cuál es más costoso que los demás sin antes integrar más variables a considerar. En términos de cables, la estructura con sistema 'tensegrity' posee las mayores longitudes de estos en comparación con la solución con membrana (aproximadamente el doble) y posee también diámetros mayores en sus elementos (ver **Tabla XIV**) por lo que se necesita más material para ser construido. Cabe mencionar que para este estudio no se consideró el peso aportado por las conexiones en los diferentes elementos.

Tabla XIII. Comparativa de peso de acero y cables en las 3 soluciones		
Estructura	Peso en elementos rígidos [Tonf]	Largo total cables [m]
Caso base	667	0
Caso 2 Tensegrity	143	9556
Caso 3 Membrana	554	5079

Tabla XIV. Largos totales de los cables en estructura Tensegrity y membranas		
Diámetro cable	Largos estructura Tensegrity	Largos Estructura con membrana
[cm]	[m]	[m]
Cable 50.8	3366	5079
Cable 54.0	1035	0
Cable 63.5	141	0
Cable 76.2	2732	0
Cable 88.9	568	0
Cable 101.6	1713	0

Dentro de las dos estructuras que utilizan cables para lograr el objetivo deseado, una los utiliza de manera íntegra para darle estabilidad a todo el sistema (caso 'Tensegrity') en cambio la otra solo son usados para colocar posteriormente la membrana flexible sobre ella y parte de la sustentación de toda la cubierta es determinada por los elementos rígidos.

En relación al costo de las estructuras diseñadas, y poder hacer una comparación en términos monetarios, se requiere conocer el valor aproximado del kilogramo de acero, del metro de cable, de la dimensión requerida y disponer del valor de la estructura del caso base.

Sin embargo hay algunos costos que no pueden ser obtenidos directamente del costo material o cuando los modelos computacionales no entregan el detalle que permita valorizarlos. Esto ocurre por varios factores. Primero, para el caso de las conexiones de cables en el sistema 'Tensegrity', se tienen elementos especiales diseñados específicamente para cada proyecto los cuales no han sido considerados en los costos de materiales por simplificación del estudio aun cuando forman parte importante del presupuesto, al igual que los anclajes requeridos en la base del mismo. Para este mismo caso, al momento de modelar la cubierta, no se incluyó el anillo de compresión en el borde y se colocó en cambio apoyos simples en donde debieran anclarse los cables, a modo de facilitar los cálculos de estabilidad y simplificar el modelo. Siguiendo el ejemplo del estadio de La Plata, este anillo debiese ser un enrejado de acero, lo que aumenta aún más los costos asociados a materiales. También para esta estructura, se consideró y se especificó en las condiciones de servicio, que la cubierta debe estar montada sobre pedestales de concreto, por lo menos a 4 [m] de altura por sobre el suelo, permitiendo así el tránsito de maquinaria pesada que pueda trabajar en el 'Stockpile'.

Otro problema asociado a las cubiertas de 'Tensegrity', es que como son auto sustentables (en el concepto del auto sustentación asociado a la estructura), requieren de equilibrio de fuerzas en cada nodo para todas las componentes del espacio. La problemática con esto es que, si se diseña de manera tal que los cables de la cuerda superior tengan una pendiente muy pronunciada, se presente un desequilibrio de las fuerzas en sus componentes horizontales (si un cable tiene más pendiente, menor es la componente horizontal y mayor es la vertical) produciendo posteriormente que la forma final que adopte cuando la estructura entre en equilibrio sea asentándose de forma considerable, logrando así, que la pendiente antes mencionada disminuya colaborando más con las componentes horizontales. Esto limita las posibilidades de producir

estructuras que logren grandes alturas usando el 'Tensegrity' "falso" lo que para el caso en cuestión produjo que no se pudiera desarrollar el desnivel entre los apoyos en la base de la cubierta y la cima de la misma.

A modo de ejemplo se muestra en la **Figura 42** una elevación en la que se observa en color rojo la estructura 'Tensegrity', en azul la estructura base y la desarrollada con membranas flexibles y en verde la forma del 'stockpile'. En esa figura se materializa la gran diferencia entre las luces necesarias para poder cubrir el stock pile con las soluciones planteadas en esta memoria. La solución con 'tensegrity requiere un mayor diámetro en comparación a las logradas con membranas debido a su comportamiento y los límites del equilibrio entre cables que debe lograr.

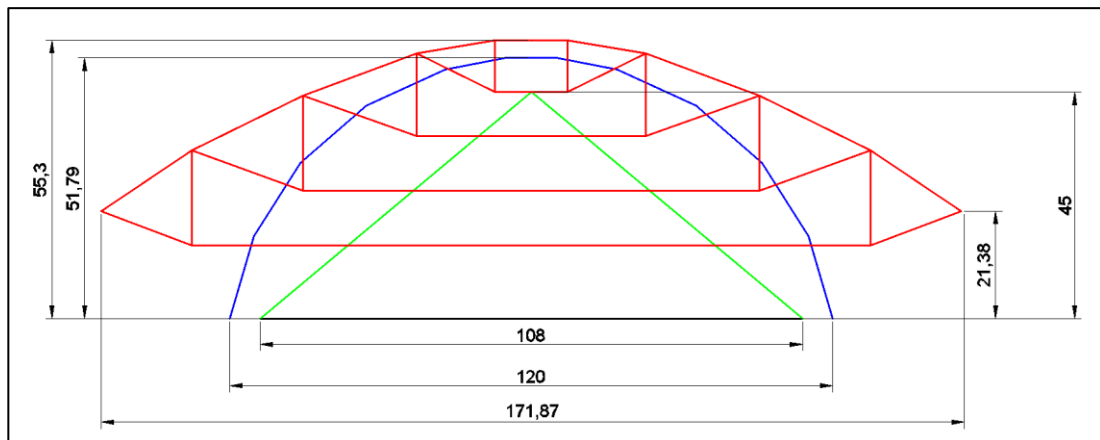


Figura 42. Elevación comparativa y acotada entre las diferentes estructuraciones, en verde está el 'Stockpile', en azul la estructura base y la que posee membranas y en rojo la estructura que utiliza el sistema 'Tensegrity'

En el caso 3, que usa membranas tensadas, también hay consideraciones que deben ser tomadas en cuenta antes de finalizar la comparación de todas las soluciones. Es necesario indicar que, al igual que sucedió con el modelo Tensegrity, para las membranas también se requieren conexiones especiales en los apoyos de los diferentes bordes y uniones existentes. Cada tramo de membrana debe ser sujeto con elementos especiales cuyos costos deben ser sumados a los costos totales del proyecto. Esta estructura, al ser idealizada como una reducción del peso del caso base al colocarle cables en vez de la cantidad de acero solicitado en un principio, tuvo varios problemas de estabilidad sobretodo en la parte superior debido a cargas de viento. Es por esto que se realizó un estudio de estabilidad del pandeo presente en la estructura logrando con esto determinar la necesidad de colocar elementos que rigidicen el domo, sobre todo ante la posibilidad de deformaciones torsionales sobre toda la estructura. Se optó por utilizar los mismos cables en vez de los elementos rígidos, montándolos en forma diagonal para lograr este cometido. Pero cercano a la punta del domo el uso de puntales fue necesario.

Un factor común en los dos casos que utilizan cables es que se deben considerar los costos asociados al montaje de la estructura. Todos los cables usados en ambos

casos, además de la membrana misma, presentan algún grado de pretensado en ellos y esto se logra con maquinaria especializada y costosa que también debe ser considerado en el presupuesto total del proyecto. El caso base está exento de este ítem.

CAPÍTULO 7: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

7.1 Problemas asociados al diseño y modelación de estructuras con uso de cables

Dentro del desarrollo de las diferentes soluciones para el caso de estudio, se encontraron varias dificultades al momento de trabajar con software de mayor alcance o más populares, los que son capaces de resolver los problemas estructurales típicos como es el caso base. Uno de los mayores problemas que se presentó fue que las estructuras con cables requieren, en su mayoría, cálculos no lineales de elementos debido a las grandes deformaciones que estas presentan. Si bien estos tipos de software tienen incorporado la posibilidad de realizar estos cálculos, no son especializados en trabajar con cables.

Al momento de diseñar la membrana, no se pudo considerar la forma que esta toma después del relajamiento dinámico de sus componentes, en base a las condiciones de anclaje y nivel de pretensado, lo que fue explicado en capítulos anteriores de la memoria como form-finding. Este paso previo es crucial para encontrar la forma final que tomará la membrana y determinar la distribución de las cargas en los elementos rígidos, posteriormente. Los programas convencionales, al no ser creados específicamente para el diseño de membranas tensadas, no presentan este paso dentro de sus características contrariamente a otros software más exclusivos o que desarrollan empresas dedicadas a este tipo de estructuras, que tienen incluido de forma automática el cálculo de la forma óptima de una membrana dados ciertos parámetros.

7.2 Conclusiones y comentarios

Como se aprecia en los resultados obtenidos para los diferentes modelos de cada solución planteada y el alcance de desarrollo de cada uno de estos, es necesario cierto conocimiento y experiencia para poder determinar las formas ideales que deben tener las estructuras. Además de la experiencia se recomienda, en el diseño de este tipo de estructuras, el uso de diferentes software disponibles para realizar esta tarea, ya que permiten desarrollar soluciones más eficientes que las que se podrían lograr sin estas herramientas. Teniendo un programa que pueda calcular y estimar las formas finales de las membranas o las relajaciones en los cables producida por su no linealidad intrínseca, ayuda y facilita tanto el diseño como la tarea de encontrar una solución optimizando de mejor manera los componentes presentes.

Lo anterior no significa que estas soluciones no puedan ser aplicadas a la realidad de Chile ni menos al rubro minero. Ambas soluciones planteadas utilizando cables en su estructuración, son posibles de desarrollar en la región con un alcance total de las funciones requeridas bajo la supervisión de personal capacitado. Aunque cabe destacar que los sistemas que ocupan 'Tensegrity' dentro de su estructuración parecieran ser menos efectivos acorde al estudio realizado a lo largo de esta memoria y no son recomendables a priori para cumplir este propósito. Las estructuras mixtas, que combinan el uso de elementos rígidos con cubiertas de membranas tensadas flexibles, sugieren ser

una mejor alternativa dentro del ámbito industrial y eso se ve reflejado en la experiencia pasada en donde esta tecnología ya ha incursionado.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta, es que los materiales e ingeniería de este tipo de grandes estructuras, viene generalmente del extranjero (materiales en el caso del velódromo de Peñalolén e ingeniería y materiales en el caso del Estadio de La Plata) por lo que se requiere un contacto temprano con los proveedores de manera que tengan el tiempo suficiente para manufacturar los elementos estructurales (cables, membranas, etc.) y poder enviarlos a la región oportunamente para así concretar el proyecto a tiempo.

Dentro de las consideraciones más importantes que se deben tener en cuenta al momento de diseñar una estructura con cables y cubiertas flexibles, y que dista de la práctica general en el diseño de estructuras, es la elaboración de un plan de construcción y montaje de los elementos, incluyendo sobre todo el proceso de pretensado de cables y membranas, explicando cómo se alcanza esta condición y describiendo la secuencia constructiva que se debe seguir. Además de esto, es necesario contemplar que los sistemas de cables y membranas presentan el peligro de colapso general dada la falla en un elemento local, por la propiedad antes mencionada de que todos los elementos trabajan en conjunto y se requiere un estado tensional íntegro para asegurar la estabilidad.

La finalidad de esta memoria es poder entregar las bases para la introducción de sistemas de estructuras basados en cables y membranas a Chile, más específicamente estructuras que podrían necesitar grandes luces libres de vigas o columnas. Bajo esta premisa, es que se decidió aplicar lo estudiado, presentando lo generado en otras partes del mundo y la teoría detrás del ejercicio desarrollado en la solución de un caso real. No se pretende entregar una pauta de desarrollo de estructuras basadas en cables para la minería sino que mostrar que dichos sistemas estructurales son posibles de adaptar a los casos que se puedan dar en el país y poder desarrollar de manera íntegra un proyecto de esta envergadura. Este trabajo está orientado a guiar a profesionales no especialistas que deban enfrentarse a las distintas etapas en el diseño que una estructura de este tipo presenta como las adquisiciones de materiales, inspección, especificaciones o administración del proyecto. Se recomienda que el diseño y construcción de estos proyectos se deba hacer por empresas dedicadas al rubro y con experiencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] David E. Eckmann, Stephanie J. Hautzinger, Thomas R. Meyer, 2000, Design Considerations in Cable-Stayed Roof Structures, Chicago, EEUU
- [2] Massimo Majowiechi, Structural Architecture of Wide Span Enclosures: Uncertainties in Reliability Assessment, University of Venice.
- [3] Miriam Euni Son, 2007, The Design and Analysis of Tension Fabric Structures, Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering, Berkley, University of California.
- [4] Robert E. Skelton, J. William Helton, Rajesh Adhikari, Jean-Paul Pinaud, Waileung Chan, 2002, An Introduction to the Mechanics of Tensegrity Structures, University of California, San Diego.
- [5] M. Hüttner, J. Máca, P. Fajman, 2014, Analysis of cable-membrane structure using the Dynamic Relaxation Method. En: 9th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn, Porto.
- [6] Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE Standard 7-10, American Society of Civil Engineers.
- [7] Xingfei Yuan, Lianmeng Chen, Shilin Dong, 2006, Prestress design of cable dome with new forms, Space Structure Research Center, Zhejiang University, Hangzhou, China
- [8] Eurocode 3: Design of Steel structures – Part 1-11: Design of Structures with Tension components, 2006
- [9] Mamoru Kawaguchi, Ikuo Tatemichi, Pei Shan Chen, 1999, Optimum shapes of cable dome structure, Department of Architecture, Hosei University, Tokyo, Japan
- [10] Kenneth Snelson, 2011, The art of Tensegrity, En: International Journal of Space Structures, Vol 27, Number 2 & 3, United Kingdom, 5 Wates Way.
- [11] ASCE/SEI 55-16, Tensile Membrane Structures
- [12] ASTM A368-95a /2013) Standard specification for stainless steel wire strand.
- [13] ASTM A474-03 (2013) Standard specification for aluminum-coated steel wire strand.
- [14] ASTM A475-03 (2014) Standard specification for zinc-coated steel wire strand.
- [15] ASTM A492-95 (2013) Standard specification for stainless steel rope wire.

- [16] ASTM A586-04a (2014) Standard specification for zinc-coated parallel and helical steel wire structural strand.
- [17] ASTM A603-98 (2014) Standard specification for zinc-coated steel structural wire rope.
- [18] ASTM A855/A855M-03 (2014) Standard specification for zinc-5% aluminum-mischmetal Alloy-coated steel wire strand.
- [19] ASTM A1023/A1023M-15 Standard specification for carbon steel wire ropes for general purposes.
- [20] ASTM A555/A555M -16 Standard Specification for General Requirements for Stainless Steel Wire and Wire Rods
- [21] Felix Escrig Pallares, Juan Pérez Valcarcel, 1992, Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas, Revista de Edificación, (11)
- [22] ASCE/SEI 19-16 Structural Applications of Steel Cables for Buildings
- [23] Yiyi Zhou, 2007, General Methods for Creating Tensegrity towers, Arches, Bridges and Roofs, RMIT University
- [24] Gunnar Tibert, 1999, Numerical Analuses of Cable Roof Structures, Departament of Dtructural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- [25] Valentín Gómez Jáuregui, 2004, Tensegrity Structures and their Application to Architecture, Queen's University, Belfast
- [26] K. Feyer, 2015, Wire Ropes, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [27] Santiago Huerta, 2013, El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí, Universidad politécnica de Barcelona, Barcelona, España
- [28] Michael Seidel, 2009, Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction, Berlín, Alemania, Ernst & Sohn
- [29] Natalie Stranghöner, Jörg Uhlemann, 2016, Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures, Europa, Publications Office of the European Union.
- [30] René Motro, 2003, Tensegrity: Structural Systems for the Future, United Kingdom, Butterworth-Heinemann
- [31] Feng Fu, 20156, Advanced Modelling Techniques in Structural Design, United Kingdom, JohnWiley & Sons 167-196p

[32] Russel C. Hibbeler, 2012, Análisis Estructural, 8va Edicion, EEUU, Pearson Education

ANEXO A: CÓMO MODELAR UN CABLE EN SAP 2000

Uno de los mayores desafíos encontrados durante el desarrollo de esta memoria, fue poder modelar los comportamientos de los cables integrados con estructuras en programas computacionales de elementos finitos. Esto se debe principalmente por la no linealidad presente en los cables lo que hace que los programas convencionales, que son principalmente desarrollados para elementos rígidos, demoren más tiempo del que utilizan para otros cálculos, además de no entregar todas las herramientas adecuadas para una correcta y fácil modelación, como lo hacen los programas especializados en el tema.

Esto mismo se vio reflejado en las membranas ya que el programa SAP 2000 no contempla dentro de sus características la posibilidad de encontrar las formas de superficies tensadas, lo denominado anteriormente como 'form-finding', teniendo que extrapolar las condiciones y comportamientos posibles de estas membranas a elementos tipo "Shell" o elementos singulares no continuos alejando los resultados obtenidos por el programa de la realidad.

A continuación se muestra una guía de cómo trabajar con cables dentro del programa SAP 2000.

Como para cualquier elemento que se quiera modelar en SAP 2000, es necesario definir un material y una sección. El procedimiento de diseño de materiales es idéntico al necesario para cualquier elemento así que no se ahondará en este tema. Para las secciones de los cables, existe una ventana especial como se muestra en la **Figura 43**. En ella se puede definir la sección circular del cable, ya sea indicando un área transversal o un diámetro. Aquí mismo se debe especificar el material del que va a ser construido el cable además de factores de modificación en las propiedades físicas o de rigidez de los mismos (**Figura 44**).

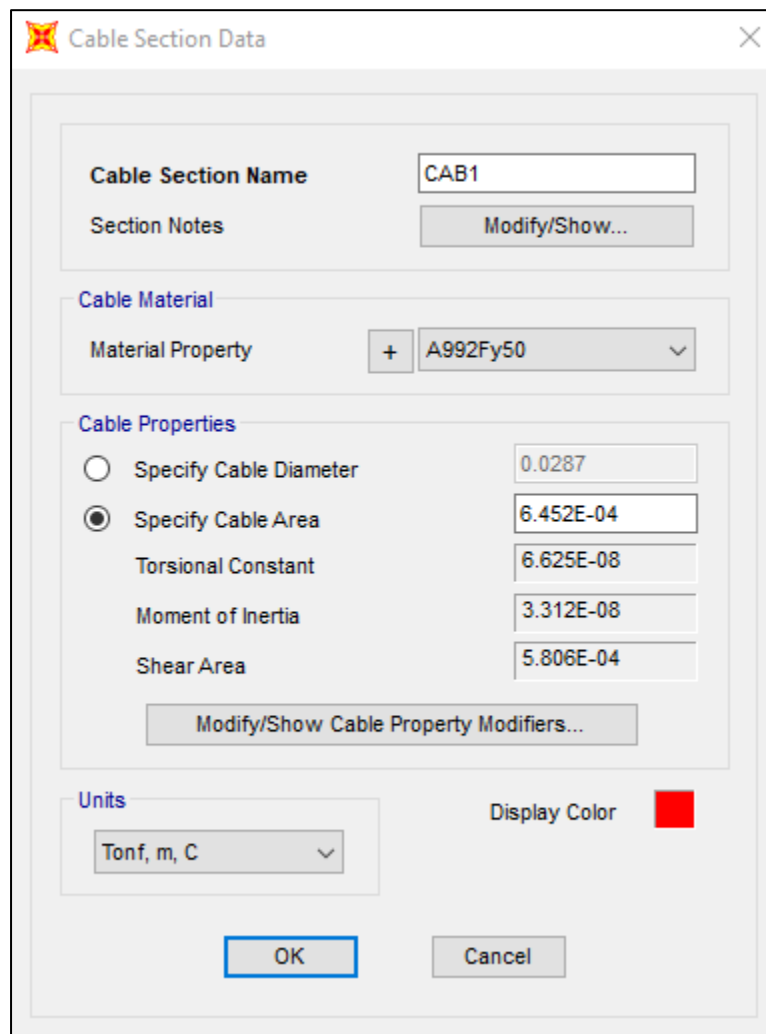


Figura 43. Ventana de definición de sección de un cable. (SAP 2000).

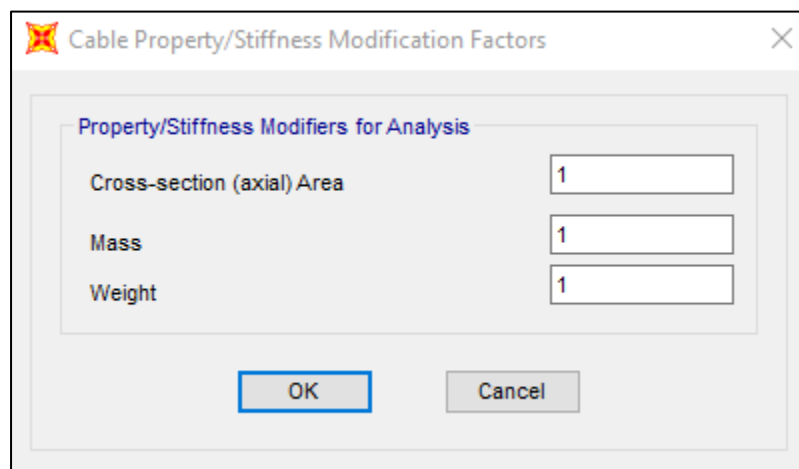


Figura 44. Modificadores de propiedades físicas o rigidez de los cables.

Una vez que se tienen definidos los cables que el modelo va a utilizar, se procede a su dibujo. Para esto se selecciona un elemento 'Frame' y en las opciones que se

despliegan se cambia de 'Frame' a 'Cable' lo que permite dibujar un cable entre dos puntos deseados (**Figura 45**). A diferencia de los elementos rígidos, una vez seleccionados ambos puntos, se abre una nueva ventana con varias propiedades especiales que permiten una mejor adaptación de estos elementos a la estructura real que se desea modelar (**Figura 46**).

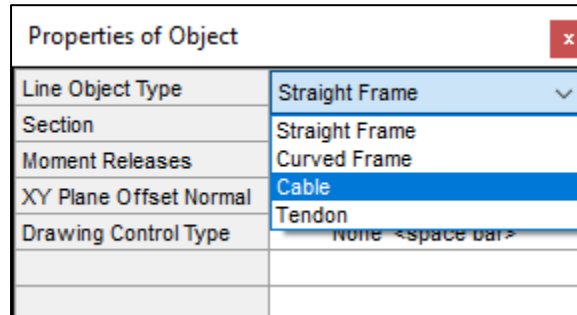


Figura 45. Selección de elemento 'Cable'.

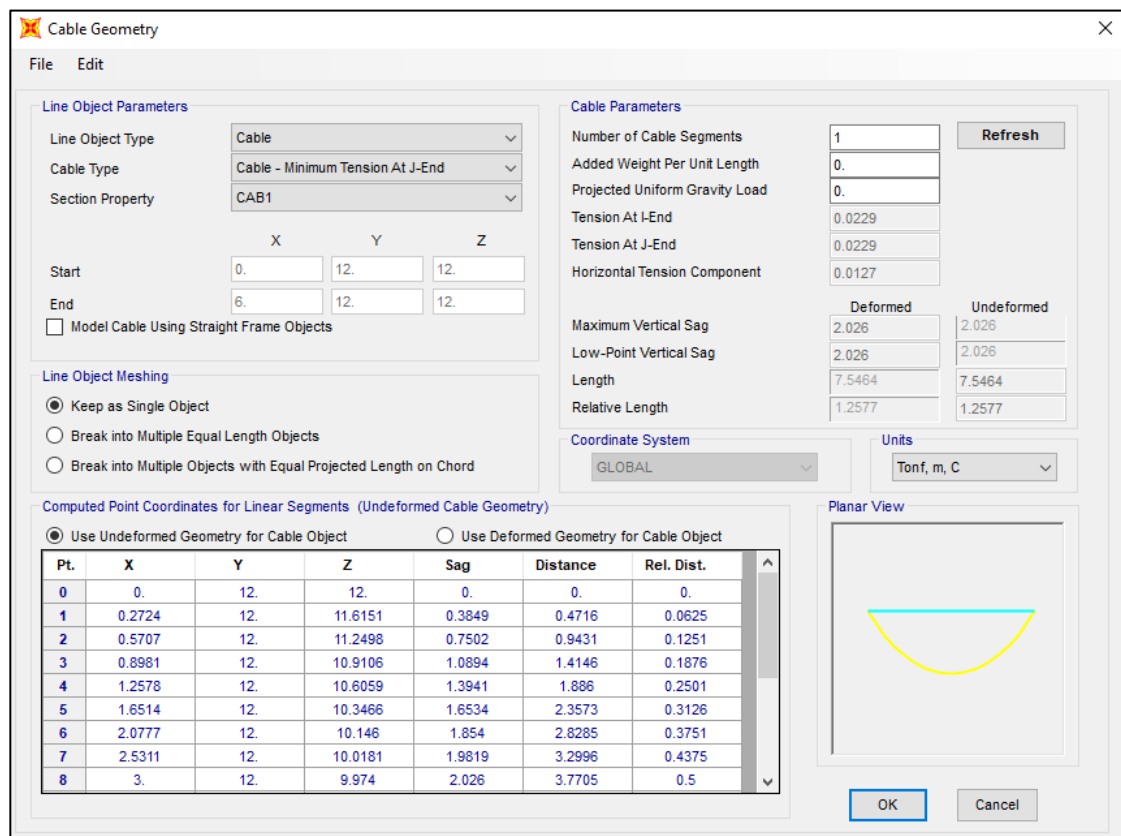


Figura 46. Ventana de dibujo de un cable desplegada al trazar una línea entre dos puntos.

Esta ventana permite dar diferentes formas a los cables dependiendo de los parámetros que se le entreguen, por ejemplo la carga por unidad de largo sobre este (catenaria) o proyectada (parábola) además de otros parámetros para que se comporte de diferentes maneras al momento de modelar el programa. Lo más importante de estas propiedades es que al final cuando se especifican todas las condiciones, el cable será

dibujado acorde a los resultados que sean calculados por este método el cual tiene dos finalidades importantes: dar la forma e imponer cargas de pretensado en este. Las cargas que se especifiquen de peso por unidad de largo o cargas proyectadas, solo influyen en la forma inicial que adapta el cable al momento de ser dibujado y en ningún momento se definen como cargas que el programa posteriormente trabajará en la resolución del modelo.

Dentro de las características más destacadas de esta ventana (**Figura 46**) está la posibilidad de elegir la variable que se desea modificar, que afecte directamente o sea dependiente de la tensión que se encuentra en algún momento en el cable. Esta se despliega en la parte que dice 'Line Objet Parameters' (**Figura 47**) y permite lo siguiente:

- Mínima tensión en fin I/J: Es la configuración geométrica tal que se obtenga la mínima tensión en el primer punto (I) o en el último (j) en que se definió el cable.
- Tensión en el fin I/J: Seleccionar esto permite especificar la tensión que se quiere en el cable al inicio (I) o al fin (J). Seleccionando esta opción se libera una ventana a la derecha para poder especificar cuanto se desea de tensión
- Componente de tensión horizontal: Como es sabido, en los cables la tensión horizontal se mantiene constante, por lo que seleccionando esta opción se habilita una ventana a la derecha para especificar la tensión horizontal en el cable
- Máxima deformación vertical: Esta opción permite especificar la máxima deformación vertical que puede adoptar el cable. Entiéndase por deformación vertical la distancia entre el cable recto (línea recta entre los dos puntos de apoyo) y la posición que está adoptando, más conocido como flecha.
- Punto mínimo de deformación vertical: Esta opción permite especificar el punto mínimo de altura que puede adoptar la deflexión acorde al punto de apoyo más bajo.
- Largo no deformado: Esta opción permite especificar el largo no deformado del cable.
- Largo deformado: Esta opción permite especificar el largo deformado del cable

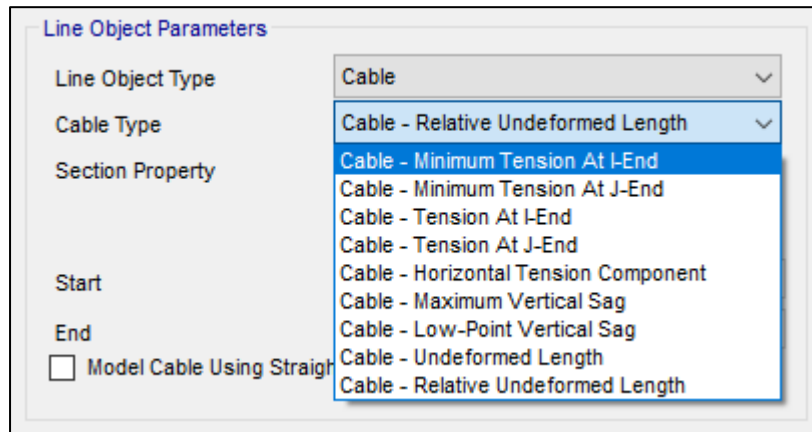


Figura 47. Parámetros posibles de modificar en el dibujo de un cable (SAP 2000).

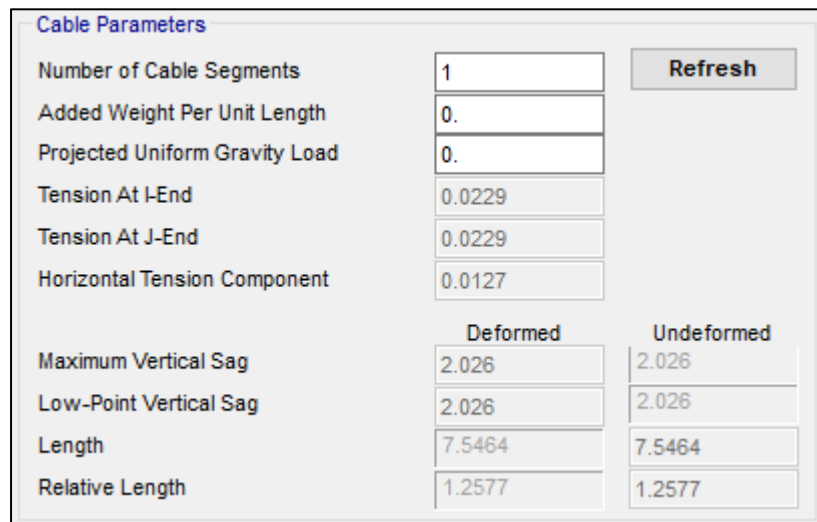


Figura 48. Parámetros y ventanas que se activan acorde al tipo de cable que se esta trabajando (SAP 2000).

Todas las ventanas que se habilitan para especificar algún valor de tensión, largo o deflexión, se muestran en la **Figura 48**. En esta misma ventana se puede ver que existen tres parámetros que son posibles de modificar en cualquier caso, el número de segmentos de cable, el peso por unidad de largo y la carga gravitacional proyectada. Esto permite darle diferentes formas al cable (parábola o catenaria) manteniendo las otras características especificadas antes en la **Figura 47**. Para entender de mejor forma los parámetros de forma de los cables se muestra la **Figura 49**.

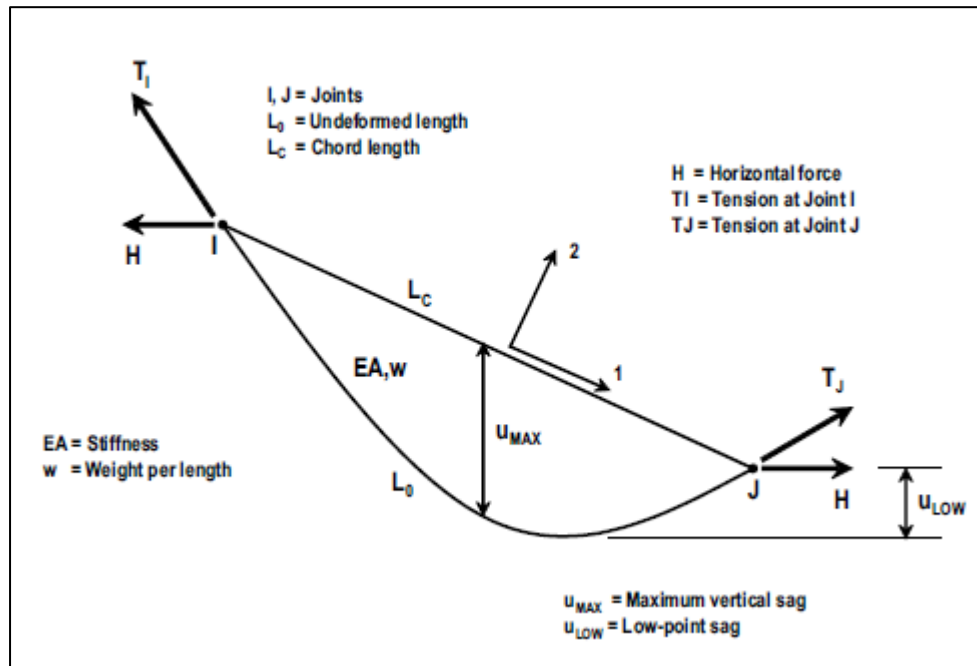


Figura 49. Propiedades de los cables, ejes locales, parámetros de forma y dimensiones (Manual SAP 2000).

Una vez dibujados los cables, es necesario colocarle las cargas a las que son sometidos y al igual que para los elementos 'Frame', existen varias formas de hacerlo dependiendo de lo que se necesite (**Figura 50**). Se debe generar el tipo de carga antes de aplicarla al cable como a cualquier elemento, para poder trabajar con ella. Las formas de cargar un cable son variadas:

- Gravitacionales: este parámetro cambia el factor de peso propio del cable y puede aplicarlo en cualquier dirección.
- Distribuida: Es el tipo de carga más usado. Puede especificarse el patrón de carga, el sistema de coordenadas a usar (global, local, etc.), la dirección en la que será aplicada y la forma en que se cargará, ya sea como fuerza o momento.
- Temperatura: Esta carga se ingresa como una temperatura que dependiendo de las propiedades físicas de cable es que induce deformaciones axiales sobre este.
- Deformación y deformación unitaria: En inglés sale catalogado como 'Deformatio' y 'Strain' respectivamente y lo que hacen es que se induce una deformación en el largo del cable para el primer caso o una deformación unitaria en el mismo para el segundo caso.
- Fuerza objetivo: esta forma de ingresar cargas trabaja de manera de tensionar el cable axialmente hasta alcanzar la magnitud de fuerza que se especifique.

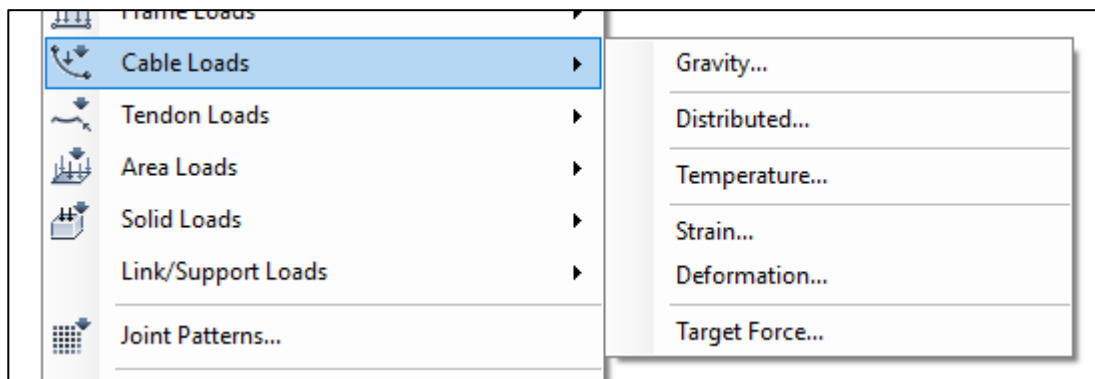


Figura 50. Tipos de cargas que pueden ser aplicadas a los cables.

Para muchas estructuras es necesario que los cables presenten cierto grado de pretensado en los mismos. Lograr esto no es tan directo como se cree y hay que tener ciertas consideraciones al momento de hacerlo. Existen dos formas de colocar pretensado a los cables. La primera es al momento de dibujar cada cable. En este caso se selecciona la opción de 'Tensión en punto I/J' y se coloca la magnitud del pretensado deseado. A diferencia de las cargas por unidad de largo o distribuidas de esta misma ventana (**Figura 46**), las tensiones en estos puntos se mantienen y quedan como una característica del cable que no puede modificarse fácilmente.

La otra forma de colocar una carga de pretensado en un cable es aplicando una 'Fuerza Objetivo' y mediante un patrón de carga previamente definido, colocar esta con la magnitud deseada. Las ventajas de este método es que, en caso de requerirse, se puede modificar después la magnitud del pretensado fácilmente y se puede colocar el pretensado en varios elementos al mismo tiempo y no uno a uno como es con el otro caso.

Se debe tener especial cuidado en utilizar solo uno de estos métodos y no ambos, ya que esto multiplicaría el pretensado del cable y llevaría a resultados erróneos.

Al momento de analizar el modelo es necesario definir que las cargas impuestas en los cables sean calculadas mediante métodos no lineales. Esto se hace luego de especificar los patrones de carga y yendo a la sección justo inferior llamada 'Casos de Carga'. En esta parte se selecciona la carga deseada y se debe especificar en el apartado 'Tipo de Análisis' que sea No lineal, lo que desplegará una nueva sección de la pestaña como se muestra en la **Figura 51**. Posteriormente se debe seleccionar en los parámetros de no linealidad geométrica, que se realicen los cálculos con 'P-delta' para una correcta aproximación de los resultados con los comportamientos reales de los cables.

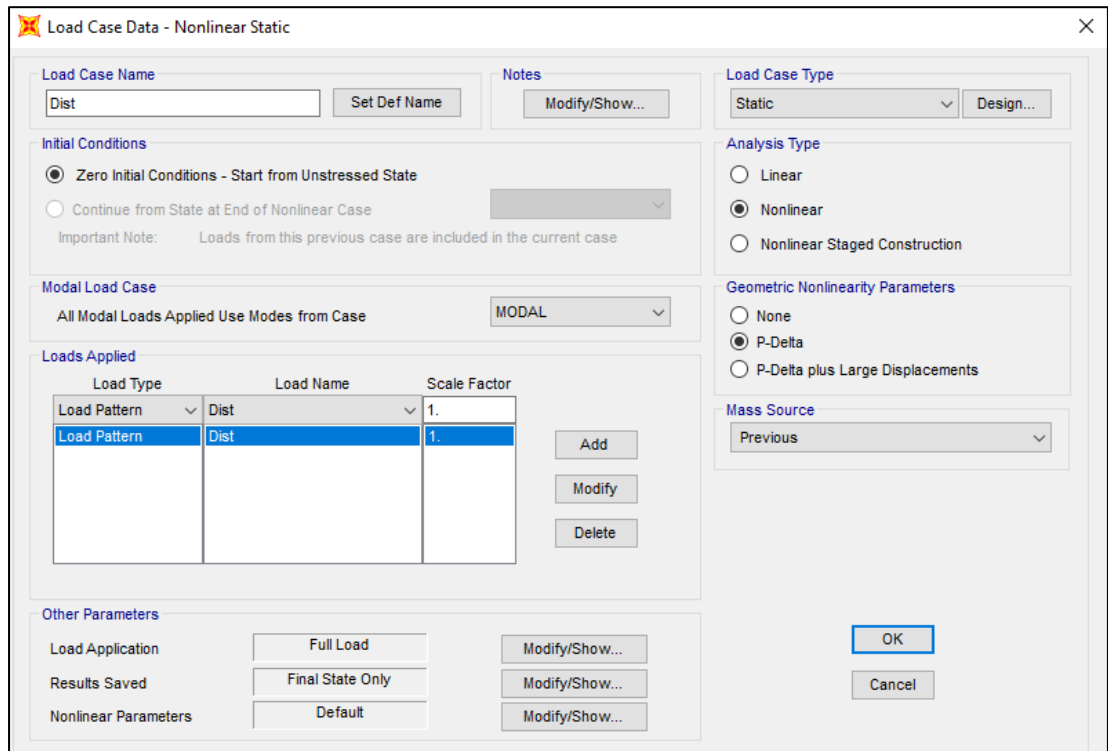


Figura 51. Sección donde se define la no linealidad del análisis de las cargas en cables

Cabe destacar que los cálculos no lineales tienden a tardar mucho más que los regulares ya que se debe alcanzar cierta convergencia en los resultados. Estos parámetros de cálculo, así como la cantidad de pasos a realizar por el programa o el nivel de error aceptable en la convergencia, se pueden definir en la sección 'Modificar /Mostrar' los parámetros no lineales en la parte inferior de la pestaña mostrada en la **Figura 51**.

ANEXO B: PROCESO DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURA BÁSICA

El proceso para determinar la estructura, forma, dimensiones y diversos otros factores influyentes en las características de los dos casos de estudio y la solución base, contó con un análisis de las problemáticas, las que son diferentes entre cada uno de ellos. En el presente anexo se pretende mostrar el proceso de diseño de la estructura base que se utilizó para comparar una posible forma de abordar la problemática de los stockpiles con los casos de estudio desarrollados anteriormente.

El primer paso para diseñar la estructura de acero enrejado es definir la forma. El único dato, y lo que más restringía las formas posibles, era la dimensión del cono. Teniendo esto en consideración se planteó una solución de una esfera excéntrica como se muestra en la **Figura 52**. Esta figura muestra una elevación del cono del stockpile en el suelo, en donde se puede ver la forma que toma la esfera alrededor de él. Este perímetro se fijó de tal manera que en la base del domo hubiesen 120 [m] de diámetro (12 [m] más de lo que mide el cono) y que llegara a 52 [m] de altura para dejar un margen suficiente para la operación de las máquinas y que el material acopiado no sobrepase la altura máxima de la estructura.

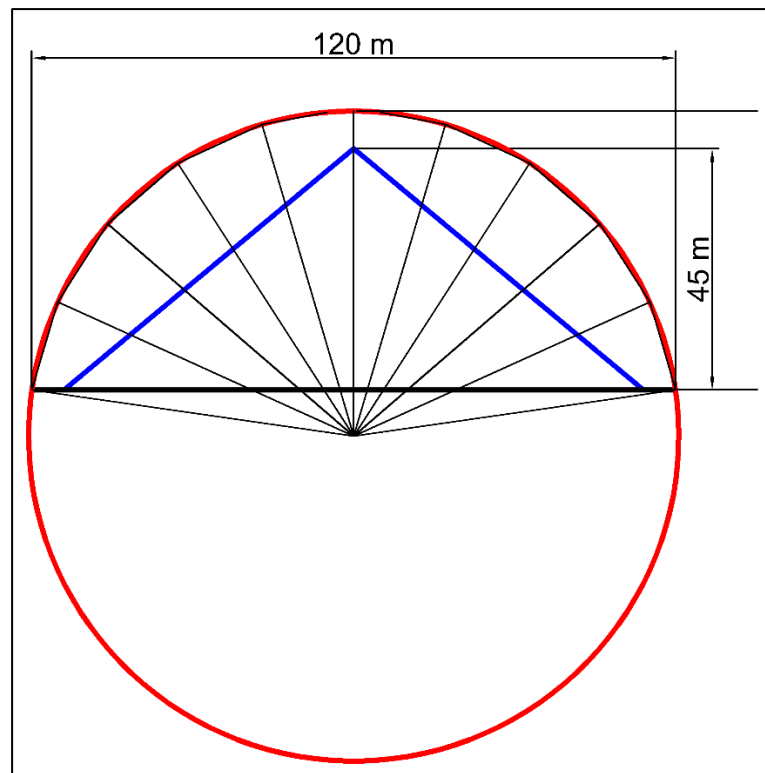


Figura 52. Determinación de la forma de la estructura base (Autor)

En la Figura anterior se puede ver la esfera, llevada a una elevación en color rojo, cuya superficie imaginaria es usada como referencia para posicionar cada una de las vigas-columnas principales que dan forma a la estructura tipo domo de vigas de acero.

También se muestra en color azul la forma del stockpile y como este es rodeado por el domo.

Luego de tener definida la superficie base por donde pasaran las vigas, se debe determinar cómo serían las secciones rectas de las mismas y cuál sería la discretización del largo de los elementos a utilizar. Para esto, se decide dividir la sección circular de la esfera base que se encuentra en la superficie, en 10 partes iguales, en las cuales se estructurarían secciones rectas entre cada intersección del círculo con los radios dibujados, como se muestra en la **Figura 52**. Esto determina los quiebres que la columna debe tener para lograr la forma de domo y además donde se situarían los puntales y riostras laterales.

Teniendo esto presente, el siguiente paso es determinar la cantidad de caras o secciones laterales que tendrá el domo y para esto se usó como ejemplo el domo existente en Namibia el cual, con similares características, es el utilizado como base para la forma y distribución de riostras y puntales (Ver **Figura 35**.). Con esto se logra un resultado como el que se observa en la **Figura 53**.

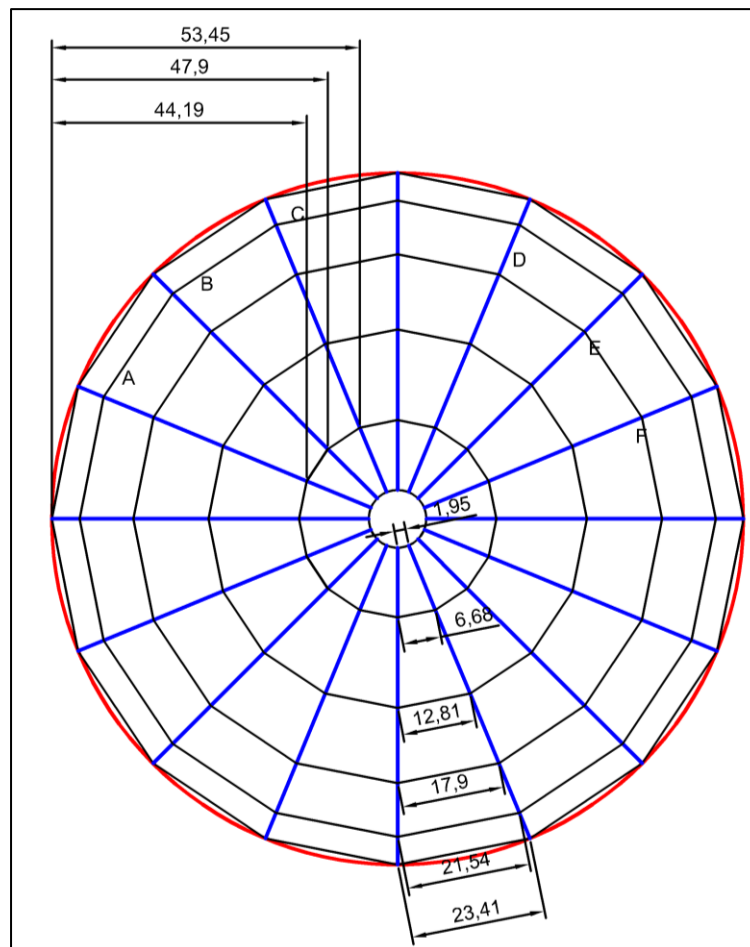


Figura 53. Vista en planta de la estructura base. Aquí se puede apreciar las diferentes caras del domo separadas por las vigas de color azul y el área de la esfera en color rojo. (Autor)

En el caso de las vigas se dispone de un total de 4 quiebres logrando así dividir las caras del domo en 5 secciones planas. Para que pueda ingresar el material, y sea acumulado en la pila, es necesario que el domo cuente con una abertura en la parte superior.

Debido a que existe un gran espacio entre las columnas en los primeros 3 niveles del domo es que se dispone, al igual que el domo que está en Namibia, de una serie de columnas secundarias que parten desde el nivel del suelo y culminan en la base del nivel 3. Para finalizar con el diseño básico, se colocaron puntales en todos los quiebres de columna, y riostras en tramo por medio del domo tal como se muestra en la imagen del modelo SAP (**Figura 54**)

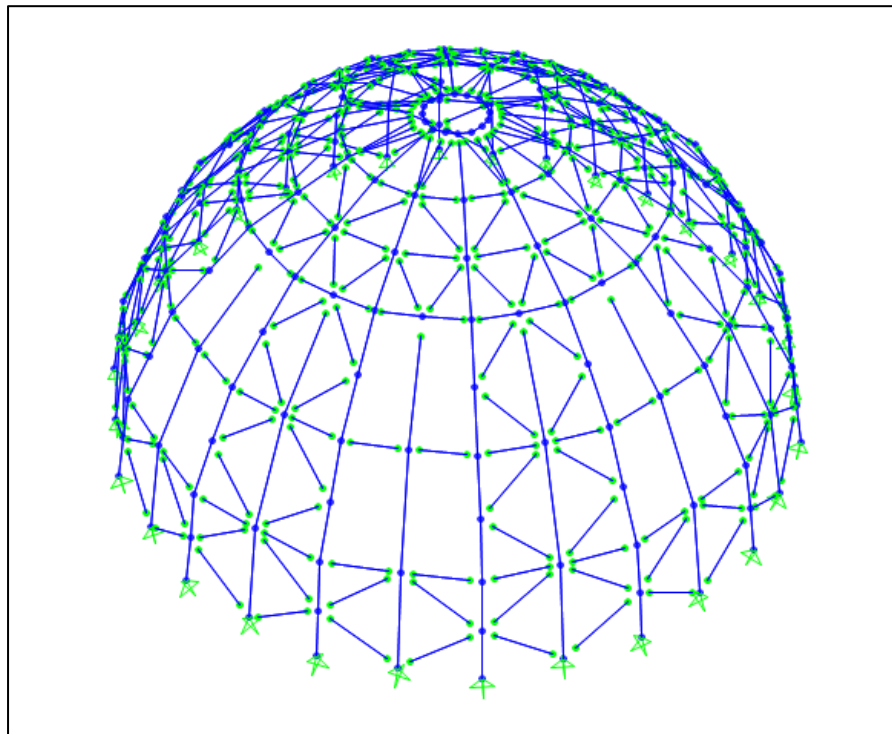


Figura 54. Modelo computacional de la solución base (Autor).

Luego de la determinación de la forma básica, queda solo elegir los perfiles para cada elemento. Para las columnas primarias y secundarias se utilizaron secciones IN. Los puntales son una combinación de elementos tipo cajón para aquellos que no son solicitados de gran medida, o secciones IN cuando los esfuerzos así lo requieran. Las riostras son todas confeccionadas en secciones cajón variando sus dimensiones a medida que crecía el domo.

Los perfiles anteriores varían entre ellos en dimensiones y espesores acorde a los esfuerzos solicitados sobre cada uno, según lo visto en los capítulos anteriores.

ANEXO C: PROCESO DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURA CON TENSEGRITY

El diseño de la cubierta utilizando el sistema 'Tensegrity' fue el más difícil de todos debido a lo complejo de su estructura y forma adoptada, además de la cantidad de variaciones de geometría que se veían al momento del análisis.

A lo largo de la bibliografía revisada, se mencionaba el caso del 'Estadio Único de La Plata' como una estructura moderna que fue construida mediante este método, por lo que para el ejercicio de esta memoria se determinó ocupar esto como base y adoptarlo a los requerimientos propios del proyecto estudiado del 'Stockpile'. Lo primero que se tiene que adoptar del diseño original es que la estructura posee dos puntos altos o "cumbres" debido a la forma ovalada que tiene la cancha de futbol a cubrir, mientras que el 'Stockpile' posee un perímetro en planta de forma circular y solo se requiere una cúspide en la cubierta. Al mismo tiempo que se adecuaba la forma, se deben determinar la longitud de los tubos que hacen de elementos a compresión en el sistema, además de la distancia que debe haber entre los diferentes anillos y niveles, junto con la distribución de los cables de la red de 'Tensegrity'. Para lo último se utilizó el diseño del estadio antes mencionado el cual responde a lo expuesto en el punto [7] de la bibliografía "Prestress design of cable dome with new forms" como "Forma híbrida II" (Ver **Figura 55**).

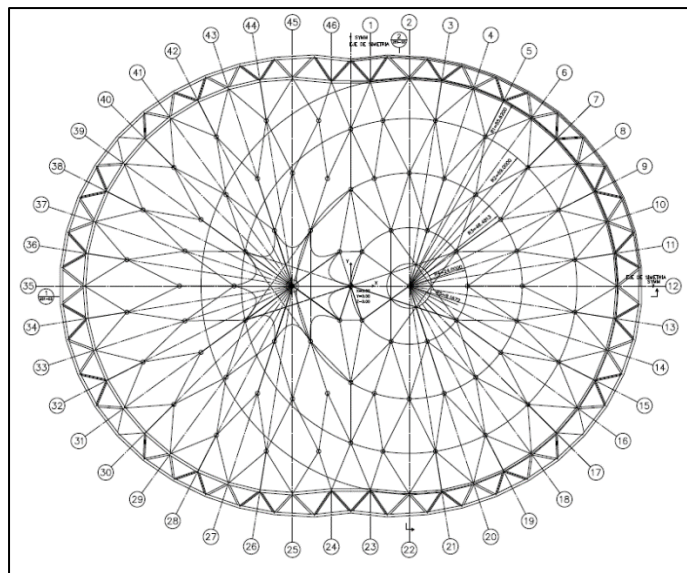


Figura 55. Distribución de los cables en planta del Estadio Único de la Plata. Aquí se observa la forma ovalada que adopta la cubierta y las dos crestas que presenta la estructura. Cortesía de Federico García Zúñiga.

Para los ángulos de elevación de los cables y la formación de la cubierta en altura, se toma como primera medida la experiencia Argentina por lo que el primer modelo cuenta con esa forma. El resultado de todos estos supuestos fue una cubierta que no era capaz de elevarse lo suficiente como para dejar un espacio necesario para que no existieran interferencias entre los cables inferiores del 'Tensegrity' y el material acopiado, además de situarse la base del sistema a mucha altura como para que esta fuese viable. Otro problema fue que los cables inferiores presentaban grandes tensiones, mayores a

las resistidas por la sección efectiva impuesta sobre ellos, y como consecuencia los cables de la parte superior prácticamente no trabajaban. Esto obliga a plantear la situación de otra manera.

Para la siguiente iteración en la búsqueda de la forma adecuada, entiéndase esto en la determinación del nivel de pretensado que se le coloca a los cables y la forma del sistema, se decide trabajar con los niveles superiores de la cubierta, logrando así la estabilidad y distribución de esfuerzos en los cables que presentan más problemas. Este proceso simplifica de gran manera el modelo pudiendo probar diferentes niveles de pretensado y elevaciones de la parte superior hasta lograr la forma óptima en la que la estructura es estable y las tensiones estén dentro de los límites resistentes de los elementos.

Con estas secciones ya definidas, se procede a agregar el nivel inferior faltante de manera de realizar un modelo computacional completo y determinar todas las secciones necesarias de cables y tubos para así obtener finalmente el valor de la diferencia máxima entre desniveles que existen desde la cima hasta los apoyos basales. Al realizar el análisis, después de agregar los cables y las cargas finales a ellos, se observó que toda la estructura sufría cambios y aparecían deflexiones en los cables superiores que en el ensayo anterior no existían. Es por esto que se decide realizar un tercer método de determinación de las tensiones en los cables.

Se divide el modelo en sub divisiones que contemplan 2 niveles de cables de cubierta o cima y uno de cables de arco a tracción como se muestra en la **Figura 56**. Para cada sub división se fijan los apoyos en los extremos superiores e inferiores y se modifica el nivel de pretensado de cada cable hasta lograr la estabilidad. Luego, se fija la siguiente y se procede de la misma manera solo que, como un nivel de cables se repite entre sub divisiones, se inicia la búsqueda de la pretensión con esa carga ya impuesta y se modifica el pretensado solo en los cables que no han pasado por ese proceso. Esto se realiza hasta que cada sub división por si sola esté en equilibrio de fuerzas y no presente mayores deformaciones. Una vez realizado esto, se liberan los apoyos y se analiza la estructura completa. Se concluye que existen cambios en las tensiones de los cables y deflexiones de los puntos superiores, pero con pequeños ajustes se logra el diseño final.

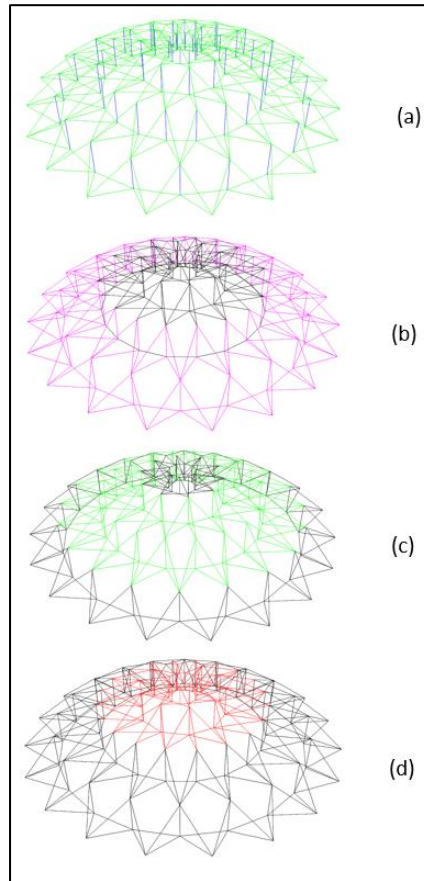


Figura 56. Secciones en las que se dividió la estructura para determinar el nivel de pretensado en los cables. (a) Estructura original, (b) Primera sub división que contempla nivel 1 y 2 de cables en color morado, (c) Segunda sub división que contempla niveles 2 y 3 de cables en color verde, (d) Tercera sub división que contempla niveles 3 y 4 de cables en color rojo.

ANEXO D: PROCESO DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURA CON MEMBRANA FLEXIBLE

Como se define anteriormente, la solución que usa membranas flexibles para cubrir la estructura, se basa en el esqueleto principal de la solución base. A esta estructura se le eliminan todas las riostras y puntales a excepción de las del último nivel, dejando las vigas principales en el mismo ordenamiento que poseían. Con este esqueleto se comenzó a diseñar la forma que la membrana adoptaría por sobre la estructura (Ver **Figura 57**).

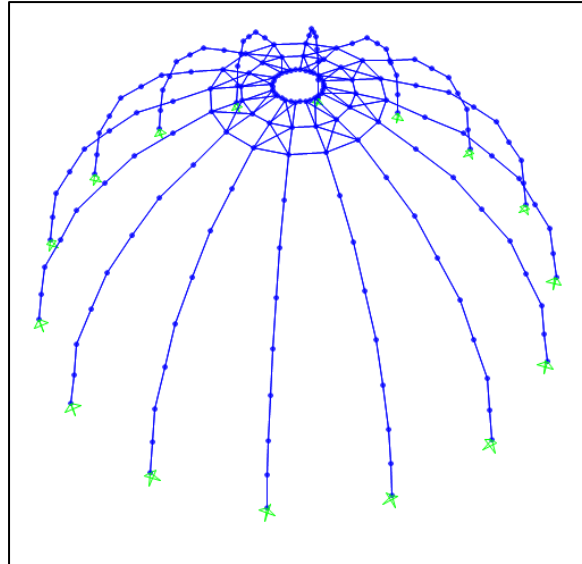


Figura 57. Esqueleto base de la solución con membranas flexibles.

El mayor desafío para esta solución, fue poder modelar la membrana en el programa SAP 2000 debido a que este no presenta una manera detallada o dedicada de hacerlo, proceso denominado 'Form-Finding'. Para lograr esto se dispuso de una malla de cables unidos entre sí con tal de darle la forma de doble curvatura como se observa en la **Figura 58**. Esta forma es una aproximación y fue definida por el Autor guiándose por lo que se observa en estructuras anteriores. Las uniones, tanto a las vigas principales como al suelo, simulan las conexiones a dichos elementos para poder traspasar las cargas del pre-tensado de la membrana, que en este caso corresponde a los cables, y las diferentes cargas de uso sobre esta.

Luego de definir la forma de la membrana se procedió a cargar el modelo y realizar el análisis estructural, tomando en cuenta siempre la no linealidad de los cables. Esta parte del diseño fue la que tardó más debido a que el proceso podía demorar fácilmente 8 horas para entregar un resultado fallido debido a que los cálculos no convergían acorde al margen de error mínimo o la distribución de la "membrana" no era estable. Es por esto que se requirió realizar este proceso varias veces, con distintos diámetros de cables, niveles de pre-tensado e incluso configuraciones distintas de curvaturas, hasta poder llegar al resultado final que se muestra en la sección **¡Error! No se encuentra el origen e la referencia.**

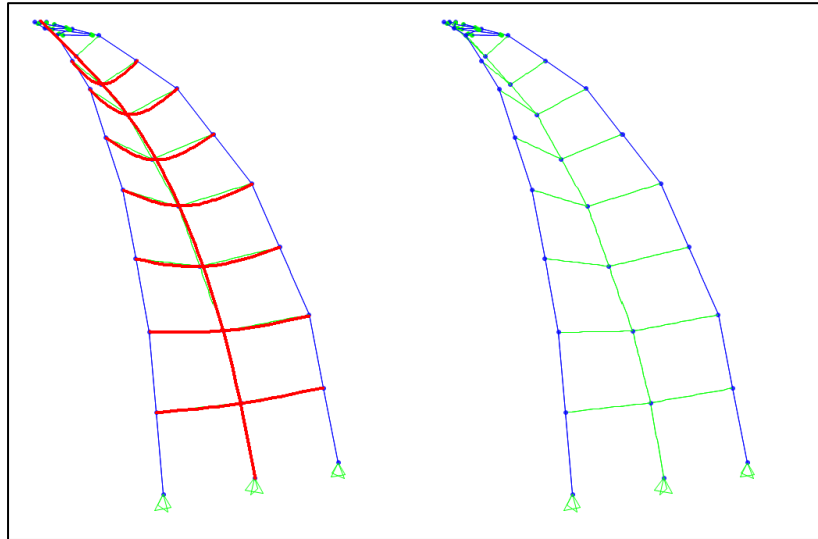


Figura 58. Curvatura idealizada (Izquierda) y curvatura simplificada por cables (Derecha) de una membrana sobre el domo del modelo optimizado.

Por otro lado, la estabilidad de los elementos rígidos debía ser verificada, por lo que se realizó un análisis de pandeo de las vigas de manera independiente, resultando la necesidad de colocar elementos atiesadores en la parte superior del domo.

La estructura, una vez realizado el análisis estructural completo de las vigas de acero y los cables que simulan la membrana sobre este, presentaba problemas de inestabilidad a la torsión. Esto es debido a que se le extrajo las riostras y puntales de las secciones bajas de la misma para alivianar el peso total pero produjo el problema antes mencionado. Para solucionar esto es que se dispuso de cables diagonales entre las vigas principales y por sobre la membrana para que no interfiriera con esta al momento de trabajar tal como se muestra en la **Figura 59**.

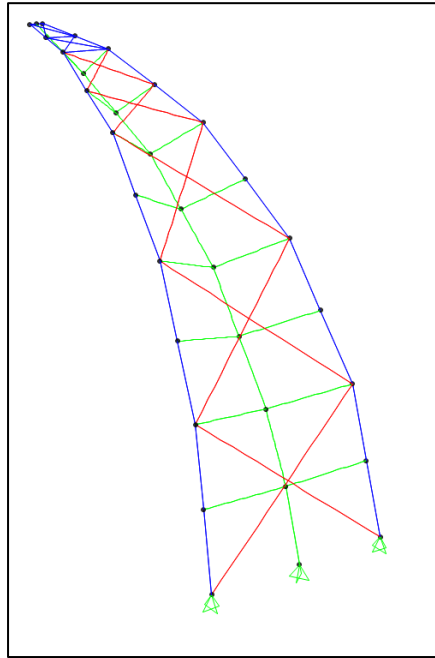


Figura 59. Diagonales de cables para agregar rigidez a la torsión en la estructura. En azul se ven los elementos rígidos, en verde los cables que simulan la membrana y en rojo los cables diagonales.