

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Licenciatura en Ingeniería Civil

Análisis y Diseño de una Lonaria bajo un Sistema Reticular Presforzado

## TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Presenta:

Edgar Alán Castellanos Espinosa

Director de Tesis:

Dr. Jaime Horta Rangel

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Febrero de 2010  
México

**BIBLIOTECA CENTRAL**  
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

No. Adq. 1173629

No. Título \_\_\_\_\_

Clas 15

624.1774

C348a

\_\_\_\_\_

*Dedicado a mí hermano Omar*

## Resumen

El presente trabajo estudia el comportamiento bajo cargas de una Lonaria tipo paraboloides hiperbólico (hypar). La membrana se encuentra fija a una estructura tubular rígida. La membrana compuesta de fibras y capas poliméricas se analiza como una estructura reticular equivalente conformada por cables presforzados. Se consideran el análisis de los efectos de viento así como cargas del tipo gravitacional. El procedimiento de análisis se basa en un modelo no-lineal para lo cual se desarrolla un programa en Fortran (APDL) que corre en ambiente Ansys. Se analizan las implicaciones que tienen en el diseño debido a las propiedades de la membrana, las tensiones iniciales de presfuerzo, así como las secciones tubulares perimetrales. Se muestra al final las gráficas resultantes de esfuerzos y elementos mecánicos de diseño.

*Palabras clave: Lonaria, Cables Presforzados, Análisis No-lineal, Efectos de viento, Programación APDL*

## Summary

The following paper studies the behavior underneath the weight of a hyperbolic paraboloid (hypar) tent. The membrane is fixed upon a rigid tubular structure. The membrane made up of fiber and polymeric layers is analyzed as an equivalent grid structure composed of steel wires. Wind effects and gravitational weight are taken into consideration in the analysis. The analysis procedure is based on a non-linear model, for which a program was developed in Fortran (APDL) that runs in an Ansys environment. The implications they have on the design are analyzed due to the membranes properties, the initial prestrength tensions, and the perimetral tubular sections. The resulting charts showing the strengths and the mechanical elements for each case are show at the end.

*Keywords: fabric shell, prestressed cables, non-linear analysys, wind effects, programmation APDL.*

# Agradecimientos

A mis padres Oscar y Yolanda, por el apoyo incondicional y la educación que me han dado.

A mi novia Nancy, por todo el amor y la alegría que hemos vivido.

A mi compa Arturo, por recordarme pensar diferente.

A todos mis amigos. Especialmente: A Fabiola e Isabel, por aguantar mis locuras. A los gatos, Edgardo y Valentín, por lo bien que la pasamos. A Joaquín, quien sin proponérselo me dio los ánimos para no abandonar la carrera.

A mi director de Tesis, Dr. Jaime Horta Rangel por todo su apoyo, consejos y dedicación para la realización de ésta tesis.

A todos mis maestros, quienes con su vocación fomentaron en mí el interés en la ingeniería.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por educarme en la Verdad y en el Honor.

Al Cedart “Ignacio Mariano de las Casas”, por la maravillosa formación académica que recibí.

# Índice General

<b>Resumen</b>	I
<b>Summary</b>	II
<b>Agradecimientos</b>	III
<b>Índice General</b>	IV
<b>Índice de figuras</b>	VII
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	1
1.1 Prefacio	2
1.2 Consideraciones de equilibrio	2
1.3 Estructura minimalista	3
1.4 Tensegridad	4
1.5 Justificación	4
1.6 Objetivo	4
1.7 Hipótesis	4
1.8 Características generales	5
1.9 Alcances	5
<b>1.10</b> Aportación	5
<b>Capítulo 2. Antecedentes</b>	6
2.1 Introducción	6
2.2 Ingeniería de la tela arquitectónica	7
2.3 Forma y comportamiento de las estructuras de tela	7
2.4 Forma superficial	9
2.4.1 Estructuras Tensionadas de Membranas Anticlásticas	10
2.4.1.1 Formas básicas de membrana anticlástica	11
2.4.2 Estructuras Tensionadas de Membranas Sinclásticas	11
2.5 Pretensado	12
2.6 Deformabilidad	12
2.7 Sistema Estructural	13
2.8 Cualidades de la Membrana Arquitectónica	13
2.8.1 Ligeras	13
2.8.2 Translucidez	13
2.8.3 Flexibilidad	14
2.8.4 Escultural	14
2.8.5 Seguridad	14
2.8.6 Características Acústicas	14
2.8.6.1 Predicción Acústica de las Estructuras de la Membrana	15
2.8.7 Materiales Resistentes al Fuego	15
2.8.8 Protección del clima	16
2.8.9 Movibles y Temporales	16
2.8.10 Convertibles y Adaptables	16
2.9 Clasificación	17
2.9.1 Abiertas	17
2.9.1.1 Abiertas y Cubiertas	18
2.9.1.2 Abiertas y Adheridas	19
2.9.2 Cerradas	19

2.9.2.1 Cerradas y Cubiertas	19
2.9.3 Convertibles	21
2.9.3.1 Convertibles y cubiertas	21
2.9.3.2 Convertibles e internas	22
2.9.3.3 Convertibles y adheridas	23
2.10 Estructuras de apoyo de la membrana	23
2.10.1 Mástiles externos e internos	23
2.10.2 Bordes	24
2.10.2.1 Placas base	24
2.10.2.2 Anclajes	25
2.11 Material	25
2.11.1 Una distinción del concepto de construcción	26
2.11.2 El material tela	26
2.11.3 Hilos	26
2.11.4 Composición del material base	27
2.11.5 Costuras	28
2.11.6 Recubrimientos	28
2.12 Cargas de diseño	29
2.13 Estructuras lonarias en México	29
2.13.1 Estructuras lonarias en Querétaro	31
2.14 Sobre la lonaria tema de estudio	
<b>Capítulo 3. Metodología</b>	33
3.1 Introducción	33
3.2 Consideraciones sobre los modelos	34
3.3 Aspectos generales del proyecto	37
3.4 Materiales Componentes de la Estructura	37
3.4.1 Membrana	38
3.4.2 Tubo perimetral	38
3.5 Aspectos generales del procedimiento de análisis	39
3.5.1 Modelo Discreto de elemento finito	42
3.5.2 Aspectos básicos de presfuerzo	43
3.5.3 Lineamientos básicos de Diseño	43
3.6 Generalidades del programa	47
3.6.1 Diagrama de bloques del programa	
<b>Capítulo 4. Caracterización de cargas</b>	48
4.1 Aspectos particulares de efectos accidentales	48
4.2 Acción del viento	49
4.3 Propuesta de coeficientes de presión	50
4.4 Cargas a considerar	51
4.5 Características de los casos de estudio	
<b>Capítulo 5. Resultados</b>	52
5.1 Variación de la forma	57
5.2 Variación de las propiedades mecánicas del material	62
5.3 Caso 1. Cargas en el sentido de la gravedad	69
5.4 Caso 2. Viento de frente	74
5.5 Caso 3. Viento de lado	



<b>Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>79</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>81</b>
<b>Anexos</b>	
Anexo 1. Programa Lonaria. Caso 1. Cargas en sentido de la gravedad	83
Anexo 2. Análisis Caso 2. Viento de frente	88
Anexo 3. Análisis Caso 3 Viento de lado	89
<b>Glosario</b>	<b>90</b>

# Índice de figuras

<b>Fig 1.1</b> La tienda negra	1
<b>Fig 1.2</b> Equilibrio de fuerza axial	2
<b>Fig 1.3</b> Tensegrity escultura, Sleeping Dragon, 2002-03 Kenneth Snelson	3
<b>Fig 2.1</b> Tienda circo “Chapiteau”	6
<b>Fig 2.2</b> Superficie anticlástica	7
<b>Fig 2.3</b> Forma sinclástica y Forma anticlástica	9
<b>Fig 2.4</b> Formas anticlásticas: Hypar, Cono y Montura	10
<b>Fig 2.5</b> Caballete y Valle	10
<b>Fig 2.6</b> Modelo hecho de película de jabón	11
<b>Fig 2.7</b> Clasificación de lonarias	17
<b>Fig 2.8</b> Tienda de asamblea, Malasya (Abierta y cubierta)	18
<b>Fig 2.9</b> Scott Wilson, Basingstoke, UK (abierta e interna)	18
<b>Fig 2.10</b> Schlumberger en Motrouge. París, Francia (abierta y adherida)	19
<b>Fig 2.11</b> Lugar para encuentros. Bruselas, Bélgica (cerrada y cubierta)	19
<b>Fig 2.12</b> Edificio de Oficinas. Miunich, Alemania (internas y cerradas)	20
<b>Fig 2.13</b> Centro multideportivo Amagi, ciudad de Amagi Yugashima, Japón (cerrada y cubierta)	20
<b>Fig 2.14</b> Pabellón de los Venezolanos	21
<b>Fig 2.15</b> Las pantallas en Bristol, Reino Unido (interna y convertible)	22
<b>Fig 2.16</b> Ruinas de la iglesia de Bad Hersfeld, Alemania	22
<b>Fig 2.17</b> Mástil interno y externos	23
<b>Fig 2.18</b> Bordes flexibles	24
<b>Fig 2.19</b> Bordes rígidos	24
<b>Fig 2.20</b> Placas base	24
<b>Fig 2.21</b> Anclajes	25
<b>Fig 2.22</b> Patrones de tejido sencillo	27
<b>Fig 2.23</b> Costura engrapada	27
<b>Fig 2.24</b> Costuras soldadas	27
<b>Fig 2.25</b> Costuras encajadas	27
<b>Fig 2.26</b> Soccer City, Aguascalientes, Ags.	29
<b>Fig 2.27</b> Plza de los artistas, Celaya, Gto.	29
<b>Fig 2.28</b> Plaza Veleros	29
<b>Fig 2.29</b> P&G Ciudad de México	29
<b>Fig 2.30</b> Centro de rehabilitación infantil (CRIQ)	29
<b>Fig 2.31</b> Restaurant “El Caserio”	30
<b>Fig 2.32</b> Grupo Uehara. Kiosco Minimalista. Parque Alfalfares	30
Estructura minimalista y tensegrity	30
<b>Fig 2.33</b> Tecnológico de Monterrey	30
<b>Fig 2.34</b> Plaza Maraviallas	30
<b>Fig 2.35</b> Paraboloides Hiperbólico. Facultad de Ingeniería. UAQ	31
<b>Fig 2.36</b> Forma Básica de Hypar a partir de un paraboloides hiperbólico	31
<b>Fig 2.37</b> Travis Perkins, UK	31
<b>Fig 2.38</b> Kensington Prep School, London, UK	31
<b>Fig 2.39</b> BIC, Newark, UK	31
<b>Fig 3.1</b> Nodos de un paraboloides hiperbólico	34
<b>Fig 3.2</b> Cables haciendo la forma del paraboloides hiperbólico	35

<b>Fig 3.3</b> Estructura propuesta	35
<b>Fig 3.4</b> Conformación reticular de la membrana	36
<b>Fig 3.5</b> Propuesta Lonaria. Planta	37
<b>Fig. 3.6</b> Elemento finito unidimensional – viga 3D. Grados de libertad	39
<b>Fig. 3.7</b> Proceso iterativo de análisis al considerar la tensión de membrana, conforme al Modelo de Filonenko-Boro	42
<b>Fig. 3.8</b> Diagrama de bloques del programa	47
<b>Fig 4.1</b> Distribución de coeficientes de presión, Caso 1	49
<b>Fig 4.2</b> Distribución de presión media en techos inclinados (Wind loading of structures, John D. Holmes, 2003)	50
<b>Fig 4.3</b> Distribución de coeficientes de presión, Caso 2 (simétrico)	50
<b>Fig 4.4</b> Distribución de coeficientes de presión, Caso 3	50
<b>Fig. 5.1</b> Caso 1; 2 y 3 m	52
<b>Fig. 5.2</b> Caso 2; 3 y 4m	52
<b>Fig. 5.3</b> Caso 1; 2 y 3 m	52
<b>Fig. 5.4</b> Caso 2; 3 y 4m	52
<b>Fig 5.5</b> Gráfica de desplazamientos máximos	53
<b>Fig 5.6</b> Gráfica de tensiones máximas en las barras X	53
<b>Fig 5.7</b> Gráfica de tensiones mínimas en las barras Z	54
<b>Fig 5.8</b> Gráfica de esfuerzos máximos en las barras X	54
<b>Fig 5.9</b> Gráfica de esfuerzos mínimos en las barras Z	54
<b>Fig 5.10</b> Gráfica de fuerzas normales máximas en el tubo perimetral	55
<b>Fig 5.11</b> Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Y	55
<b>Fig 5.12</b> Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Z	55
<b>Fig 5.13</b> Gráfica momento torsionante en tubo perimetral	56
<b>Fig 5.14</b> Gráfica de momento flexionante en Y	56
<b>Fig 5.15</b> Gráfica de momento flexionante en Z	56
<b>Fig 5.16</b> Gráfica de desplazamientos máximos	58
<b>Fig 5.17</b> Gráfica de tensiones máximas en X	59
<b>Fig 5.18</b> Gráfica de tensiones mínimas en Z	59
<b>Fig 5.19</b> Gráfica de esfuerzos máximos en X	59
<b>Fig 5.20</b> Gráfica de esfuerzos mínimos en Z	60
<b>Fig 5.21</b> Gráfica de normales máximas en el tubo perimetral	60
<b>Fig 5.22</b> Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Y	60
<b>Fig 5.23</b> Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Z	61
<b>Fig 5.24</b> Gráfica de momento torsionante en tubo perimetral	61
<b>Fig 5.25</b> Gráfica de momento flexionante en Y	61
<b>Fig 5.26</b> Gráfica de momento flexionante en Z	62
<b>Fig 5.27</b> Paraboloide hiperbólico	63
<b>Fig 5.28</b> Sección Romboidal del paraboloide hiperbólico	63
<b>Fig 5.29</b> Modelo discreto	63
<b>Fig 5.30</b> Condiciones de frontera y fuerzas nodales	64
<b>Fig 5.31</b> Desplazamientos totales del paraboloide (m) en perspectiva	64
<b>Fig 5.32</b> Desplazamientos totales del paraboloide (m) planta	64
<b>Fig 5.33</b> Tensiones en barras X (T)	65
<b>Fig 5.34</b> Esfuerzos en membrana X ( $T/m^2$ )	65
<b>Fig 5.35</b> Esfuerzos en X. Perspectiva	65
<b>Fig 5.36</b> Tensiones en barras Z (T)	66
<b>Fig 5.37</b> Esfuerzos en Membrana Z ( $T/m^2$ )	66

<b>Fig 5.38</b> Esfuerzos en membrana Z (T/m <sup>2</sup> )	66
<b>Fig 5.39</b> Fuerzas normales en el tubo perimetral (T)	67
<b>Fig 5.40</b> Fuerzas cortantes Y en tubo perimetral (T)	67
<b>Fig 5.41</b> Fuerzas cortantes Z en tubo perimetral (T)	67
<b>Fig 5.42</b> Momento torsionante en tubo perimetral (T-m)	68
<b>Fig 5.43</b> Momento flexionante Y en tubo perimetral (T-m)	68
<b>Fig 5.44</b> Momento flexionante Z en tubo perimetral (T-m)	68
<b>Fig 5.45</b> Condiciones de frontera y fuerzas nodales	69
<b>Fig 5.46</b> Desplazamientos totales del paraboloides (m) en perspectiva	69
<b>Fig 5.47</b> Desplazamientos totales del paraboloides (m) Planta	69
<b>Fig 5.48</b> Tensiones en barras X (T)	70
<b>Fig 5.49</b> Esfuerzos en membrana X (T/m <sup>2</sup> )	70
<b>Fig 5.50</b> Esfuerzos en X. Perspectiva (T/m <sup>2</sup> )	70
<b>Fig 5.51</b> Tensiones en barras Z (T)	71
<b>Fig 5.52</b> Esfuerzos en Membrana Z (T/m <sup>2</sup> )	71
<b>Fig 5.53</b> Esfuerzos en membrana Z. Prespectiva	71
<b>Fig 5.54</b> Fuerzas normales en el tubo perimetral (T)	72
<b>Fig 5.55</b> Fuerzas cortantes Y en tubo perimetral (T)	72
<b>Fig 5.56</b> Fuerzas cortantes Z en tubo perimetral (T)	72
<b>Fig 5.57</b> Momento torsionante en tubo perimetral (T-m)	73
<b>Fig 5.58</b> Momento flexionante Y en tubo perimetral (T-m)	73
<b>Fig 5.59</b> Momento flexionante Z en tubo perimetral (T-m)	73
<b>Fig 5.60</b> Condiciones de frontera y fuerzas nodales	74
<b>Fig 5.61</b> Desplazamientos totales del paraboloides (m) en perspectiva	74
<b>Fig 5.62</b> Desplazamientos totales del paraboloides (m) Planta	74
<b>Fig 5.63</b> Tensiones en barras X (T)	75
<b>Fig 5.64</b> Esfuerzos en membrana X (T/m <sup>2</sup> )	75
<b>Fig 5.65</b> Esfuerzos en X. Perspectiva	75
<b>Fig 5.66</b> Tensiones en barras Z (T)	76
<b>Fig 5.67</b> Esfuerzos en Membrana Z (T/m <sup>2</sup> )	76
<b>Fig 5.68</b> Esfuerzos en membrana Z. Prespectiva	76
<b>Fig 5.69</b> Fuerzas normales en el tubo perimetral (T)	77
<b>Fig 5.70</b> Fuerzas cortantes Y en tubo perimetral (T)	77
<b>Fig 5.71</b> Fuerzas cortantes Z en tubo perimetral (T)	77
<b>Fig 5.72</b> Momento torsionante en tubo perimetral (T-m)	78
<b>Fig 5.73</b> Momento flexionante Y en tubo perimetral (T-m)	78
<b>Fig 5.74</b> Momento flexionante Z en tubo perimetral (T-m)	78

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Prefacio

Existen diversos tipos de construcciones que ha hecho el hombre para satisfacer sus necesidades, y una de las más antiguas ha sido su vivienda, siendo la tienda la construcción más antigua hecha por el hombre (sólo después de las modificaciones a las cavernas). La evidencia de huesos de mamut y de colmillos usados como soportes, se han encontrado en los sitios verificando que tienen más de 40,000 años en la región de Ucrania. La tienda ha sido la vivienda en una forma u otra para la mayoría de la gente nómada de la edad de hielo al presente. Las ayudas más comunes para el soporte de las tiendas eran ramas o los troncos del árbol. Los más pesados de éstos fueron dejados atrás debido a problemas de transporte. Las pieles de animales fueron utilizados en las primeras tiendas para forrar o menos frecuente, los pedazos de la corteza del abedul o los enrejados de las hojas. Gradualmente, posiblemente comenzando desde hace 10,000 años, éstos fueron substituidos por el fieltro o los materiales tejidos, tales como lanas o lona. Los materiales contemporáneos incluyen el aluminio, la fibra de vidrio y el acero para los elementos de soporte y las telas sintéticas altamente sofisticadas para el velum (Shaeffer R.E., 1996).

Hasta la mayoría de las tiendas recientes, consisten en tres formas básicas: la cónica o forma tipi, la extendida kibitka o yurta, que tienen paredes cilíndricas y una cónica o azotea domical, y la tienda negra que tiene el velum tensionado en formas de la silla de montar.



**Fig 1.1** La tienda negra

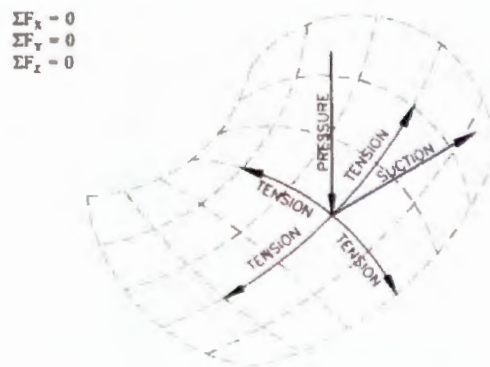
Como cada tipo de estructura tensada tiene cualidades que las hacen una mejor opción que otras estructuras tensadas. La Tienda Negra utilizaba un tejido flojo, lo cual permitía el paso de las corrientes de aire a través del tejido, lo cual provee de una regulación de la temperatura en climas cálidos. Estas eran fáciles de montar y desmontar en lapsos cortos de tiempo, lo que resulta de gran utilidad cuando se es nómada o se está en campaña militar. Ocupan un espacio modesto cuando estas están dobladas a comparación de los claros que puede cubrir una vez desplegada. Interviene fuertemente también el poder obtener claros tan grandes el que cuenten con muy poco peso propio.

Las estructuras lonarias, y los tensegritis, son un tipo especial de juntas pretensadas, armazones de barra con las características únicas: los elementos de la tensión están generalmente substituido por los cables, dando por resultado las estructuras estéticas, ligeras, las cuales parecen desafiar la gravedad. Las estructuras están generalmente estáticamente y cinemáticamente indeterminadas y derivan su estabilidad del estado de un autotensionante, que estabiliza cualquier mecanismo interno presente.

Los sistemas estáticamente balanceados están en equilibrio en cada configuración en su espacio de trabajo, aun cuando ninguna fricción esté presente: son neutralmente estables y tienen rigidez cero. Por consiguiente, estos sistemas se pueden funcionar con mucho menos esfuerzo con respecto a la situación desequilibrada. Por lo tanto, el equilibrio estático se utiliza para el diseño económico de energía en tecnología.

## 1.2 Consideraciones de equilibrio

Dado que las estructuras tensadas no pueden desarrollarse fuera de los esfuerzos del plano, las cargas son siempre resistidas por las fuerzas axiales planas. Cuando no se aplica carga externa, las fuerzas pretensadas en cada punto deben lograr un equilibrio entre sí. Esta condición obliga a una membrana o en un cable de red de superficie anticlástica (Ver figura 1.2). En cualquier punto, dos secciones que se pueden identificar que jalan en ese punto en direcciones opuestas. La aplicación de una presión de carga a cualquier punto tenderá a aumentar la tensión en una dirección y que disminuya en el contrario. Esto obligará a deformar la superficie hasta que las fuerzas axiales de la superficie, equilibren la carga aplicada. La aplicación de una carga de succión aumentará la tensión de la membrana en la otra dirección.



**Fig 1.2** Equilibrio de fuerza axial

## 1.3 Estructura minimalista

Para el mejor entendimiento del término utilizado para denominar a las estructuras de estudio en cuestión, se hace una breve explicación del concepto de estructura minimalista, el cual está enfocado a una corriente de arte moderno.

De acuerdo al diccionario de la Diccionario de la Real Academia Española (2009): *Minimalista*: 1) adj. Perteneciente o relativo al minimalismo; 2. Que sigue las tendencias del minimalismo. Apl. a personas.

*Minimalismo*: (del ingl. *minimal art*). 1) Corriente artística que utiliza elementos mínimos y básicos, como colores puros, formas geométricas simples, tejidos naturales, lenguaje sencillo, etc.

El término minimalista, en su ámbito más general, es referido a cualquier cosa que se haya desnudado a lo esencial, despojada de elementos sobrantes, o que proporciona sólo un esbozo de su estructura, y minimalismo es la tendencia a reducir a lo esencial. Se aplica también a los grupos o individuos que practican el ascetismo y que reducen sus pertenencias físicas y necesidades al mínimo, es también el significado a simplificar todo a lo mínimo. El término "minimal" fue utilizado por primera vez por el filósofo Richard Wolheim (1965), para referirse a las pinturas de Ad Reinhart y a otros objetos de muy alto contenido intelectual pero de bajo contenido formal o de manufactura, como los ready-made de Marcel Duchamp (Wikipedia, 2009). Por tanto, podemos decir que una estructura minimalista es aquella que cuenta sólo con los elementos indispensables para poder funcionar.

## 1.4 Tensegridad

El concepto de Tensegrity = Tensigridad, proviene del nombre derivado de las palabras de tensión + integridad propuesto por R. Buckminster Fuller (1960, 1973), para describir una clase de racimo estructural descubiertas por K. Snelson(1974). En un puro racimo de Tensegridad, todos los componentes estructurales son puntales o ligaduras, y no se conecta directamente los puntales a cualquier otra. Los principios de Tensegridad son populares en dos formas principales. Que pueden ofrecer alta eficiencia estructural para la aplicación de grandes claros. También ofrecen interesantes posibilidades estéticas. En la práctica, las solicitudes de Estructuras de Tensegridad son rara vez puras y se incorporan vigas de anillo y revestimiento de membrana.

Una estructura constituye un sistema de tensegridad si se encuentra en un estado de autoequilibrio estable, formado por elementos que soportan compresión y elementos que soportan tensión. En las estructuras de tensegridad, los elementos sometidos a compresión suelen ser barras, mientras que los elementos sometidos a tensión están formados por cables. El equilibrio entre esfuerzos de ambos tipos de elementos dotan de forma y rigidez a la estructura. Esta clase de construcciones combina amplias posibilidades de diseño junto a gran resistencia, así como ligereza y economía de materiales.



**Fig 1.3** Tensegrity escultura, Sleeping Dragon, 2002-03 Kenneth Snelson

## **1.5 Justificación**

Este tipo de estructuras, debido a la naturaleza de sus materiales brindan soluciones más vistosas y económicas que las estructuras convencionales. De aquí que hoy en día sean cada vez más usadas en muchos países y principalmente en los más avanzados con fines muy diversos (Uehara,2007). Se les encuentra fuera de oficinas de gobierno, en parques públicos, escuelas e incluso en casas particulares. Esta tendencia indica que las estructuras lonarias serán utilizadas cada vez más en un futuro conforme se vayan ampliando sus usos y disminuya sus costos al aumentar su producción.

No existe un método estandarizado que establezca cómo debe realizarse el análisis de este tipo de estructuras (Horta, 2008). Por esto, en el presente trabajo se plantea una metodología para proceder a analizar esta estructura.

Una de las variables más importantes, debido a la naturaleza del fenómeno corresponde al presfuerzo inicial en los cables. Este es un factor primordial en el planteamiento del análisis de una lonaria. Las deformaciones iniciales generan tensiones de importancia en la membrana.

Al mismo tiempo otra de las variables a considerar se refiere a la forma de la estructura, las características mecánicas de los materiales empleados así como la precisión usada en el modelo (Itoh Kohichi,1986).

## **1.6 Objetivo**

El objetivo del presente trabajo consiste en el análisis de una lonaria: sistema compuesto de un subsistema reticular y una membrana, con base a un modelo de “cables equivalentes” presforzados.

## **1.7 Hipótesis**

1. La membrana de una lonaria, (sistema compuesto por membrana, tensores, y perfiles estructurales), puede ser analizada como un sistema de cables “equivalentes” metálicos presforzados.
2. El sistema lonaria se constituye como un sistema presforzado cerrado, y su tratamiento de análisis tiene un carácter no-lineal.

## **1.8 Características generales**

El estudio incluye un análisis exhaustivo de las estructuras tipo lonarias existentes tanto en nuestro país como en el extranjero. Derivado de este análisis se elige una lonaria típica, representativa, que sea aplicable en diversas circunstancias. Se elige una de ellas, de forma básica: paraboloides hiperbólico. La membrana se liga mediante tensores al marco reticular



perimetral. Estructura reticular integrada a una membrana en forma de rombo visto en planta. El análisis incluirá:

- Efectos de viento
- Peso propio, incluyendo posibles efectos por lluvia y/o operarios
- Presfuerzo en la membrana

Se discutirán aspectos relacionados con los resultados que se deriven así como ciertas implicaciones de diseño.

## **1.9 Alcances**

El efecto del viento es propuesto a partir de los reglamentos existentes, sin embargo las estructuras de geometría compleja no se tipifican. Algunos casos particulares como chimeneas son tratados como formas con efectos aerodinámicos complejos además de vorticidad. En otros casos, diversos investigadores han propuesto algunas pautas para el análisis de efecto por viento, generalmente se derivan de estudios experimentales llevados a cabo sobre prototipos o modelos hechos a escala. Las circunstancias particulares de la membrana de nuestro estudio es que no se dispone de datos al respecto, de las presiones provocadas por el viento. Además nuestro estudio no contempla revisión experimental. Por ello el estudio a aplicar es de orden numérico computacional y los efectos de viento, succión o presión sobre la superficie de la membrana se planteara en base a la similitud con formas típicas ingenieriles. Basado en las normas CFE y las NTC del DF.

## **1.10 Aportación**

Establecer una metodología de análisis para una estructura compleja como lo es una lonaria, partiendo de la hipótesis de que podemos analizarla como una estructura equivalente de mayor sencillez.

# Capítulo 2. Antecedentes

## 2.1 Introducción

Las estructuras espaciales, son aquellas estructuras de conformación compleja que más se asemejan a los diseños existentes en la naturaleza, su conformación geométrica imita a las estructuras naturales, tales como: una telaraña, un panal de abejas, una concha de mar, etc. Una lonaria es un caso particular de estructura espacial, es de hecho una combinación de formas y materiales diversos. A diferencia de estructuras tradicionales utilizadas en obra civil para cubrir claros como son los edificios de losas planas, mallas espaciales de conformación plana, salas de usos múltiples con elementos muro-placa, etc., las lonarias suelen utilizarse para cubrir espacios de muy diversos claros, y con una versatilidad excepcional que las hace muy vistosas. Aunque en sus orígenes las lonarias se usaron para cubrir espacios: habitacionales, usos múltiples, exposiciones, etc. con carácter temporal, en la actualidad su uso se ha multiplicado y encuentra cada vez más aceptación incluso para obras que requieren mayor continuidad, es decir, aquellas que pudiesen ser fijas y no temporales. Esto ha sido posible debido al desarrollo de nuevos materiales utilizados como membranas, algunas de ellas son ya poco flexibles, aunque de una gran resistencia; se suelen elaborar de materiales poliméricos de una alta vida útil.

## 2.2 Ingeniería de la tela arquitectónica

El comienzo de las estructuras lonarias como las conocemos ahora, empiezan a finales del siglo diecinueve con los circos viajeros que se trasladaban mucho. Esto se debe en gran medida a que fue hasta esa época que se podía producir industrialmente las telas debido a las mecánicas de hilado.

Existieron circos como el Chapiteau (Shaeffer R.E., 1996), que llegaban a medir alrededor de 50m de diámetro y estaban hechas de lonas tejidas a máquina de lino o de cáñamo. El Chapiteau estaba apoyado cerca de su centro por cuatro postes situados alrededor del anillo del circo. La lona cuelga de éstos para frecuentar los postes rey perimetrales, los cuales permanecen por las cuerdas ancladas en el suelo. Entre el perímetro y los postes, hay otro anillo de los postes reina fijados a 60° a la tierra, su función que es ligeramente pretensar el paño, para disminuir el movimiento y el aleteo superficial. Estas estructuras viajeras ya contaban con dos de las características primarias más importantes de las estructuras modernas de tela: una forma y un pretensado.



**Fig 2.1** Tienda circo “Chapiteau”

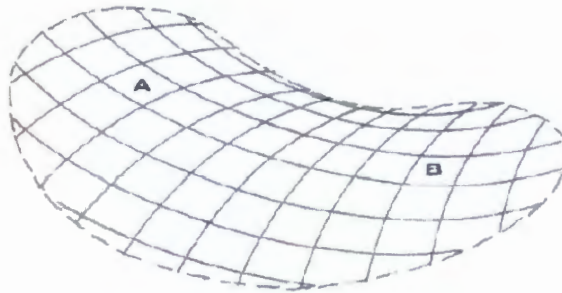
### 2.3 Forma y comportamiento de las estructuras de tela

Las formas y el comportamiento de las estructuras de tela son muy diferentes a las usadas más comúnmente en edificios que son con un “armazón” y tienen un comportamiento elástico lineal.

Los diseñadores de las estructuras de tela se refieren a tres factores estructurales primarios - elección de la forma superficial, los niveles de pretensado y deformación superficial. La consideración tiene también que ser hecha, con respecto al clima interno de los espacios incluidos por las membranas textiles, así como el tipo y el grado particular, de la membrana que se utilizará.

### 2.4 Forma superficial.

La gran mayoría de las estructuras actuales de tela, tienen como base una geometría de superficial anticlástica. Ésta forma es en el cual, un sistema de elementos extensibles de arqueamiento, actúa en la oposición a un sistema similar de elementos que cuelgan. Los dos grupos de elementos representan físicamente las dos direcciones de los hilados de textil, (el warp y weft) (longitudinal y transversal) dentro de la membrana.



**Fig 2.2** Superficie anticlástica

Esta configuración tiene una característica muy importante, en que la superficie en su totalidad es pretensada, sin un cambio significativo a su forma total. También posee claramente las trayectorias de cargas interna y externa. Por ejemplo la carga que baja como la presión de la lluvia o la nieve, es llevada por los hilados en la curvatura que cuelga y la succión exterior del flujo del viento, es llevada por los hilados en la curvatura de arqueamiento.

Las estructuras tensadas tienen formas más parecidas a elementos existentes en la naturaleza debido al equilibrio que se forma debido a las fuerzas tensionantes. Las fuerzas de compresión son resistidas por elementos de mayor volumen que llevan la trayectoria. Las estructuras lonarias están construidas donde la forma y la estructura están íntimamente ligados. Las estructuras tensionadas de membrana, ofrecen una variedad ilimitada de formas y así, una gran libertad en influenciar sus cualidades espaciales.

El proceso de encontrar la forma, inicia definiendo la disposición del área, que se cubrirá tan bien como la disposición de apoyos internos y externos y condiciones de frontera, dentro de las cuales, la superficie de la membrana se supone, encuentran equilibrio. Una distribución de los límites dará lugar a una forma particular de la membrana. El número de formas posibles de la membrana son tan variables, como el número de diversos arreglos del límite y condiciones de apoyo interno. Cada cambio del arreglo, que implican elasticidad o rigidez en las condiciones de frontera, dará lugar a una nueva variación en forma.

La curvatura superficial, proporciona estabilidad estructural y rigidez para las membranas tensionadas. Radios más grandes dan lugar a fuerzas más grandes de la membrana, que también es verdad, sostienen las fuerzas en los bordes, de los límites de los cables. Mientras más curvaturas, más pequeñas son las fuerzas que se desarrollan, como el resultado de cargas aplicadas. Fuerzas pequeñas resultan en estructuras más ligeras. Además, las áreas grandes planas, deben evitarse, puesto que estas áreas pueden ser susceptibles al alboroto inducido por el viento, tan bien como grandes deformaciones, bajo cargas del viento y de la lluvia. La acumulación y estancamiento del agua, tienen que evitarse, como pueden causar un daño o aún, conducir al derrumbamiento de la estructura.

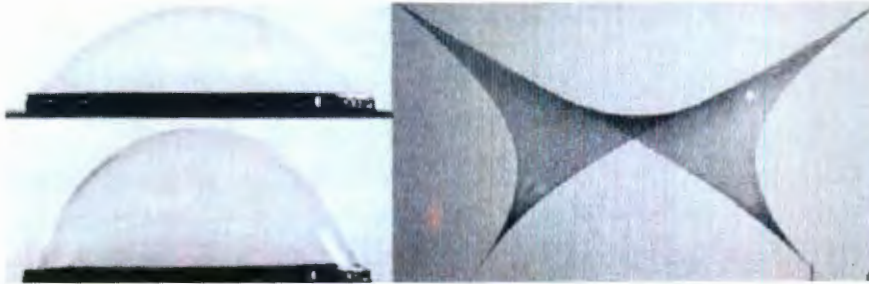
Para los cálculos y cortar los patrones, es necesario hacer uso de modelos tridimensionales para generar tales formas y poder estudiar su aspecto y controlar la forma del espacio cubierto. Cada quien que desee diseñar y construir una estructura de membrana, deben experimentar con métodos de modelación física.

Las modelaciones físicas, ayudan a desarrollar una comprensión de membranas dobles curvadas, que están en un estado de equilibrio tensionante. También ayuda a los diseñadores, para experimentar cualidades del espacio encerrado, incluido de una manera que, nunca es posible estudiar desde dos puntos de vistas dimensionales. El construir de un modelo computacional, como el proceso de modelación física, comienza con la disposición de las condiciones de frontera. El modelo 3D entonces es generado por un proceso numérico iterativo.

Debido a la interdependencia de la forma y de la eficiencia estructural, el punto principal, es la forma de la membrana desarrollada, usando métodos de generación física o de la naturaleza numérica. La lógica y los principios de estructuras mínimas, con sus características de fuerzas internas mínimas, así como del fomento de la reducción de la masa y la energía, deben seguirse para encontrar soluciones sencillas y eficientes.

Generalmente, hay dos diversos tipos de formas, para las estructuras tensionadas de la membrana:

- Formas anticlásticas, o doblemente curvada en forma de montura, que están tensionadas y estabilizadas, debido a un pretensado mecánicamente aplicado, en el plano de la membrana, a lo largo de los límites lineales.
- Formas sinclásticas, o formas esféricas curvadas dobles, que están tensionadas y estabilizadas, por una presión neumática o hidráulica que actúa perpendicular a la superficie de las membranas. Este tipo incluye las estructuras de aire y las inflables.



**Fig 2.3** Izquierda forma sinclástica. Derecha forma anticlástica.

#### **2.4.1 Estructuras Tensionadas de Membranas Anticlásticas**

Es posible estabilizar un elemento en el espacio, usando solamente fuerzas de tensión, a condición de que sea sostenido por un mínimo de cuatro vectores extensibles de la fuerza, que no están actuando en un solo plano y están en equilibrio. Esta estructura principal permite la configuración estable, de las estructuras de superficie extensible. En una superficie doble curvada anticlástica, la suma de toda la curvatura positiva y de toda la negativa es cero.

Las estructuras dobles curvadas de la membrana, son resistentes a las cargas externas, por la forma y no por la masa. Basar la opción de la forma arquitectónica en este principio, permite la cobertura de áreas grandes, con una cantidad mínima de material. La superficie tensionada en sí misma, es el elemento estructural principal, en una estructura de membrana. La superficie se mantiene en equilibrio, por los refuerzos del borde, (tales como correas textiles o cables), que son ajustadas en el espacio, apoyando y suspendiendo elementos.

Dos métodos de diseño básicos, se utilizan para definir la forma del techo de membrana. El primero se basa en el plan libre de apoyos internos y externos y de condiciones de frontera para formar un equilibrio continuo de tensión, para la construcción entera de la estructura. Esto permite la creación de ambientes arquitectónicos únicos. El segundo método utiliza paneles dobles curvados modulares, que son agregados para crear estructuras más grandes.

La estructura anticlástica más básica, es la montura, formada por cuatro puntos, definida alternándose puntos altos y bajos y conectados en línea recta o bordes curvados. El arreglo lleva a los módulos juntos en una formación radial, crea una estructura de estrella, con un punto central bajo o alto. Cuando están arreglados en una forma lineal, tienen una forma basada en la alternación de puntos altos y bajos.

La forma de la membrana también se relaciona, con las dimensiones de la estructura construida. La membrana tensionada necesita el suficiente espacio para desarrollar su curvatura doble. La diferencia necesaria en altura, entre los puntos de apoyo bajos y altos, se relacionan con los claros de una estructura construida y el nivel de las fuerzas de pretensado y reacción de las cargas.

Los claros pequeños requieren diferentes formas, a los claros grandes. Por ejemplo los cuatro puntos simples de la vela, es una de las soluciones más eficientes y ligeras para los claros de 15-20 metros. Esta forma requiere demasiada altura, lo cual acumularía demasiados puntos de cargas grandes en los soportes y perdería su función arquitectónico como protección para claros grandes. Para los claros grandes, la estructura de la membrana necesita tener límites internos lineales, como caballete o lazos que son apoyados por las vigas internas o las estructuras del mástil o de los cuales se suspenden, por apoyos externos. Estructuras de membrana más grandes, se pueden también apoyar en montículos redondeados, que son lo bastante grande en diámetro, en relación con el espacio circundante, para garantizar una forma continua y un flujo de las fuerzas de la membrana.

La solución arquitectónica necesita estar en escala, con la tarea de construirlo en relación a aspectos estructurales, formales y económicos. Siguiendo los principios de estructuras mínimas, el arquitecto y el ingeniero debe encontrar que la solución más simple, es a menudo, la más eficiente.

#### 2.4.1.1 Formas básicas de membrana anticlástica

Hay cuatro tipos genéricos de superficie anticlásticas en uso común: “el hyper”, “el cono”, “la montura” y el “caballete y valle”. La esencia de cada uno, es que están constituidos a partir de cuatro elementos pandeados, con el grado de la deformación dependiente, de la opción de sus condiciones de frontera.



**Fig 2.4** Formas anticlásticas: Hypar, Cono y Montura



**Fig 2.5** Caballete y Valle

## 2.4.2 Estructuras Tensionadas de Membrana Sinclásticas

Las formas sinclásticas muestran las curvaturas primarias en cada punto de su superficie. Las estructuras de membrana sinclásticas están formadas y pretensadas y estabilizadas por una diferencia en fluidos o presión de gas a través del revestimiento de la membrana. Las fuerzas en la membrana, están en proporción directa a la curvatura de la membrana con radios más grande que dan tensiones más grandes. Las estructuras hidrostáticas formadas, son las que tiene un sistema de distribución de cargas mayores en la naturaleza. Estas características pueden ser vistas en el agua que cae, así como en las células vivas. La presión hidrostática aumenta con la altura y crea formas con los radios continuamente que cambian. Por otra parte, las estructuras inflables de aire en la atmósfera natural, puede considerarse que están cargadas uniformemente.

Existe gran belleza en este tipo de estructuras, ya que con base en sus elementos confortantes tiene la capacidad de tomar una infinidad de formas que en ocasiones asemejan estructuras de la naturaleza, las cuales tienen gran resistencia y son estéticas a la vista.

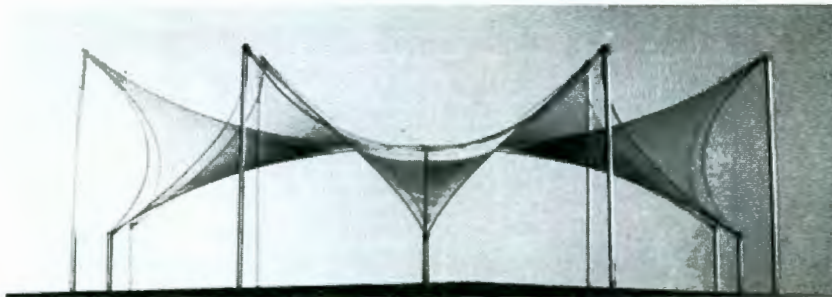


Fig 2.6 Modelo hecho de película de jabón

## 2.5 Pretensado

Pretensar, contribuye considerablemente a la rigidez de una membrana, debido a sus componentes curvados de oposición, que interactúan para evitar las deformaciones severas típicas de plano o de superficies sólo curvadas. Por ejemplo, en la figura 2.2, la deformación de la curvatura que cuelga, debido a las cargas en la zona A, es limitada por las tensiones de arqueamiento en la zona B. Los valores reales de pretensado utilizados en la práctica, representan generalmente una proporción pequeña, de la última fuerza de una membrana. El nivel elegido de pretensado, será normalmente un compromiso - bastante bajo para reducir el trabajo hecho durante la instalación - mientras que suficientemente alto, para mantener un pretensado suficiente, después de las pérdidas, debido a la fluencia del material de la membrana, en un cierto plazo.

Donde las restricciones geométricas se ponen sobre un diseño (tales como requerir el uso de una cubierta plana y por lo tanto, radios más grandes de curvatura) entonces los valores más grandes de pretensado, serán requeridos para controlar el tamaño de la deflexión de la membrana. En el límite donde la superficie llega a ser plana (radio = infinito) la pretensión y la rigidez del material (EA) son los únicos parámetros que controlan la deflexión.

Para muchas estructuras, la misma cantidad de pretensado, se aplica en ambas direcciones de los tejidos textiles. Sin embargo, en caso de que la magnitud de las cargas aplicadas internas y externas sea marcadas diferentes a otra, entonces, puede ser económicamente ventajoso, para determinar la forma de la membrana, tales que un radio más pequeño (ajustado) de curvatura está sujetado a la presión externa más alta y viceversa que un radio más grande (más plano) de curvatura, lleva la presión externa más baja. De esta manera las tensiones máximas de la membrana que resultan estarán de un tamaño similar (Desining Tensil Architecture. 2006).

## **2.6 Deformabilidad**

La deformabilidad es una característica útil e importante de una estructura de tela. Debido a su rigidez superficial relativamente baja, (en plano y hacia fuera del plano), los cambios en la geometría sobre la forma superficial, es la respuesta primaria de una estructura de tela a la carga externamente aplicada juntada con los cambios en la distribución de esfuerzos a través de su superficie.

Además, las deformaciones que se desarrollan dentro del material de la membrana, son varias órdenes de la magnitud más grandes que aquellas en acero, por citar algún ejemplo. Por lo tanto, las estructuras de tela, exhiben desviaciones mucho más grandes y cambios geométricos, bajo las carga de la construcción del armazón ortodoxa. La flexibilidad en los apoyos de una membrana, también agregada a su deformabilidad, que logra una estabilidad total asegurada.

Todo esto tiene el efecto beneficioso de los esfuerzos que no crecen linealmente, con las cargas aplicadas, debido a los cambios geométricos que ocurren en la superficie, en su totalidad. Por ejemplo, el viento que fluye alrededor de una membrana cónica, causa un mástil con extremo preciso, para inclinarse hacia el viento, permitiendo que los cambios a la curvatura superficial en la cara de barlovento, para atenuar la subida de esfuerzos de la membrana en esa zona, pero también con curvaturas de la membrana en el lado de sotavento que actúa para estabilizar el mástil.

Las cargas pesadas localizadas tales como presión del viento en aleros y caballetes, son en efecto apoyadas, por un área mucho más grande, que simplemente el área de contacto de la presión, debido a los cambios en la geometría superficial, dentro de la membrana.

Alentar a la deformación de la superficie de la membrana, es beneficiosa, siempre y cuando, que siga habiendo la superficie deformada, bajo cargas con inclinaciones positivas en todas partes. El peligro inherente de una pendiente plana, es que una acumulación de lluvia o hielo, puede causar una depresión, en la cual, el aguanieve y la lluvia puedan acumular, con la geometría superficial que cambia de anticlásticas a sinclásticas.

## **2.7 Sistema Estructural**

Una particularidad muy importante de las estructuras lonarias es que la membrana que forma los techos cuenta con rigidez única y exclusivamente a la tensión. Así, en una tela tensada, cualquier carga perpendicular a esta producirá una deformación que deformará la superficie, la cual tomará otra forma más eficiente para soportar dicha carga al transmitirla



por tensión a sus hilos. Esto puede entenderse fácilmente si se imagina un cable que tiene ciertas fuerzas y está en equilibrio. En el caso de una lonaria, que es, la extensión tridimensional de un cable, esta se deformará en el caso de cambios de carga para poder soportar mejor las condiciones de carga.

## **2.8 Cualidades de la Membrana Arquitectónica**

Gracias a su sistema constructivo, las membranas tensadas tienen cualidades muy especiales, debido en gran parte a su forma única y la naturaleza de los materiales de membrana. Por estas razones invitan a soluciones arquitectónicas que los sistemas de construcciones convencionales no pueden ofrecer.

### **2.8.1 Ligeras**

Las estructuras tensadas son ligeras en peso, debido a que su estabilidad estructural, resulta de su forma pretensada, más que la masa de los materiales utilizados. En consecuencia, son mucho más ligeras que los edificios estructurales convencionales, que aún ofrecen alta estabilidad.

### **2.8.2 Translucidez**

La translucidez es una de las más amplias apreciadas cualidades de la ingeniería del tejido arquitectónico. De hecho, la translucidez puede proporcionar una cantidad suficiente de luz para la construcción de uso estándar, jugando un papel importante en el fomento de la eficiencia energética. Tales transparencias también ofrecen grandes posibilidades estéticas en los diseños arquitectónicos, mediante el uso de la luz artificial y natural. En la noche, la translucidez de la membrana, puede transformar la estructura en una escultura de luz. La translucidez de las telas ingenieriles, depende del tipo de fibra que se forman en las bases estructurales, así como en el tejido de revestimiento del material y el color. La translucidez de los materiales de la membrana estándar, varía del 10% al 20%, pero también hay materiales disponibles con un 40% de translucidez, mientras que otros son opacos. El nivel de translucidez y el tipo de luz adentro, también puede ser ajustado por el uso de recubrimientos pigmentados o impresiones.

### **2.8.3 Flexibilidad**

Las estructuras de la membrana tensadas no son rígidas, estas cambian su forma bajo la influencia del viento y la lluvia. La geometría de la membrana, responde a las cargas aplicadas por deformación y al hacerlo, desarrollan pequeñas radios en la dirección de la carga y a su vez, encuentra una manera más eficiente para el caso particular de carga. La flexibilidad de las estructuras tensadas, permiten que ocurran grandes desplazamientos sin que se produzcan deformaciones permanentes. El grado de cambio y su respuesta dependerá, de la elasticidad del material y el nivel pretensado utilizado para la estructura. La inteligencia estructural de las estructuras naturales, puede inspirar a los procesos de diseño arquitectónico.

## **2.8.4 Escultural**

Una membrana única tensada de forma doblemente curvada, tiene unas cualidades esculturales muy fuertes. La superficie tensada, se encuentra dentro de sí mismo en equilibrio. Los movimientos hacia arriba y hacia abajo de una membrana de forma anticlástica están equilibrados y es posible la creación de grandes construcciones que parecen flotar sin esfuerzo entre el cielo y la tierra, desafiando la gravedad. Esta es la calidad escultural sensacional, tanto en el exterior como en el interior del edificio. Las membranas tensadas, dan la posibilidad de crear espacios espectaculares y complejos que están en equilibrio dentro de sí mismos. Estas membranas esculturales, dramáticamente cambian su aspecto en el desempeño de luz y sombra durante el cambio de luz natural en condiciones de la luz.

## **2.8.5 Seguridad**

Las estructuras tensadas ligeras son estructuras seguras y diseñadas de acuerdo a las dimensiones de tales códigos nacionales y notas de orientación que existen. Las estructuras ligeras, son particularmente estables en cargas horizontales, como los terremotos. En un caso imprevisto de colapso, las estructuras ligeras tienden a ser menos peligrosas que los sistemas de construcción convencionales, debido a su mucha menor masa. Los riesgos son incluso más pequeños, cuando el diseño de la estructura tensada, garantiza que el apoyo a los elementos rígidos, como mástiles y vigas, no se derrumben en caso de que la membrana se rompa.

## **2.8.6 Características Acústicas**

Hay dos problemas que se deben considerar durante el diseño de las estructuras de tela. Primero, el largo tiempo de la resonancia causada por la carencia de materiales fonoabsorbentes, que da lugar a fuerte ruido de fondo. En segundo lugar, la reflexión enfocada, causada por la geometría del techo formado.

### **2.8.6.1 Predicción Acústica de las Estructuras de la Membrana**

Tradicionalmente dentro de la arquitectura acústica, dos técnicas se utilizan para predecir el comportamiento de la estructura:

- Escala de modelos acústicos
- Predicción Computacional

La escala de modelos es difícil, debido a la falta de materiales de membrana que han sido acústicamente escalados con el fin de utilizar por ejemplo, técnicas de ultrasonido. Predicciones numéricas también puede ser tedioso, debido a la dificultad de conocer la verdadera forma como fue construida la superficie de la membrana – que es de suma importancia para la modelización de su comportamiento - y el número de superficies que deben ser modelados debido a la complejidad de la forma. Hay muchos paquetes de software disponibles para evaluar el comportamiento de estas estructuras, pero los resultados deben ser tratados con cuidado, debido a la serie de hipótesis requeridas para

simplificar el cálculo, el limitado conocimiento de la membrana acústica y la falta de datos fundamentales del material, por ejemplo, los ángulos que dependen de los coeficientes de absorción. Del mismo modo, la acústica debe ser consciente de las limitaciones de medición y de las dificultades de obtener resultados significativos.

Es esencial que cualquier predicción usada en la formulación del diseño pueda ser válida usando, por ejemplo, mediciones “in situ”, una vez que la estructura esté completa. Esto debería permitir a la acústica de diseño para conseguir un mejor entendimiento del complejo comportamiento del recinto.

### **2.8.7 Materiales Resistentes al Fuego**

Todas las membranas de poliéster de revestimientos de PVC, deben pasar por pruebas de fuego retardante, de tal manera que el material se auto-extinguirá rápidamente apenas se elimine la fuente de calor. El desprendimiento ocurre alrededor de los 70 °C y las costuras entre los paneles de la membrana se caen aparte, por encima de los 100 °C. El propio material se funde a unos 250 °C. Una fuente de flama localizada, creara un agujero a través del panel de tejido. Una vez que el agujero se ha retirado fuera del contacto con la fuente de la flama, se auto-extinguirá. Recubrimiento de PVC que contiene aditivos para prevenir la formación de gotas inflamadas. La mayoría de las telas basadas en vidrio se clasifican como materiales no combustibles. Temperaturas de hasta 1000 °C son soportadas sin combustión de la tela y las costuras de una membrana PTFE con revestimiento de vidrio fallan a una temperatura de unos 250 °C.

La elección de un material para un techo de membrana debería de coincidir el requisito impuesto por la carga de incendio y la ocupación del recinto, así como por el riesgo de propagación externa de incendios en el espacio de la membrana. Si es necesario, los requisitos de seguridad contra incendios pueden ser atendidos por el adicionamiento de un forro interno en la membrana, con menor combustibilidad que puede proteger el revestimiento estructural de un fuego interno, junto con la mejora de rendimiento térmico y acústico del espacio.

### **2.8.8 Protección del Clima**

Una de las principales funciones de un techo, es proporcionar refugio y comodidad en las condiciones meteorológicas, tales como: el sol, la lluvia, el viento y la nieve, en función de la zona climática. La elección de la forma de la membrana y el material, deben tener en cuenta todas las condiciones apropiadas a fin de proporcionar un ambiente interno adecuado. Los materiales de las membranas porosas, con una estructura abierta, se pueden utilizar para sombreados. Esto a su vez, puede mantener la temperatura de la superficie al nivel del aire ambiente y evitar la baja radiación de calor. Para la protección de la lluvia y la nieve, la forma deberá permitir un rápido y fácil drenaje de las aguas y la nieve. El encharcamiento de agua de lluvia y grandes acumulaciones de nieve en el techo tienen que ser evitados. Las estructuras de la membrana tensadas, son especialmente susceptibles a este tipo de cargas durante las etapas de construcción, hasta la forma final y el presfuerzo sea establecido. Para mantener el agua de lluvia fuera, los materiales de la membrana y sus

articulaciones tienen que ser cerrados y apretados y los bordes, tienen que ser muy detallados cuidadosamente, para evitar filtraciones de agua en el interior.

### **2.8.9 Movibles y Temporales**

La ligereza de las estructuras tensadas, les da una clara ventaja sobre otras construcciones, cuando se les considera como una intervención reversible en el medio ambiente. Otros dos aspectos importantes son la movilidad y la flexibilidad. El diseño de una estructura que puede ser levantada una y otra vez y en diferentes lugares, es la expresión de una estructura tensada movable. Estas estructuras pueden ser una síntesis de las tiendas de campaña de los nómadas y el asentamiento permanente. La ligereza y la flexibilidad del material permiten a estas estructuras, el ser cargadas y desplegadas fácil y aún rápidamente, ocupar un modesto volumen, cuando no esté en uso. Estas características son útiles, para las estructuras temporales y movibles y son esenciales en el caso de catástrofes y situaciones de emergencia, cuando un refugio se requiere para un gran número de personas en poco tiempo.

### **2.8.10 Convertibles y Adaptables**

Las estructuras convertibles, pueden considerarse como sistemas de adaptación hechos por el hombre, el cual, al igual que muchos organismos naturales, cambian de acuerdo a la necesidad. Son flexibles y adaptables en sus arreglos espaciales y responden a las variaciones climáticas. Este diseño de enfoque, conduce automáticamente a la posibilidad del ahorro de energía, mediante el control de luz natural y de temperatura interior. La flexibilidad de las estructuras convertibles, hacen posible el cambio de espacios arquitectónicos, ya que el espacio puede ser experimentado de una forma más abierta o protegida. El movimiento elegante de un bien diseñado techo convertible, da una sensación de armonía entre el hombre y la naturaleza. Es como un acto de creación, en última instancia, la ligereza y la movilidad, la síntesis del concepto de la casa sin construcción, disponible sólo cuando y donde sea necesario.

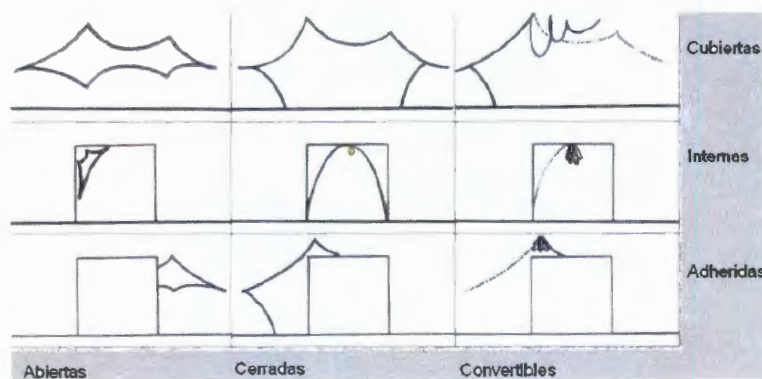
Las condiciones climáticas de la mezquita de Medina, es mejorada por estas estructuras retráctiles, que permiten el control de la energía equilibrada entre la construcción y el ambiente. En el verano, la sombrilla se abre durante el día, evitando la radiación directa del sol, y cerrado por la noche, para exponer a las personas y a las construcciones al enfriamiento de la noche. En invierno, la sombrilla permanece cerrada durante el día, para recoger el calor de la radiación del sol, que se mantiene más tiempo en el interior de la Mezquita por la apertura de la misma sombrilla, durante el frío invierno de noche.

## **2.9 Clasificación**

Presentamos una clasificación esquemática para mostrar la gama de posibilidades que existen en las estructuras tensionadas de la actualidad. Las membranas tensionadas se pueden clasificar, de acuerdo a diferentes aspectos, tales como la función de la construcción, la función de la membrana tensionada (transmisión de la luz del día, la protección de la lluvia, protección del sol, definición de elementos en el espacio...), el espacio, si es convertible o no, el grado de cerramiento, o la duración del uso.

Los siguientes ejemplos, ilustran las diferentes cualidades de los textiles y las hojas recubiertas - por ejemplo, translucidez, ligeras - y la variedad de la arquitectura que se puede crear - por ejemplo, formas naturales, de formas regulares, abiertas o cerradas. Proyectos con una apariencia contrastante, sugieren una casi interminable variedad de posibilidades. La manipulación de la estructura, la forma y de múltiples capas, puede utilizarse para reforzar objetivos específicos de arquitectura. Los textiles de Alta tecnología se pueden utilizar para las nuevas construcciones, así como en la remodelación y ampliaciones de construcciones existentes. En el siguiente esquema de las columnas de izquierda a derecha, se muestran construcciones abiertas, cerradas y cubiertas convertibles. Las tres filas, muestran tejidos técnicos, que actúan para tres diferentes propósitos - cubiertas, aplicaciones internas o construcciones conectadas a un edificio.

La clasificación de las membranas sirve principalmente para tener una óptica más clara de las posibilidades que existen antes de comenzar a diseñar un proyecto.



**Fig 2.7** Clasificación de lonarias

## 2.9.1 Abiertas

La mayoría de las aplicaciones a las estructuras tensionadas, pertenecen a la categoría de estructuras abiertas de membrana, siempre y cuando, protejan de la lluvia y del sol. La membrana proporciona protección al clima, mientras mantiene una sensación de aire libre.

### 2.9.1.1 Abiertas y Cubiertas

Una membrana abierta, cubre un área, un espacio abierto, o una construcción. Una variedad de configuraciones, pueden ser usadas en forma convencional de carpas, tiendas de armazón y también en llamativos monumentos. Para algunas funciones, los apoyos internos, no necesariamente crean molestias. Los techos de las membranas tensionadas, puede crear grandes claros libres, de ahí, su utilización en cubrir los asientos en gradas de importantes estadios. La sensación de aire libre y la impresión de ligereza, se ven reforzadas por la aparente simplicidad de las estructuras del techo, así como por la transparencia de los materiales y la apertura entre el techo y las tribunas.



**Fig 2.8** Tienda de asamblea, Malasya (Abierta y cubierta)

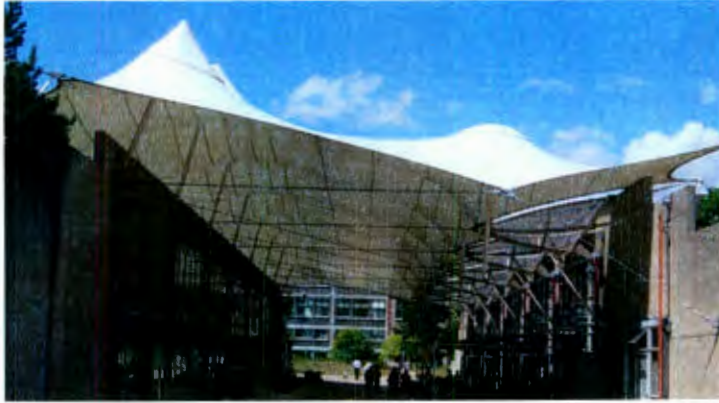
Manejar las sombras para techos transparentes o fachadas, pueden ser utilizados internamente y externamente. Dentro de ellos, pueden aminorar la calefacción de la masa de un edificio y prevenir el deslumbramiento del sol directo. Vidrio y revestimiento de policarbonato, proporciona excelentes transparencias y permite la alta transmisión de luz solar. El rendimiento acústico del espacio, puede ser mejorado, mediante una combinación de paneles textiles sinclásticos colocados o un sándwich (capa en el tope y en la parte de abajo) de dos capas anticlásticas que contienen teja acústica.



**Fig 2.9** Scott Wilson, Basingstoke, UK (abierta e interna)

### **2.9.1.2 Abiertas y Adheridas**

Techos abiertos adheridos a edificios, pueden crear protección privada, así como semi-espacios públicos. Ellos son principalmente, la definición de espacio en construcciones. Schlumberger en Montrouge en París, es un proyecto en el cual, un área industrial fue reconstruida. Un Parque y una ruta peatonal, situados en el centro. Un toldo de cubierta textil, protege esta área de la lluvia y el sol, a la vez, de ser una parte integrante del diseño del paisaje.



**Fig 2.10** Schlumberger en Motrouge. París, Francia (abierta y adherida)

## 2.9.2 Cerradas

El revestimiento externo, da protección contra el clima extremo (viento, lluvia, sol) mientras se crea un clima interno, con menor variación de temperaturas extremas. Aplicaciones de múltiples capas, mejoran el aislamiento térmico y acústico, aunque disminuye la transmisión de luz.

### 2.9.2.1 Cerradas y Cubiertas

Un revestimiento de muy alta transparencia, es necesario, para obtener un invernadero, mientras que una opaca, de múltiples capas, acústica y térmicamente con aislamiento envolvente, es apropiado para una sala de cine. Para una construcción temporal, que tiene que ser levantado y desmantelado regularmente, tanto el peso y el tamaño de los componentes, tienen que ser limitados.



**Fig 2.11** Lugar para encuentros. Bruselas, Bélgica (cerrada y cubierta)

Adicionando un segundo revestimiento al interior, puede ser una solución, si la construcción principal, no cumple los criterios específicos, para aislamiento térmico, acústico o estético. Entonces la piel actúa, como una especie de revestimiento. Este fue el caso de la reconversión de un edificio industrial, a un bloque de oficinas. El Interior del

revestimiento, que consiste en dos capas de papel transparente, mejora la comodidad interna y la acústica sin reducción la luz del día.



**Fig 2.12** Edificio de Oficinas. Miunich, Alemania (internas y cerradas)

Entre los techos de membrana o en la parte superior de los edificios, son a menudo utilizados para proteger las áreas, en la que el nivel de comodidad, para la temperatura interna, es menos exigente y la luz natural es una ventaja.

Los mástiles en volado, apoyos a los techos de membrana translúcida, del centro Múlti deportivo Amagi, refuerzan la impresión de luz, así como las características de peso ligero del techo. El techo de tensegridad, fue construido sin andamios. Se ensambló previamente en el piso y conectado a un anillo temporal para el levantamiento.

La combinación de vidrio y revestimiento de tejido, se utiliza con frecuencia, para permitir la penetración de la luz directa del sol, así como la prevención del deslumbramiento y el sobrecalentamiento.



**Fig 2.13** Centro multideportivo Amagi, ciudad de Amagi Yugashima, Japón (cerrada y cubierta)



### 2.9.3 Convertibles

Son estructuras adaptables, construidas de tal manera que su forma puede ser alterada con la frecuencia necesaria en un tiempo relativamente corto. Las técnicas textiles son especialmente adecuadas para estructuras convertibles debido a sus propiedades específicas. Proporcionan soluciones que no pueden ser ofrecidos por otros métodos.

#### 2.9.3.1 Convertibles y cubiertas

Un revestimiento externo adaptable, pueden interactuar con las condiciones climáticas locales, en función de la temporada, así como con la variación de día y de la noche.

La presión interna en el revestimiento de doble capa, puede utilizarse para controlar la estructura plegable, de tal forma, que cuando la cubierta esté cerrada, la doble capa es estabiliza, debido a la presión interna positiva.

El techo del pabellón de los Venezolanos, en la Exposición Mundial 2000 (Hannover) fue una grande flor artificial, con pétalos que se abrían y cerraban de acuerdo a las condiciones climáticas.

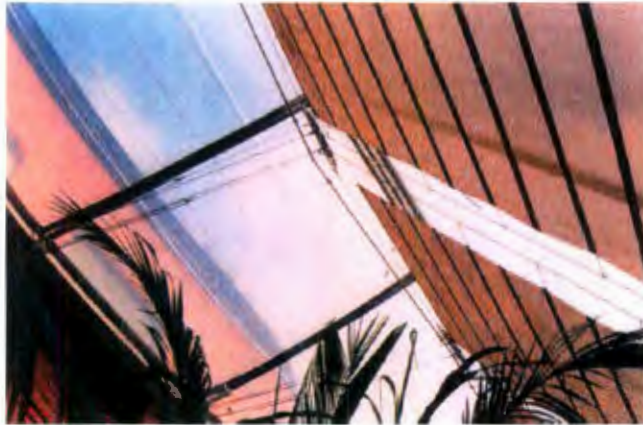


**Fig 2.14** Pabellón de los Venezolanos

#### 2.9.3.2 Convertibles e internas

Revestimiento adaptables internos, puede tener diferentes funciones. Se pueden utilizar para regular la entrada de luz y también para proteger contra mucha luz directa del sol. Ellos pueden ser utilizados, como una persiana interna translúcida y pueden servir como un dispositivo sombreado, para proteger la privacidad y evitar el deslumbramiento al mismo tiempo.

Las pantallas en Bristol, Reino Unido, incluye una casa botánica, donde el techo se crea mediante una estructura de red de cable y transluciendo amortiguadores ETFE. El dispositivo de sombreado retráctil está instalado en el interior.



**Fig 2.15** Las pantallas en Bristol, Reino Unido (interna y convertible)

### 2.9.3.3 Convertibles y adheridas

Los techos adaptables de membrana entre, adheridos o en la parte superior de los edificios, tienen las mismas funciones como estructuras no adaptables o no convertibles. Permiten un espacio para ser abiertas o cerradas.

Uno de los más conocidos ejemplos de techo retráctil, es aquel sobre el teatro al aire libre en la ruina colegiata de Bad Hersfeld, diseñado en 1968 por Frei Otto. Cuando el clima de verano es bueno, la membrana se pliega alrededor del mástil externo y cuando llueve, puede ser desplegado en unos minutos.



**Fig 2.16** Ruinas de la iglesia de Bad Hersfeld, Alemania

Cada combinación debe ser usada para fines específicos, ya que las ventajas de una combinación en una situación pueden resultar contraproducentes en cierto momento

## 2.10 Estructuras de apoyo de la membrana

Las estructuras de apoyo de membrana son todas aquellas que están en contacto con la membrana y le dan soporte. Es muy importante el diseño de estas estructuras, ya que para las lonarias la forma y las condiciones de frontera están íntimamente ligadas. Es debido a las condiciones de frontera las formas que puede adoptar la membrana en configuraciones de diferentes cargas.

Existen diversos tipos de estructuras de apoyo de membrana, siendo las más comunes los mástiles internos y externos, los bordes rígidos o flexibles, las placas base y los anclajes.

### 2.10.1 Mástiles externos e internos

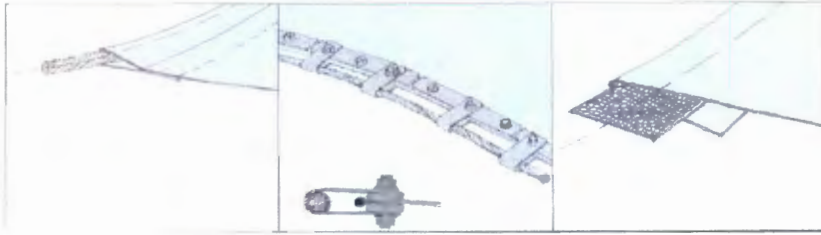
Son los elementos que normalmente tienen más volumen debido a que ellos llevan las cargas a compresión. Estos mástiles están orientados en dirección de la mediatriz entre las tensiones resultantes de la membrana y los cables con los que se auxilia. En caso que se quiera tener un claro libre de obstáculos los mástiles externos son una opción adecuada y viable para lograrlo.



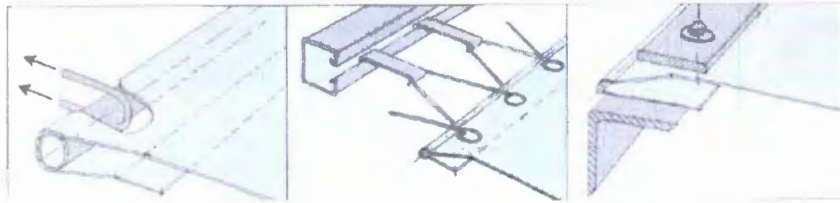
Fig 2.17 Mástil interno y externos

### 2.10.2 Bordes

Hay bordes flexibles, con cables de alta resistencia que pueden ser de acero o de fibra de vidrio. En el caso de la fibra de vidrio se puede tener mayores resistencias pero se deben de proteger de los rayos UV que degradan el material. Ejemplos de bordes flexibles y rígidos son los siguientes.



**Fig 2.19 Bordes flexibles**

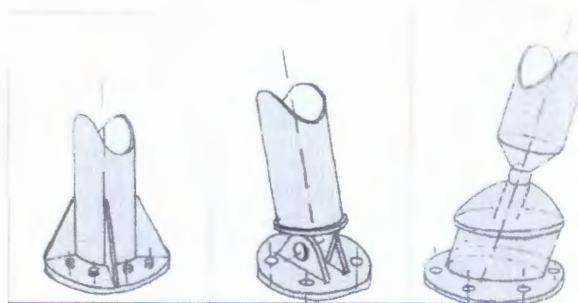


**Fig 2.19 Bordes rígidos**

Los elementos que unen las membranas con la cimentación son las placas base y los anclajes. Estos pueden variar, dependiendo qué grado de libertad queremos que tenga.

### 2.10.2.1 Placas base

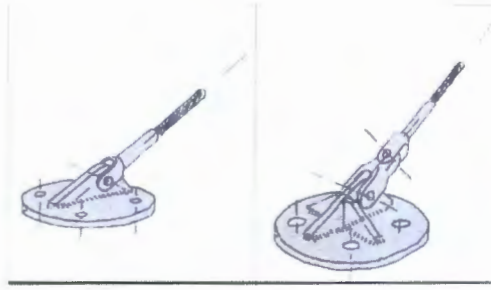
Las placas base son las que reciben las compresiones que vienen de los mástiles y estas pueden estar empotradas, articuladas en un sentido o tener una rótula, dependiendo de qué movilidad se le quiera dar.



**Fig 2.20 Placas base**

### 2.10.2.2 Anclajes

Son los que transmiten las tensiones de los cables hacia alguna estructura de apoyo, como pueden ser paredes o a la misma cimentación. Pueden existir con rotaciones en uno o dos sentidos.



**Fig 2.21 Anclajes**

## 2.11 Material

### 2.11.1 Una distinción del concepto de construcción

Construcciones convencionales son distinguidas básicamente por el material usado. Uno puede escoger tener una construcción de madera o de concreto, así implícitamente escogiendo una construcción principal. Esto es ligeramente diferente con una estructura de membrana debido a que hay numerosos materiales que pueden ser aplicados como un material membrana cuando la construcción principal sigue siendo la misma. Así, a diferencia de las construcciones convencionales, las estructuras de membrana son distinguidas sobre las bases de su concepto estructural.

La membrana principal es, sin embargo, sólo una de las características de las estructuras de membrana. Buscamos una forma estable bajo cargas externas. Si nosotros hacemos una cubierta colgante de bajo peso (con curvatura sencilla), cubriendo 20 metros, esto ciertamente se ocupará de carga externa a través de la membrana principal. Sin embargo, las deformaciones serán inaceptables. Esto es porque las estructuras de membrana mayoritariamente tienen una forma de doble curvatura. Esto disminuye las deflexiones de la membrana.

Pero, ser capaces de hacer una forma de doble curvatura de hojas planas de material, el material debe permitir deformación para considerable forma. Así, dos características estructurales (membrana principal y doble curvatura) determinan las dos propiedades principales del material de membrana:

- El material de membrana debe sólo ser capaz de transmitir fuerzas de tensión, y
- El material de membrana debe ser capaz de permitir deformación para la forma.

Esto es claro porque, por ejemplo, hojas delgadas de metal no son adecuadas para estructuras de membrana. Esto es porque ellas sólo permiten deformaciones para formas bajo una muy alta carga.

Normalmente un material tejido o una lámina es usada. El uso de lámina puede ser visto como relativamente un nuevo desarrollo.. Esto explica porque las estructuras de membrana son también comúnmente llamadas estructuras de tela. Material tejido es usado para estructuras sinclásticas y anticlásticas. Mientras que láminas son mayormente usadas para estructuras sinclásticas, principalmente para cojines inflados con aire.

### 2.11.2 El material tela

El material tela consiste de hilos tejidos con un recubrimiento aplicado en ambos lados. Primero los hilos son tratados, seguidos de métodos de tejido. Después los recubrimientos son colocados.

### 2.11.3 Hilos

Los hilos son constituidos de fibras. Hay fibras naturales y fibras químicas. Las fibras naturales tienen una longitud restringida y *están en dirección de los filamentos*. Estas son las llamadas fibras hiladas. Fibras químicas tienen una teóricamente interminable longitud y son llamados filamentos. La sección transversal de las fibras naturales mide alrededor de 0.1mm, cuando las fibras químicas pueden tener secciones transversales más pequeñas. La forma en de la sección transversal varía para fibras naturales pero pueden tener cualquier forma para las fibras químicas. Para estructuras de membrana es mejor tener un hilado con una sección transversal circular. Las propiedades mecánicas de los materiales en la industria de la construcción son normalmente especificadas en N/mm<sup>2</sup>. En técnicas textiles esto no es común porque no es fácil de determinar la sección transversal de la fibra ya que es muy pequeña. Por tanto es usual determinar el peso de una fibra con cierta longitud. Cuando la *masa específica* de una fibra es conocida, es posible determinar un rango de sección transversal del material.

La materia prima, o como hilar-hilo, se basa en un número determinado de filamentos de longitud infinita de pequeño diámetro (entre 3 y 25 micras). Dos hilos, o más, pueden ser ensamblados girándolos con el fin de obtener un hilo de mayor resistencia.

Los hilos son obtenidos por extrusión de hilado de fundir los materiales (vidrio, poliéster) o de una solución como las aramidias.

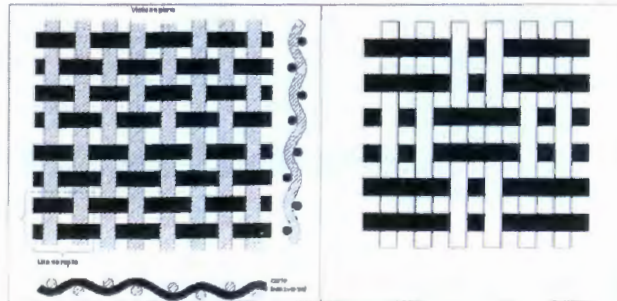
La definición básica de un hilo se compone de:

- a) Número de filamentos elementales
- b) La densidad lineal o contar en tex (g/km), dtex o denier (g/9000m)
- c) El diámetro del filamento
- d) Número de giros/metro, en dirección S o Z (S es girar a la izquierda y Z girar los hilos al lado derecho dentro de una hélice)
- e) El tratamiento de acabado.

### 2.11.4 Composición del material base

Tela que es normalmente usada para estructuras de membrana es construido a cabo de un tejido estructural *base material*, a los que una cubierta es aplicada en ambos lados para protegerla del agua y contaminantes, el llamado revestimiento. Hay varios modos de establecer un tejido coherente. El método básico de tejer es llamado tejido canasta, donde los hilos weft pasan los hilos warp alternadamente por encima y debajo. Hay muchas variedades posibles, como pasar tres hilos warp debajo y uno arriba. Para hacer esto, muchos tipos de patrones ocurren como es el caso de la carpeta industrial. Pero para uso

industrial sólo el “lazo canasta” y “Panama lazo” son usados para membranas estructurales (imagen). Es también usual decir 2\*2 Panama o 3\*3 Panama que significa que la operación de tejido se hace con, respectivamente, con dos y tres hilos a la vez. El tejido Panamá tiene un mejor comportamiento mecánico que el tejido canasta por los múltiples tejidos usados. Aunque es de uso poco común, la indicación 12\*12 Panama o 9\*9 Panama no dicen mucho a cerca de la fuerza del material. Podríamos tener más hilos por cm, pero cuando ellos no tienen una alta resistencia, el tejido resultante no es muy fuerte.



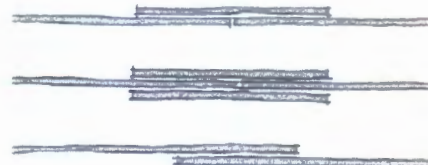
**Fig 2.22** Patrones de tejido sencillo

**2.11.5 Costuras**

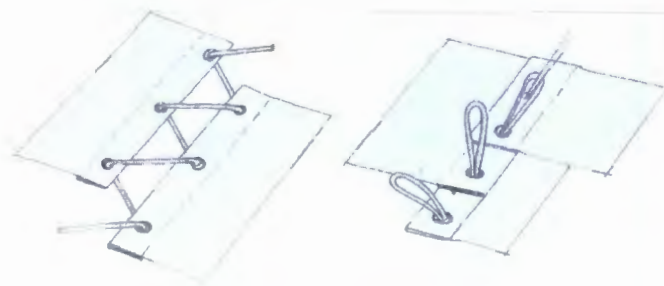
Parte importante de la construcción de las lonarias es la unión de los tramos de lona que formarán la membrana. Puede ser que los extremos sean cosidos, fundidos o combinados. En todos los casos se necesita de maquinaria y personal especializados en dicha tarea.



**Fig 2.23** Costura engrapada



**Fig 2.24** Costuras soldadas



**Fig 2.25** Costuras encajadas

También los bordes juegan un papel importante en la estabilidad de la estructura, ya que es una condición de frontera y por lo tanto repercuten enormemente en la forma de la membrana y en sus formas subsiguientes en deformaciones por cargas.

### **2.11.6 Recubrimientos**

Los recubrimientos son la parte de la lona que le da su acabado y estos son colocados en la lona en forma de pasta. Son sustancias químicas específicas que dan pigmento, translucidez y pueden retardar incendios.

### **2.12 Cargas de diseño**

En lo que respecta a las cargas de diseño, encontramos el pretensado que es natural en estructuras de este tipo y deberá tomarse en cuenta en todos los casos de análisis. El pretensado debe ser suficiente para que efectos como el flujo plástico de los materiales no afecte la estabilidad de la estructura a largo plazo.

El peso propio de una lonaria (de la parte de la membrana) varía desde 0.7 a 2 kg/m<sup>2</sup>, no afecta en la decisión de la forma, pero también debe incluirse en todos los casos de análisis.

El viento es el caso crítico en estructuras lonarias, ya que su poca masa y gran área producen fuertes presiones y subpresiones que se analizan como cargas estáticas modificadas por coeficientes de presión que deben ser considerados variables debido a la modificación de la geometría de la forma a causa del viento.

Los esfuerzos que pueden provocar los efectos de la temperatura son muy pequeños en comparación con las otras estructuras rígidas. Estos efectos deben considerarse más bien en las redes de los cables que en las lonas.

Tomando en cuenta las grandes deflexiones de la estructura de membrana, el análisis tiene que ser hecho usando cargas sin factor. Es muy importante que los resultados de las combinaciones de cargas, sean encontradas al adicionar cargas y luego analizarlas, un poco de análisis de cada carga separadamente y luego adicionando los resultados.

El pretensado y peso propio de las cargas, deben ser parte de todos los casos de cargas. Como el peso propio de la membrana, necesita ser reducido para los casos de supresión del viento, ya que es insignificante.

Ejemplos de casos de carga a ser considerados:

- a) Peso propio + pretensión
- b) Peso propio + pretensión + lluvia
- c) Peso propio + pretensión + viento
- d) Peso propio + pretensión + viento (Carga baja) + lluvia
- e) Etc.



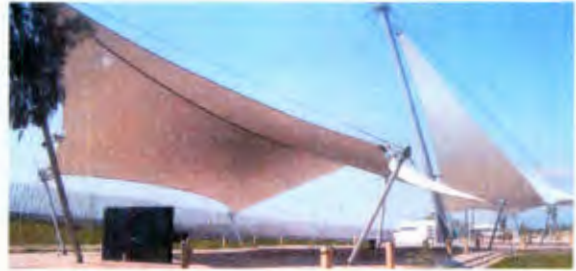
Para las combinaciones donde se incluyen múltiples cargas vivas impuestas (ej. Viento hacia abajo + lluvia) una de las cargas aplicadas debe razonablemente ser reducida.

### 2.13 Estructuras Lonarias en México

Existen diversas lonarias construidas en México, por ejemplo:



**Fig 2.26** Soccer City, Aguascalientes, Ags.



**Fig 2.27** Plza de los artistas, Celaya, Gto



**Fig 2.28** Plaza Veleros



**Fig 2.29** P&G Ciudad de México

#### 2.13.1 Estructuras lonarias en Querétaro



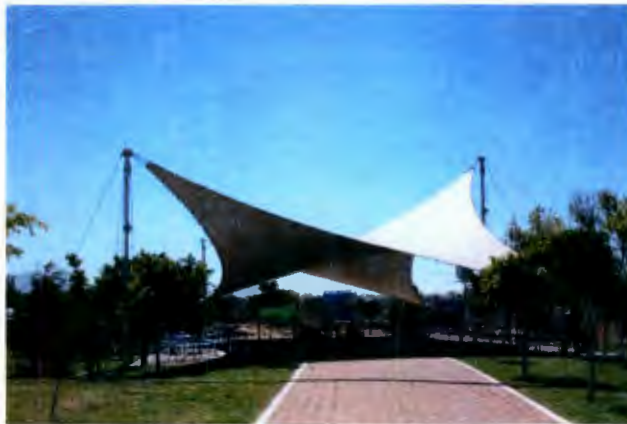
**Fig 2.30** Centro de rehabilitación infantil (CRIQ)



**Fig 2.31** Restaurant “El Caserio”



**Fig 2.32** Grupo Uehara. Kiosco Minimalista. Parque Alfalfares  
Estructura minimalista y tensegrity



**Fig 2.33** Tecnológico de Monterrey



**Fig 2.34** Plaza Maravillas

## 2.14 Sobre la lonaria de estudio

En este trabajo vamos a estar tratando con una estructura lonaria de forma paraboloides hiperbólico (Hypar) y es llamada así debido a que su geometría está determinada por las ecuaciones que producen dicha forma.

Es interesante en varios aspectos esta forma, ya que es la que tiene el menor número de puntos de apoyo (siendo estos cuatro). Este es el menor número de puntos de apoyos que pueden tenerse, ya que de otro modo no podría ser producida la doble curvatura.



**Fig 2.35** Paraboloides Hiperbólico. Facultad de Ingeniería. UAQ



**Fig 2.36** Forma Básica de Hypar a partir de un paraboloides hiperbólico



**2.37** Travis Perkins, UK

Para nuestro caso de estudio existe una particularidad en lo que respecta a los apoyos. Comúnmente, para la forma hyper los apoyos más rígidos son puntuales, y a estos les transmiten las cargas por medio de cables. Estamos proponiendo que en vez de utilizar cables que no presentan rigidez a la flexión se utilicen tubos perimetrales. Esto con el propósito de evaluar los efectos de normal, cortante, torsión y flexión que se pudieran inducir a los apoyos por medio de una membrana trabajando a tensión. La forma de lonaria que más comúnmente tiene tubos perimetrales rígidos es la de “barrel” (o silla de montar).



**Fig 2.38** Kensington Prep School, London, UK



**Fig 2.39** BIC, Newark, UK

# Capítulo 3. Metodología

## 3.1 Introducción

Las formas espaciales simulan con mayor naturalidad y eficiencia los diseños propios de la naturaleza, diseños que están a nuestro alcance en todo momento pero por falta de observación, el ser humano no lo ha asumido plenamente ni lo aplica con suficiencia para su hábitat. Estructuras naturales nos proporcionan ejemplos únicos de rigidez estructural sin perder la belleza de sus formas. Algunas formas estructurales planteadas por el hombre se han desarrollado tratando de reproducir a las estructuras naturales, su conformación geométrica imita la forma de una telaraña, o bien de un panal de abejas, la forma de una concha de mar, etc. El resultado es una estructura artificial de elementos espaciales cuya forma proporciona por si sola una gran rigidez logrando disminuir significativamente su peso. Nuestro planteamiento corresponde a una estructura minimalista. Estas estructuras disponen de un peso mínimo, y tienen la capacidad de resistir cargas bajo un esquema de racionalidad y eficiencia (Sánchez Casanova, 2007).

El estudio aquí abordado se basa en una estructura espacial que tiene un gran número de variables que afectan cada una de cierta manera y, en conjunto, al resultado final de nuestra propuesta. Algunas variables son: la forma de nuestra estructura, el material empleado en la membrana y en los tubos perimetrales, el presfuerzo y el grado de exactitud con el que estemos trabajando. En este tipo de estructuras, dichas variables conducen de manera natural a un sistema estructural de pesos y esfuerzos mínimos. No podemos abordar todas las variables existentes en el fenómeno, ya que esto sería un trabajo excesivamente abundante en datos y desvirtuaría la intención original de observar el comportamiento de la estructura en su parte más compleja e interesante: la membrana.

Las características de nuestra estructura de estudio son muy particulares, ya que la membrana toma la forma de una montura (*hypar*; que normalmente usa bordes flexibles) que está acoplada con un tubo perimetral de acero (que normalmente es usado en las formas de *bandshell*) lo que finalmente provoca una interacción compleja en el sistema en conjunto; es decir, los esfuerzos en un elemento estructural dependen de los esfuerzos ocurientes en cada uno de los componentes del sistema en conjunto. El estudio se desarrollará numéricamente utilizando el programa Ansys (versión 10.0), utilizando un sistema de solución no lineal para la membrana.

## 3.2 Consideraciones sobre los modelos

Para los problemas que tratamos en ingeniería, la totalidad de los resultados que obtenemos en nuestros cálculos, ya sea a mano o en computadora, son sólo aproximaciones a la respuesta real buscada. Esto se debe a que resolvemos modelos, los cuales no son nuestro problema real.

En cada problema en particular, pueden existir una gran cantidad de variables que afectan el comportamiento del fenómeno, las cuales hacen imposibles tener un modelo que resuelva

reflejar fielmente los resultados de todos los posibles efectos. Esto, nos lleva no a buscar que el modelo sea exacto, sino que se aproxime lo más posible. Nuestras soluciones serán más exactas dependiendo de la fidelidad con la que el modelo represente el fenómeno físico. Por lo tanto un modelo es sólo una representación del fenómeno real.

Por ejemplo, para el método de pendiente deflexión en vigas: resolvemos vigas con cargas puntuales y/o uniformes, obtenemos los diagramas de fuerzas cortantes, momentos flexionantes, pendientes y deflexiones en cada punto. Antes de aceptar estos resultados como absolutos debemos tomar en cuenta ciertas consideraciones: Estamos haciendo uso de la teoría de elasticidad lineal, la cual tiene sus limitaciones. Esta teoría considera que las secciones transversales se mantienen constantes desde el principio y luego de colocadas las cargas, siendo que en la realidad la sección se deforma. Simulamos una carga concentrada definida en un único punto, cuando en la realidad todas las cargas se transmiten por medio de una superficie común entre nuestro elemento resistente (tracciones de superficie). Con esto nos damos cuenta de que ya habrá una diferencia entre nuestro modelo y la realidad. Ahora, si analizamos que las fuerzas debidas al peso de los elementos los simulamos como una carga uniformemente distribuida y en la realidad está distribuida en toda su masa.

Como puede observarse, existen muchas variables que van separando a nuestro modelo de la realidad, pero no debemos alarmarnos por esto. Finalmente lo que busca un ingeniero es encontrar soluciones que resuelvan un problema real; y en la realidad, dichas soluciones deben obtenerse rápido. De aquí que optemos por buscar soluciones sub-óptimas, que son más factibles que las óptimas debido a que son, o más baratas, o se llega a ellas en un menor tiempo y ofrecen una buena solución a nuestro problema.

### 3.3 Aspectos generales del proyecto

Para obtener la forma de nuestra estructura partimos de la ecuación de un paraboloides hiperbólico:

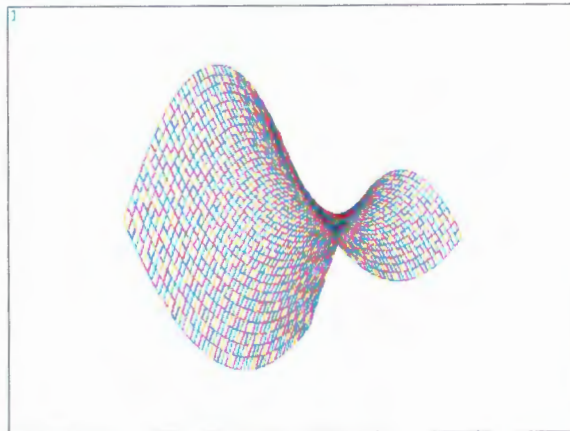
$$\frac{X^2}{a^2} - \frac{Y^2}{b^2} = 2cZ \quad (3.1)$$

Y asignando valores para que obtengamos el largo ancho y las dos Alturas (del punto más bajo al centro y del centro al punto más alto) calculamos los coeficientes y luego vamos dando valores a X y Z y calculando la altura en Y:



Fig 3.1 Nodos de un paraboloides hiperbólico

Enseguida hacemos un mallado en ambas direcciones



**Fig 3.2** Cables haciendo la forma del paraboloido hiperbólico

Este paraboloido hiperbólico lo cortamos en forma de rombo visto en planta, a cada espacio la volvemos un área y así obtenemos nuestra forma final.

Realizaremos el análisis de la siguiente estructura:



**Fig 3.3** Estructura propuesta

Conforme a la literatura existente, no existe un método estandarizado que nos indique un procedimiento universal de análisis, por lo tanto, hay una gran variedad de métodos aplicables a este respecto.

Nuestra propuesta, consiste en considerar la membrana como un sistema de cables equivalentes. Esta propuesta resulta viable debido a la naturaleza del material de membrana. El hilado que le da la resistencia a la membrana lleva direcciones bien definidas además de que estas direcciones se disponen de manera ortogonal. Tomemos franjas unitarias en el sentido de los hilos: podemos modelar a todos los elementos que trabajan en una franja unitaria como un único cable con las propiedades equivalentes de toda la franja en dicho sentido. Así cuando tengamos los esfuerzos que incurren en éste elemento cable

no debemos perder de vista que son los esfuerzos que tendría la franja unitaria que hemos seleccionado. De esta manera, nuestro modelo discreto sería el siguiente:



**Fig 3.4** Conformación reticular de la membrana

Un aspecto trascendental de la modelación es cómo proponemos las cargas. Siendo una lonaria, las cargas que regirán el diseño son las del viento. El viento es un fenómeno muy complejo, ya que es dinámico, variable. Existen efectos en el viento que son muy importantes, como los vórtices que se generan al pasar por la superficie, o si pega en la cara de barlovento o sotavento, las ráfagas, etc. Hasta cierto punto podemos entender cómo es la interacción del viento con una estructura común (las construcciones convencionales de concreto reforzado o acero), pero debido a las características de las estructuras lonarias y principalmente debido a su forma, se hace imposible tener con un buen grado de exactitud cómo sería la interacción del viento con la estructura durante toda su vida útil.

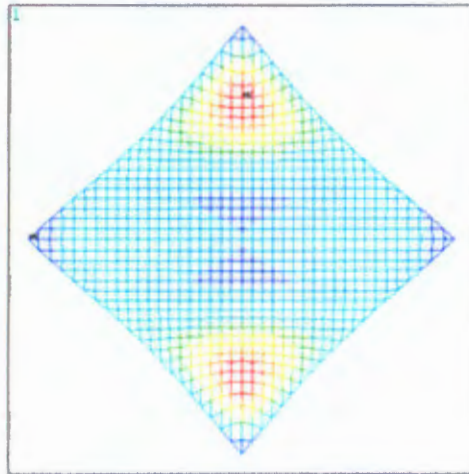
Si quisiéramos hacer un estudio exhaustivo para conocer el comportamiento de la estructura bajo la influencia del viento de diseño, primero deberíamos hacer un modelo físico y someterlo a una prueba de túnel de viento (lo cual manda el reglamento para estructuras de este tipo). Esto nos daría una mejor idea del comportamiento de la estructura bajo estas condiciones, pero finalmente son condiciones controladas.

Para un correcto estudio, deberíamos contar con datos de historia-tiempo del viento en el sitio donde fuera a colocarse la estructura, pero estos datos son muy difíciles de obtener; si no es porque no existen, es porque cuesta mucho tiempo y dinero el poder obtenerlos. Así que lo que podemos hacer es, tomar todo lo que podamos de información que encontremos sobre el tema en reglamentos, manuales y usar factores de seguridad amplios debido a las incertidumbres que genera el fenómeno.

En nuestro caso particular, vamos a usar un modelo reducido que sugiere que la fuerza del viento son cargas puntuales equivalentes a las presiones del viento. Cada fuerza puntual sería determinada de acuerdo al área que generan las longitudes de los cables que concurren en el punto de aplicación. Nuestro modelo visto en planta tiene separaciones en X y Z



exactamente iguales, pero visto de perfil, los cables que se encuentran más alejados del centro (los que están más inclinados) son más largos (Ver imagen de modelo discreto). Esto significa que a cada punto de intersección de los cables le corresponda una carga diferente la cual varía directamente proporcional a la longitud de los cables que concurren a dicho punto. Estas cargas estarán dirigidas en dirección de la gravedad.



**Fig 3.5** Propuesta Lonaria. Planta

Otro aspecto importante es que no todas las características del material son dadas por los fabricantes. Muchos fabricantes de los textiles utilizados para hacer una lonaria no brindan todos los datos a cerca de sus características mecánicas y resistencias finales.

### **3.4 Materiales Componentes de la Estructura**

A continuación, se indican las propiedades de los distintos materiales con los cuales se va a modelar la estructura. Algunos con datos de fabricantes locales y otros valores propuestos debido a que los fabricantes no cuentan con estos datos.

- i) Membrana
- ii) Tubo perimetral soporte de la membrana

#### **3.4.1 Membrana**

Ya que existe una gran gama de membranas con características como módulo de elasticidad, módulo de Poisson, resistencia a la ruptura y al desgarre, peso propio y acabados, sería imposible hacer un análisis de todos ellos, por lo tanto nos enfocaremos en los datos que ofrece Kohichi Itoh, et.al. 1986, ya que aquí nos brinda el módulo de elasticidad (uno de los datos que más varía en la literatura revisada) con recomendaciones a cerca de presfuerzo de trabajo.

Espesor = 0.001m  
Módulo de Elasticidad = 75300 T/m<sup>2</sup>

Pesos específico =  $0.8 \text{ T/m}^3$

Datos de fabricante local Megaplast S.A. de C.V.:

Resistencia a la ruptura (Warp;Weft) Longitudinal y transversal =  $42 \text{ kg/cm}$ ;  $512 \text{ kg/cm}^2$

Resistencia al rasgado (Warp;Weft) Longitudinal y transversal =  $40 \text{ kg/cm}$ ;  $488 \text{ kg/cm}^2$

Módulo de Poisson = 0.1

### **3.4.2 Tubo perimetral**

Para todos los ejemplos aquí presentes las características del tubo perimetral no cambiarán.

Límite de fluencia =  $2530 \text{ kg/cm}^2$

Módulo de elasticidad =  $21000000 \text{ T/m}^2$

Diámetro exterior = 0.168 m

Espesor = 0.012 m

Peso específico =  $7.8 \text{ T/m}^3$

Coefficiente de dilatación térmica =  $12 \times 10^{-6}$

### **3.5 Aspectos generales del procedimiento de análisis**

Como ya habíamos mencionado anteriormente, en las lonarias hay un gran número de variables que actuando independientemente modifican el comportamiento de todo el sistema. Para poder entender mejor cómo es que afecta cada variable a nuestro modelo vamos a hacer variar una de éstas mientras que las otras permanecen constantes y luego otra varía para visualizar mejor cómo afecta el tratamiento de dicha variable.

Las variables más destacadas para nuestro caso son:

- La forma
- Las propiedades mecánicas del material
- El presfuerzo

En nuestro análisis, la variación de presfuerzo es lo más importante, como se mencionó anteriormente, es una parte fundamental de este tipo de estructuras ya que otorga rigidez y disminuye las deformaciones. Por lo tanto, para ver cómo afecta la forma haremos las variaciones de éste junto con la variación de presfuerzo. Así también el cambio en las propiedades mecánicas del material.

Dentro de estas variables podríamos hacer más subdivisiones como modificar la forma sólo en un sentido, o usar módulos de elasticidad distintos para las dos direcciones de los hilos (lo cual sería el planteamiento correcto, pero debido a falta de información por parte de los fabricantes no podemos hacer), hacer variar el presfuerzo en las dos direcciones y tener separaciones entre los cables distintos para ambas direcciones. Esto se hace innecesario, ya que como veremos más adelante se podrá observar con claridad cómo es que afecta el cambio de cada uno de las variables más destacadas a la estructura en general. Así, podríamos saber de antemano y con un buen grado de confiabilidad cómo sería el comportamiento de la estructura ante estas nuevas variaciones.

### 3.5.1 Modelo discreto del elemento finito

El problema de estudio se basa en la teoría de elasticidad lineal, con aspecto puntuales referidos al presfuerzo de los cables. Los elementos del modelo discreto correspondientes a los cables y soporte perimetral basan su comportamiento en el siguiente modelo (Gere & Weaver, 1980). Para el caso de un elemento unidimensional con 6 grados de libertad por nodo (Fig. 3.6), el funcional optimizado  $\Phi(s)$  conduce a la siguiente formulación:

$$\left\{ \int_B [B]^T [D] [B] dv + \int k [N]^T [N] da \right\} [U] = \int_B [N]^T \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{Bmatrix} dv + \int_{\partial B} [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\partial B + \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

en donde:

[B] : Matriz de derivadas de funciones de forma

[D] : Matriz de constantes elásticas

[N] : Matriz de funciones de forma

$b_x, b_y, b_z$  : Fuerzas de cuerpo

$p_x, p_y, p_z$  : Presiones actuantes en la superficie del cuerpo

$P_x, P_y, P_z$  : Fuerzas puntuales aplicadas en los nodos del modelo discreto.

La Ec 3.2 se puede mostrar en una forma más compacta:

$$([K_s] + [K_c])\{U\} = \{f\} \quad (3.3)$$

Siendo:

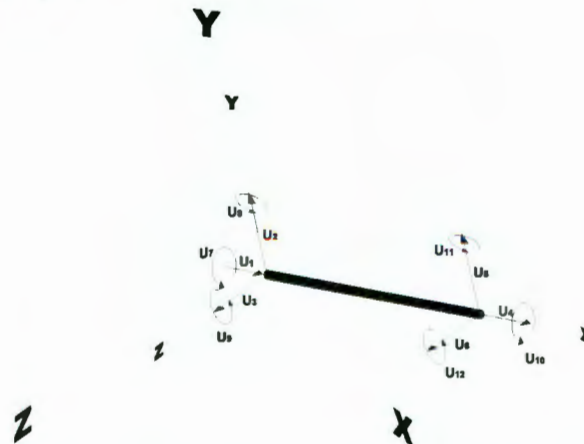
[K<sub>s</sub>] : Matriz de la estructura.

[K<sub>c</sub>] : Matriz de rigidez de una interface elástica.

{U} : Vector de desplazamientos nodales.

{f} : Vector carga.

La matriz de funciones base [N], así como la matriz [B] y [D] se derivan del caso que en particular se analice. Así por ejemplo para el elemento uni-dimensional viga 3-D mostrada en la Fig. 3.6 son como sigue:



**Fig. 3.6** Elemento finito unidimensional – viga 3D. Grados de libertad

Para la viga 3-D mostrada indicaremos las matrices [N] (de funciones de forma) y [B] (derivadas de funciones de forma) desacopladas. Primeramente mostraremos las correspondientes a los grados de libertad axiales (1 y 4)

$$[B]_a = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \end{bmatrix} \quad [N]_a = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{L} & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Las matrices correspondientes a grados de libertad lineal vertical y angular (2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12). Se hace notar que la base correspondiente a los grados (2, 5, 8, 12) es la misma para los grados (3, 6, 9, 11) por lo que se indica solo una:

$$[B]_l = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 N_3}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 N_4}{\partial x^2} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$[N]_l = \begin{bmatrix} 1 - \frac{3}{L^2}x^2 + \frac{2}{L^3}x^3; x - \frac{2}{L}x^2 + \frac{1}{L^2}x^3; \frac{3}{L^2}x^2 - \frac{2}{L^3}x^3; -\frac{1}{L}x^2 + \frac{1}{L^3}x^3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

La matriz de constantes elásticas para la serie anterior tiene la forma:

$$[D] = \left( \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (3.7)$$

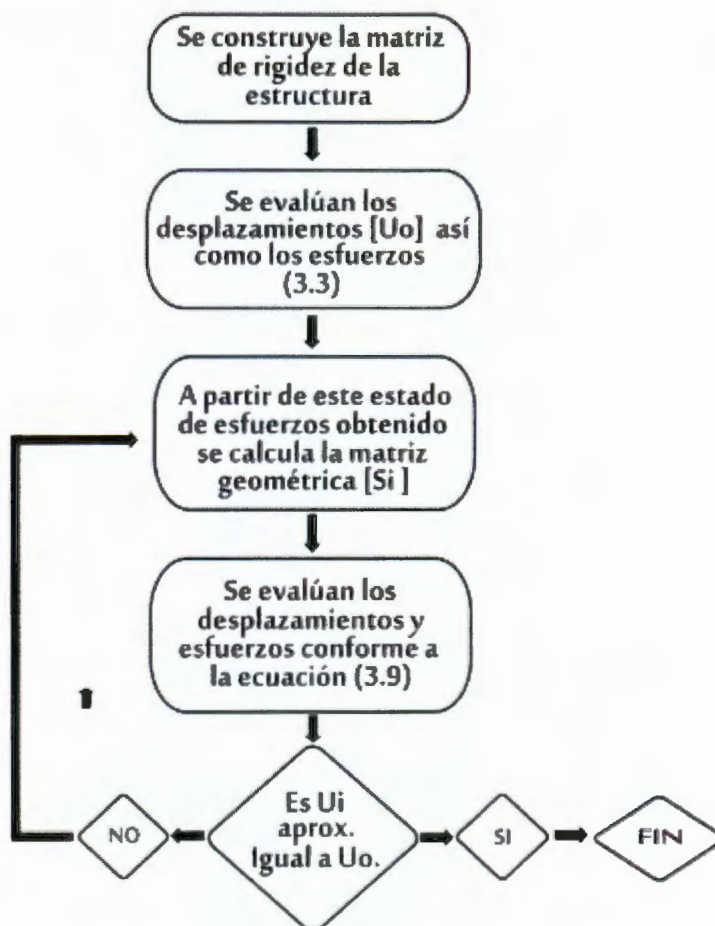
Los términos asociados a los grados (7 y 10) corresponden a los giros que experimentan los nodos inicial y final de la viga. Mostraremos enseguida la forma final que tiene la matriz de rigidez [K<sub>s</sub>] evaluada de conformidad con el primer término de la ecuación (3.2) correspondiente a una viga 3D (Cooke R. D., 1988) se muestra en la ecuación (3.8).

Se hace notar que la Matriz [K<sub>s</sub>] incluye el efecto de deformación por cortante y por ello involucra un factor de forma f y que asume valores en función de la geometría de la sección transversal de la viga. Algunos valores de f se indican en la (ecuación 3.8).

El efecto de tensión involucrado es equivalente a un efecto de preesfuerzo sobre el elemento, y que es analizado bajo el tratamiento denominado esfuerzo por endurecimiento (stress stiffening) y que es un problema no lineal de grandes desplazamientos. Se acepta sin embargo para ciertos casos un tratamiento iterativo lineal de pequeños desplazamientos y que será nuestro caso.



El involucrar el efecto de presfuerzo sobre la viga y por ende la matriz geométrica  $[K_1]$  conduce a un problema no lineal de grandes desplazamientos. Bajo estas circunstancias el procedimiento de análisis consistiría en desarrollar primeramente la solución estática conforme a la ecuación (3.3), obtener enseguida los esfuerzos y desplazamientos resultantes, para luego aplicar el modelo que involucra la matriz Geométrica (3.9), procediendo a evaluar dicha matriz (3.10) con el esfuerzo  $\sigma$  previamente obtenido. Los resultados de este nuevo análisis (en términos de los desplazamientos) se comparan con el primer ciclo, si las diferencias son mínimas (de acuerdo a un factor de aproximación), finaliza el análisis. De no ser así se repite hasta que se cumpla lo anterior. Un esquema de este proceso se indica a continuación:



**Fig. 3.7** Proceso iterativo de análisis al considerar la tensión de membrana conforme al Modelo de Filonenko-Boro

### 3.5.2 Aspectos básicos de presfuerzo

Como ya se había mencionado anteriormente, el presfuerzo ayuda enormemente a la rigidez de la estructura. Para nuestro caso habrá que probar con diferentes grados de presfuerzo, ya que de inicio no sabemos cuál es el rango de valores para éste en combinación con otros factores como el módulo de elasticidad y la geometría con los cuales se llegue a la convergencia del programa.

### **3.5.3 Lineamientos básicos de diseño**

En este trabajo vamos a usar simplemente un factor de seguridad de 2 a la resistencia a la tensión de los elementos cables, ya que en este tipo de estructuras, el riesgo de que colapse una membrana sobre personas o bienes no es muy alto. Además de que ya se ha hablado de las cualidades que posee la membrana en cuanto a seguridad se refiere.

### **3.6 Generalidades del programa**

El programa creado en Ansys consta de varias subrutinas que dividen el trabajo según la naturaleza de los procesos. Estas subrutinas son las siguientes:

#### **Inicio**

Limita al problema en tipo estructural y nos coloca en el procesador PREP7, que es el preprocesador de inicio. Nos da la opción de imprimir imágenes de nuestro análisis en ciertos momentos definidos adelante.

Aquí, se solicitan los datos con los que se van a trabajar. Estos datos podríamos dividirlos en tres grupos: de geometría, propiedades de la membrana y propiedades del tubo perimetral. En la geometría se requieren datos como la longitud y el ancho del paraboloide, las alturas superior e inferior al punto “silla” y las separaciones entre cables en dirección X y Z, y finalmente la carga de diseño. En las propiedades de la membrana, los datos son el peso volumétrico de la membrana, sus distintos módulos de elasticidad según la dirección X o Z, el espesor, módulo de poisson y los distintos presfuerzos en X o Z. En las propiedades del tubo perimetral, se solicitan datos como peso volumétrico, módulo de elasticidad, diámetro externo del tubo, su espesor módulo de poisson y coeficiente de expansión térmica.

En todos los casos, existen datos dados por default, pero estos pueden ser cambiado en el inicio de una corrida. En esta subrutina se dan los datos que se usarán en el mallado, como son los elementos link8 y beam44. Se calculan los datos geométricos del tubo perimetral y se produce la geometría del paraboloide hiperbólico. Al finalizar esta subrutina se hace la impresión de dos imágenes que muestran el paraboloide hiperbólico formado por líneas que forman un cuadrado visto en planta y muestran las dimensiones de éste.

#### **Rombo**

En esta subrutina, se generan áreas que llenan los espacios formados por las líneas que definen al paraboloide hiperbólico. Luego que todo el paraboloide está compuesto por superficies éste se corta con una herramienta “WORKPLANE”, con lo cual se le da la forma de rombo visto en planta. Se genera un nuevo sistema coordenado local, cartesiano rotado a 45°.

Finalmente se imprime una imagen de nuestro elemento con la forma que vamos a trabajar y muestra los datos de las longitudes, el caso en el que se esté trabajando y los presfuerzos.

## **Nuevos reales**

En esta subrutina se le asigna un número de identificación a cada línea para su posterior utilización en la aplicación de cargas, debido a que estos tienen diferentes longitudes dependiendo de su ubicación en el paraboloides. Esto se debe a que en planta la separación entre las líneas siempre es la misma, pero mientras estas se alejan del centro se vuelven más largas y de esta longitud depende la carga que recibirá el nodo a donde llega, ya que esta carga se calcula como WT (carga de diseño) multiplicado por el área tributaria del nodo (dada por las separaciones en X y Z).

Aquí se guarda lo que llevamos hecho hasta este momento para después, en el caso que se quiera cambiar alguna de las propiedades anteriormente asignadas, sea posible de hacer. Los datos que se podrán cambiar después son las que tienen que ver con las propiedades de los materiales, ya que el fin de guardar nuestro trabajo hasta aquí es no tener que pasar por la parte de generación de la geometría que es la parte que lleva más tiempo.

## **Nsecc**

Aquí se pueden modificar las propiedades de los elementos si se desea. Introduciremos entonces aquí la opción para proceder a esto, por lo tanto generamos los nuevos reales que vamos a sustituir. Las propiedades que se pueden cambiar son el presfuerzo en X o Z, los módulos de elasticidad en X o Z, el diámetro del tubo y su espesor y una nueva carga de diseño.

## **Lcon**

En este punto, extraemos el contador que sirve para ir guardando con distinto título cada uno de los trabajos.

## **Mallado**

Se imprime una imagen de la estructura en su forma de hyper formado por aéreas. Se dan los datos de las nuevas características de los elementos. En esta parte se le asigna las propiedades a los elementos que eran anteriormente sólo líneas. Así se les da la característica de elementos link8 a los cables que están dentro de la membrana en sentido X y Z y, utilizando el nuevo sistema coordenado para una mayor facilidad de la selección de estos elementos se les da la característica de elementos beam44 a las líneas que se formaron a partir del corte del "WORKPLANE".

Se hace la impresión de otra imagen mostrando el elemento discreto, con forma de líneas y nos arroja el dato de cuántos elementos link8 (los que representan la membrana) y elementos beam44 (el tubo perimetral) existen.



## **Análisis**

Ya que tenemos todas las características que forma nuestro problema, salimos del procesador PREP7 para entrar al procesador SOLU. En este momento es donde activamos el uso de un análisis no lineal con el comando SSTIF,ON y se asignan valores para la convergencia del presfuerzo.

Se seleccionan los puntos más alejados del rombo para asignarles restricciones en todas las direcciones.

Se activa el peso propio y se procede a asignar las cargas en los nodos.

Para un primer caso, se seleccionan todos los nodos que estén dentro de una distancia que contenga a todos los nodos internos, esto es, dejando a un lado los que están en el tubo perimetral. Una vez seleccionados se les asigna una carga en la dirección Y negativa evaluada a partir de la carga de diseño multiplicada por el área generada a partir de la separación en X y la separación en Z.

Como ya hemos mencionado anteriormente, las cargas que rigen el diseño en estas estructuras son las debidas al viento y éste actúa de manera normal a cada punto de la superficie, así que asignar cargas de viento que se dirigen en el sentido de la gravedad es un análisis que puede tener su uso en otra situación.

Para tomar en cuenta la naturaleza de la acción del viento, este debe actuar de manera normal en cada punto de la superficie e ir variando el coeficiente de presión "CP" según la zona.

Para producir un efecto de viento más parecido a lo que ocurre en la realidad, se evalúan varios parámetros. El primero es la fuerza debida al viento por el área tributaria; esta es justo como en el primer caso, sólo que ahora se aplicará en las direcciones X, Y y Z para lograr un efecto del viento normal a la superficie.

Para hacer que estas fuerzas en los tres sentidos sean normales, se debe encontrar factores que afecten individualmente cada carga en su respectiva dirección. Esto se logra por medio de las pendientes que hay en cada punto en X y en Z, ya que calculando sus inversos negativos podemos encontrar las pendientes normales en cada dirección. De aquí, por medio de proyecciones en planos separados una unidad del punto a analizar se puede calcular un ángulo "alfa" que es el que está entre el plano XZ con respecto a la dirección que debe llevar el vector resultante para ser normal a dicho punto. Con este ángulo alfa y considerando una hipotenusa igual a la unidad (un vector unitario que no afecta la magnitud de la carga) se puede calcular el factor que afecte al vector en dirección Y de tal modo que en combinación con los otros en dirección X y Z (afectados cada uno por su propio factor de reducción por medio de trigonometría a partir del ángulo alfa) produzcan el efecto de un vector normal al punto en análisis.

Para el caso en donde las pendientes son iguales entre sí, e iguales a cero, directamente se asignan los valores de componentes en X y Z igual a cero y en Y igual a 1. Para facilitar la programación, se toma siempre el valor absoluto de las componentes. Para lograr que el coeficiente de presión CP afecte a la estructura según su forma se calcula aparte un polinomio con términos X y Z que por medio de una interpolación lineal determine el valor CP en cada uno a partir de su ubicación.

Este polinomio está determinado partiendo de condiciones iniciales que son los distintos CP en distintos puntos de la estructura. Así, por medio de un arreglo matricial podemos conocer los diferentes coeficientes que acompañan a la combinación de factores X y Z.

Para poder aplicar todo esto de manera correcta, hace falta un término que nos determine en qué sentido, para las distintas coordenadas donde se desee aplicar la carga se esté trabajando a presión o succión. Por su parte, con la interpolación lineal se obtienen los valores de CP tanto de succión negativos como de presión positivos. El termino DIRECCION nos determina si en cierto punto de la estructura las componentes en X o Z van dirigidas en un sentido positivo o negativo; de este modo la combinación de signos da la dirección correcta. Para analizar distintas direcciones del viento sólo hará falta conocer la distribución de presiones que genera y meterla al programa como un polinomio característico. Se imprime una imagen con las cargas puestas como vectores y los apoyos como nodos con restricciones en los tres sentidos. Se comienza con la solución.

### **Posproceso**

Se solicitan los resultados de la última iteración. Se almacenan las fuerzas normales de los cables equivalentes y las fuerzas y momentos del tubo perimetral. Se crea un vector con las reacciones en los apoyos y se guardan en una dirección asignada

### **Visualización**

Aquí se hacen varias impresiones de imágenes, de desplazamientos, tensiones, fuerzas y momentos del tubo perimetral. Estas se solicitan por medio de los distintos materiales y fuerzas.

### **Contador**

Con la finalidad de mantener virgen el contador para cada caso. Esto es, que no se sobrescriban los resultados.

### **Ncaso**

Limpia todos los datos que están actualmente como solución y solicita el archivo guardado donde se ha generado la geometría pero no se le ha asignado propiedades a los materiales. En este punto es donde podemos cambiar las propiedades para un nuevo ejemplo. Esta subrutina utiliza las anteriores desde Nsecc.

## Opción

En el caso que se quiera analizar otra opción se usa por default la respuesta "SI" y usamos la subrutina Ncaso.

## Instrucciones

Usa las subrutinas, inicio, rombo, nuevos reales, mallado, análisis, postproceso, visualización, contador y opción. Finalmente, se da la orden de usar la subrutina: instrucciones, con lo que empieza a utilizarse el programa.

### 3.6.1 Diagrama de bloques del programa

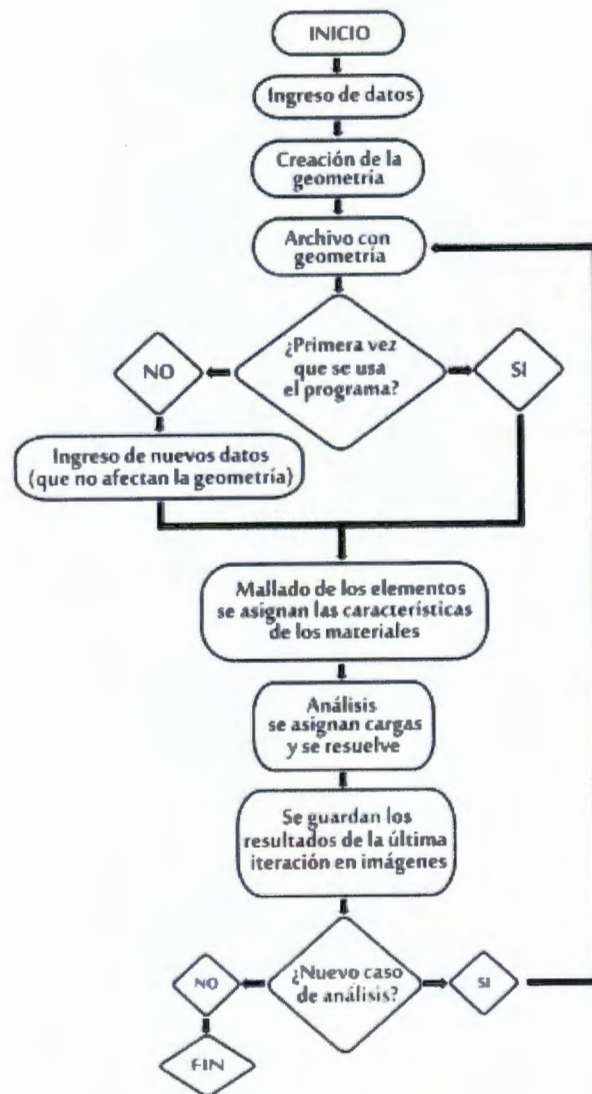


Fig. 3.8 Diagrama de bloques del programa

# Capítulo 4. Caracterización de Cargas

## 4.1 Aspectos particulares de diseño

Las estructuras lonarias, debido a su poca masa no son calculadas para resistir efectos sísmicos, por lo tanto este aspecto no se tomará en cuenta. El efecto dominante de diseño en este tipo de estructuras es el de viento. A continuación, se describe el procedimiento por el cual se han utilizado ciertos valores para los efectos de viento en nuestro caso particular.

## 4.2 La acción del viento

Para comenzar a evaluar las fuerzas de viento que debemos analizar en nuestro trabajo, tomaremos los datos de reglamento que mejor se ajusten. En este punto nos damos cuenta que en el reglamento no se tiene el caso particular de nuestra estructura; nos indica que para casos particulares se debe de usar túnel de viento. En nuestro trabajo no usaremos dicho tratamiento, por lo cual, tomaremos ciertos valores del reglamento y los emplearemos de la manera más sensata posible de acuerdo a otros estudios experimentales.

En cuanto a la clasificación de nuestra estructura se refiere, de acuerdo a su importancia cae en el grupo B2 y respecto a su respuesta ante la acción del viento es del tipo 4: “Cubiertas colgantes. La forma presenta problemas aerodinámicos” (Normas técnicas complementarias del DF 2004. Diseño por viento). Los efectos de viento son aplicados únicamente a la membrana equivalente debido a que en la estructura tubular serían mínimos ya que su área es muy pequeña. De las fuerzas ocurrentes en la membrana equivalente se transmiten a la estructura tubular y de ahí se revisa sus efectos.

Utilizando el método simplificado y estático para diseño por viento necesitamos conocer la velocidad de diseño. Esta se calcula por medio de la expresión:

$$VD = F_{TR} T_a V_R \quad (4.1)$$

Para nuestro caso la velocidad regional es de 80 km/h tomando en consideración un periodo de retorno de 50 años (Manual de diseño de la CFE).

Se consideran los parámetros  $F_{TR} = 0.9$  y  $T_a = 1.0$

Por lo tanto, la velocidad de diseño  $VD = 72\text{km/h} = 20\text{m/s}$

Finalmente la presión de diseño será evaluada con la expresión:

$$PD = 0.048 C (VD)^2 \quad (4.2)$$

Lo que sustituyendo finalmente obtenemos:

$$PD = 19.2C \text{ (en kg/m}^2\text{)} \quad (4.3)$$

Esto indica que la presión de diseño únicamente estará en función del coeficiente C que tiene que ver con la forma de la estructura y la dirección del viento.

### 4.3 Propuesta de coeficientes de presión “C”

No ha sido posible encontrar información a cerca de la distribución de presiones en un caso parecido al nuestro, así que tomando en cuenta varias fuentes de información podemos darnos una idea de cómo actuaría el viento en una estructura con nuestras características. Evaluaremos un caso hipotético dónde la acción del viento trabaja en dirección de la gravedad y con un coeficiente de presión constante en toda la superficie de la estructura igual a la unidad. Esto es con el fin de poder comparar las diferencias en los resultados obtenidos a partir de un método de análisis sumamente simple y otros con implicaciones más reales.

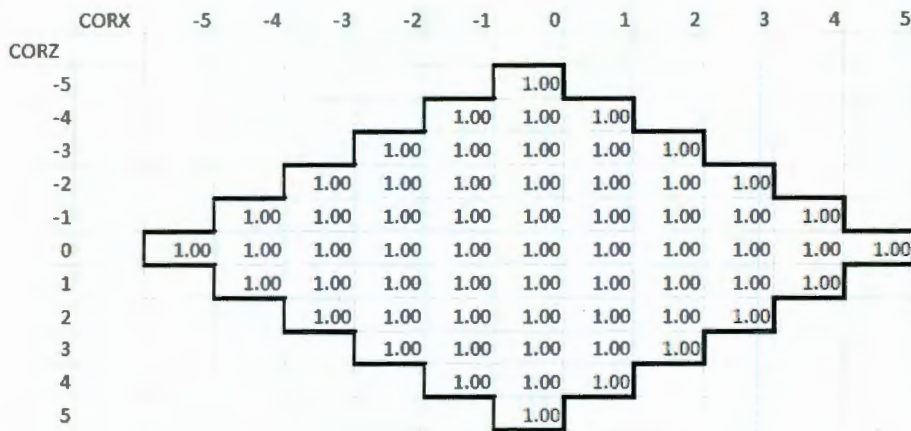
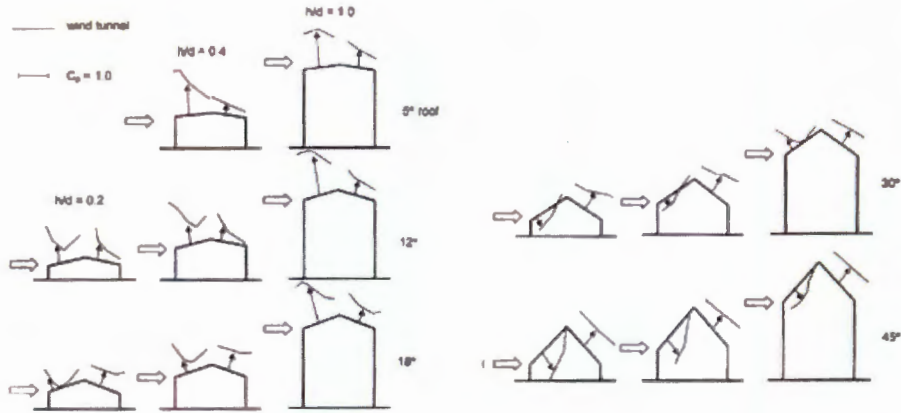


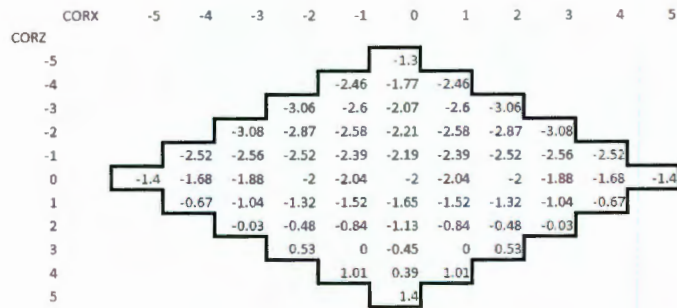
Fig 4.1 Distribución de coeficientes de presión, Caso 1.

Para nuestro segundo caso de análisis haremos variable el coeficiente de presión con ciertas consideraciones. El viento se dirige de manera paralela a los ejes de la estructura que consideramos para nuestro análisis, esto es, en dirección de uno de los puntos más bajos “subiendo” por el centro de la membrana hasta bajar de nuevo a el otro punto bajo.

Podemos darnos una idea, con el viento de frente, en qué parte de la membrana se desarrollarán presiones y succiones analizando los diagramas de presiones de techos inclinados, Fig 4.2. A partir de 30° nos damos cuenta que en el techo inclinado de lado de barlovento hay un cambio entre presiones y succiones (la transición es hecha pasando por un coeficiente de presión  $C = 0$ ) y que en techos con 45° de inclinación toda el techo inclinado del lado de barlovento está completamente a presión. A partir de esto, se estima que el punto donde se produce la transición de presión a succión debe estar entre 2.5 y 1.5 hacia fuera del centro.

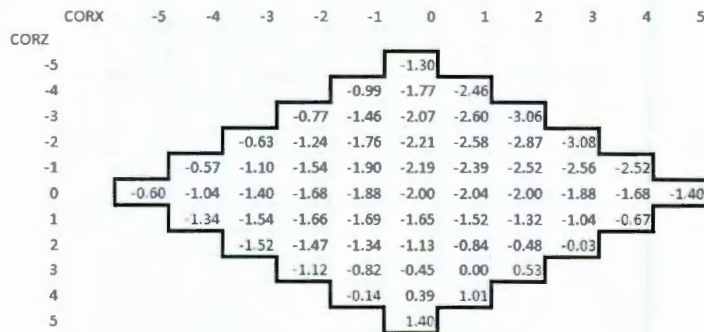


**Fig 4.2** Distribución de presión media en techos inclinados (Holmes, 2001)



**Fig 4.3** Distribución de coeficientes de presión, Caso 2 (simétrico).

Ahora bien, parece necesario analizar un caso más real, de modo que el tercer caso trata del viento en dirección de 45°. Para este caso, se parte de valores conocidos del reglamento utilizando el caso de muros aislados.



**Fig 4.4** Distribución de coeficientes de presión, Caso 3

#### 4.4 Cargas a considerar

En todos los casos se consideran las cargas gravitatorias debidas al peso propio de los materiales. Para el caso 1, la fuerza de viento está dirigida en sentido de la gravedad, pero

el valor de ésta está definido por la presión de diseño. Para los casos 2 y 3 es afectada por los coeficientes de presión mencionados anteriormente.

#### 4.5 Características de los casos de estudio

Para este trabajo, se analizarán los siguientes casos:

Tabla 4.1 Características de los casos de estudio

Caso	Características
Variación de la geometría	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se analizan cuatro casos donde la geometría varía hasta llegar al caso de estudio, véase figuras 5.1 a la 5.4.</li> <li>-El presfuerzo en cada caso es variable.</li> <li>-El el módulo de elasticidad permanece constante igual a <math>75300 \text{ T/m}^2</math>.</li> <li>-Maneja las cargas puntuales equivalentes en el sentido de la gravedad.</li> <li>-La distribución de coeficientes de presión “C” es constante igual a 1. Véase figura 4.1.</li> </ul>
Variación de las propiedades mecánicas del material	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se analizarán cuatro casos donde el módulo de elasticidad de la membrana varía con 50%, 200% y 300% respecto al módulo de elasticidad propuesto.</li> <li>-El presfuerzo en cada caso es variable.</li> <li>-La geometría permanece constante. Véase figura 5.4.</li> <li>-Maneja las cargas puntuales equivalentes en el sentido de la gravedad.</li> <li>-La distribución de coeficientes de presión “C” es constante igual a 1. Véase figura 4.1.</li> </ul>
Cargas en sentido de la gravedad	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elementos como la geometría (figura 5.4), módulo de elasticidad (<math>75300 \text{ T/m}^2</math>) y el presfuerzo (<math>500 \text{ T/m}^2</math>) permanecen constantes.</li> <li>-Maneja las cargas puntuales equivalentes en el sentido de la gravedad.</li> <li>-La distribución de coeficientes de presión “C” es constante igual a 1. Véase figura 4.1.</li> </ul>
Viento de frente	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Elementos como la geometría (figura 5.4), módulo de elasticidad (<math>75300 \text{ T/m}^2</math>) y el presfuerzo (<math>500 \text{ T/m}^2</math>) permanecen constantes.</li> <li>-Considera que el viento lleva la misma dirección que nuestro eje “-Z” de análisis.</li> <li>-Las cargas puntuales equivalentes actúan de manera normal a la superficie.</li> <li>-La distribución de coeficientes de presión “C” es variable. Véase la figura 4.3.</li> <li>-Elementos como la geometría (figura 5.4), módulo de elasticidad (<math>75300 \text{ T/m}^2</math>) y el presfuerzo (<math>500 \text{ T/m}^2</math>) permanecen constantes.</li> </ul>
Viento de lado	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Considera que el viento pasa por la estructura sin coincidir en algún eje de análisis.</li> <li>-Las cargas puntuales equivalentes actúan de manera normal a la superficie.</li> <li>-La distribución de coeficientes de presión “C” es variable. Véase figura 4.4.</li> </ul>

# Capítulo 5. Resultados

## 5.1 Variación de la forma

Para darnos una idea de cómo afecta la variación de la geometría en los esfuerzos en la membrana y el tubo, se analizarán varios casos donde las dimensiones cambian un poco hasta llegar a la deseada. Dentro de cada una de estas variaciones hacemos variar los presfuerzos del mismo modo para poder comparar los casos. Variamos los presfuerzos para saber cómo se comportan las tensiones y esfuerzos en las membranas.

Al compararlas podremos tener una idea clara de cómo afecta el cambio de geometría, ya que este podría ser un factor clave si se presenta el caso de no convergencia.

NOTA: En los casos se hace referencia a dos distancias. Estas son, respectivamente la altura que hay del punto silla a los apoyos más altos y del punto silla a los apoyos que están en los puntos más bajos.



**Fig. 5.1** Caso 1; 2 y 3 m



**Fig. 5.2** Caso 2; 3 y 4m



**Fig. 5.3** Caso 3; 4 y 5 m



**Fig. 5.4** Caso 4; 5 y 6m

Para un ancho y largo visto en planta igual a 10 m  
Material: Poliéster con acabado vinílico

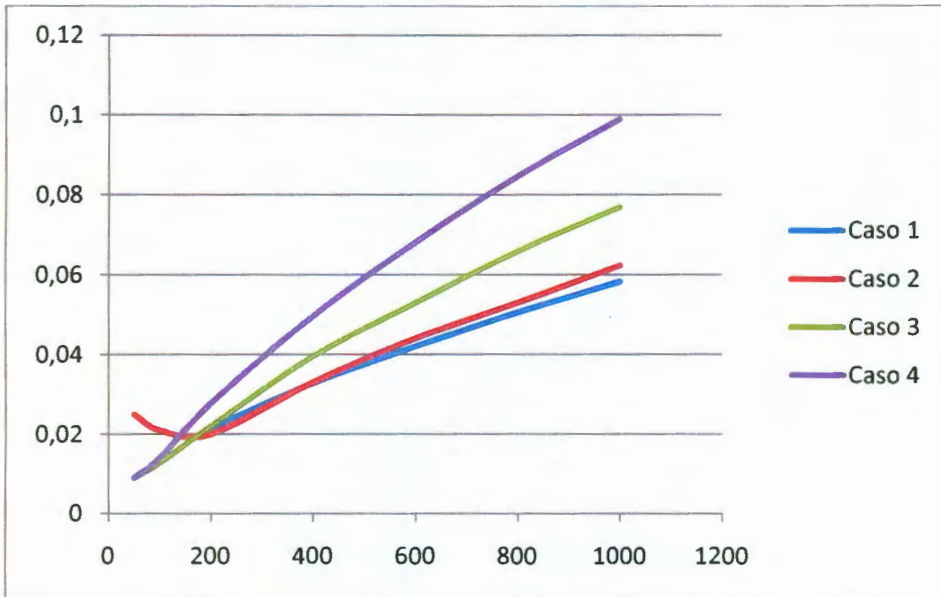


Utilizaremos los datos que brinda Kohichi Itoh, et.al. 1986. Los esfuerzos de trabajo de la membrana se recomiendan entre 1 y 4 KN.

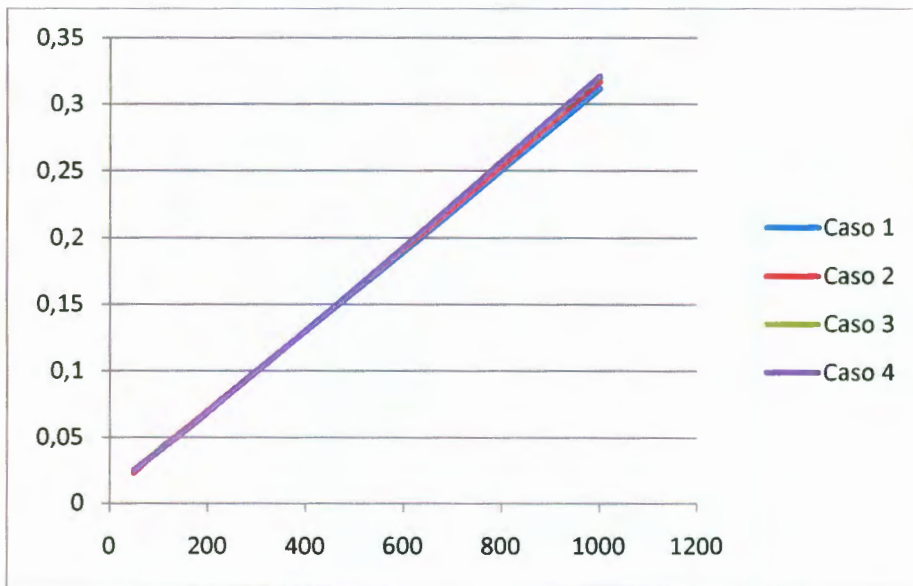
Módulo de Elasticidad= 75300 T/m<sup>2</sup>

Resistencia a la tensión (aplicando factor de seguridad de 2) en  
warp/weft = 0.525/0.500 (T/.25m)

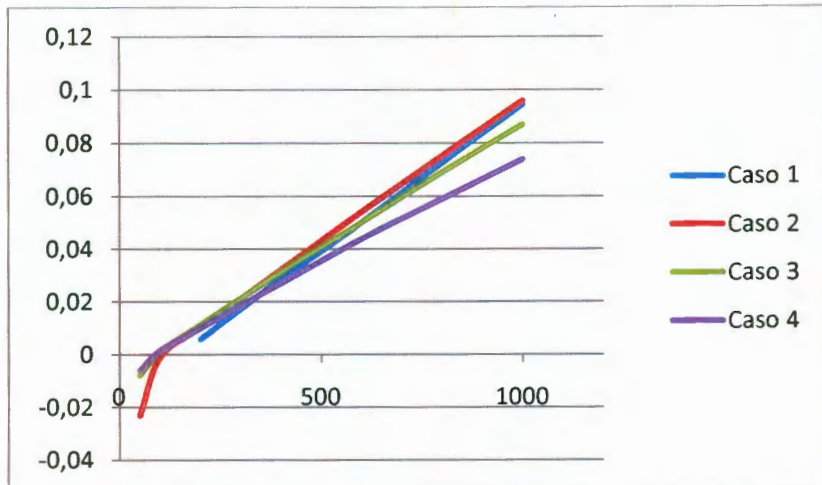
Estos valores serán los mismos en TODOS los casos siguientes.



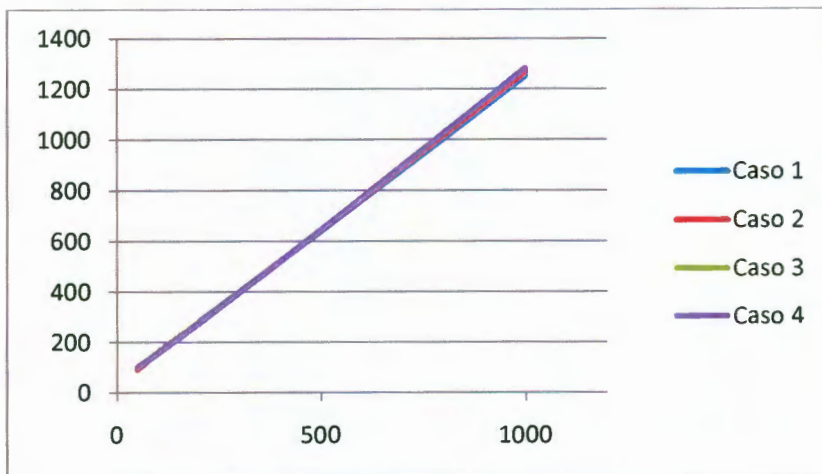
**Fig 5.5** Gráfica de desplazamientos máximos  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Deformación (m)



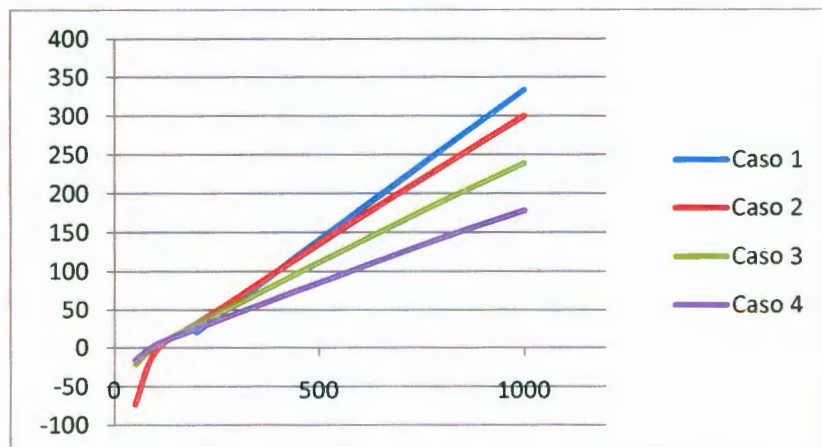
**Fig 5.6** Gráfica de tensiones máximas en las barras X  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Deformación (m)



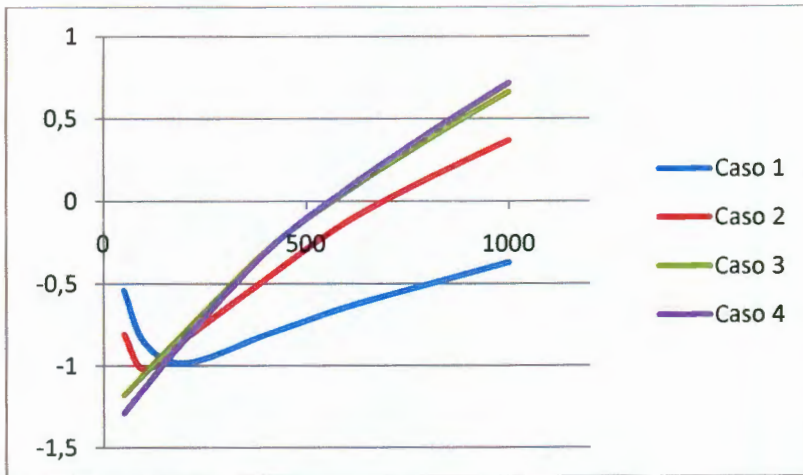
**Fig 5.7** Gráfica de tensiones mínimas en las barras Z  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Tensión (Ton)



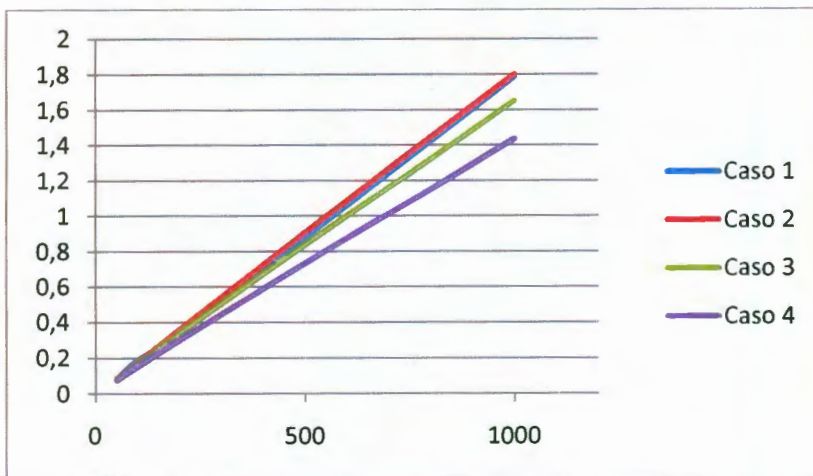
**Fig 5.8** Gráfica de esfuerzos máximos en las barras X  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Esfuerzo (T/m2)



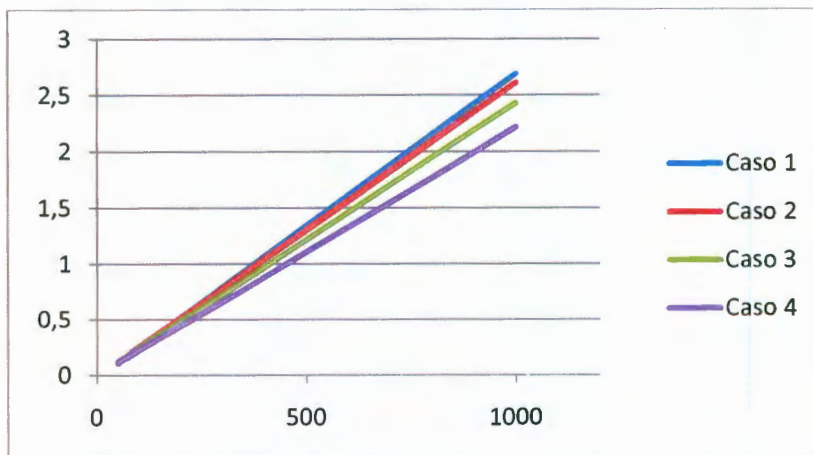
**Fig 5.9** Gráfica de esfuerzos mínimos en las barras Z  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Esfuerzo (T/m2)



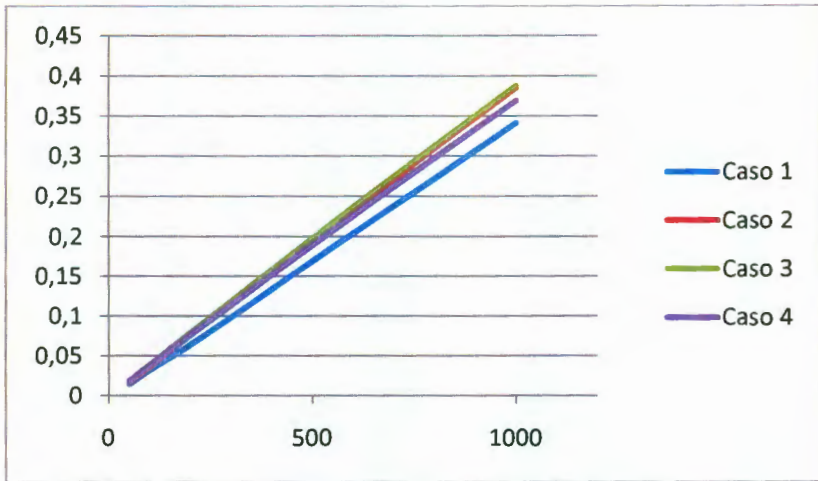
**Fig 5.10** Gráfica de fuerzas normales máximas en el tubo perimetral Presfuerzo ( $\text{Ton/m}^2$ ) vs. Fuerza normal (Ton)



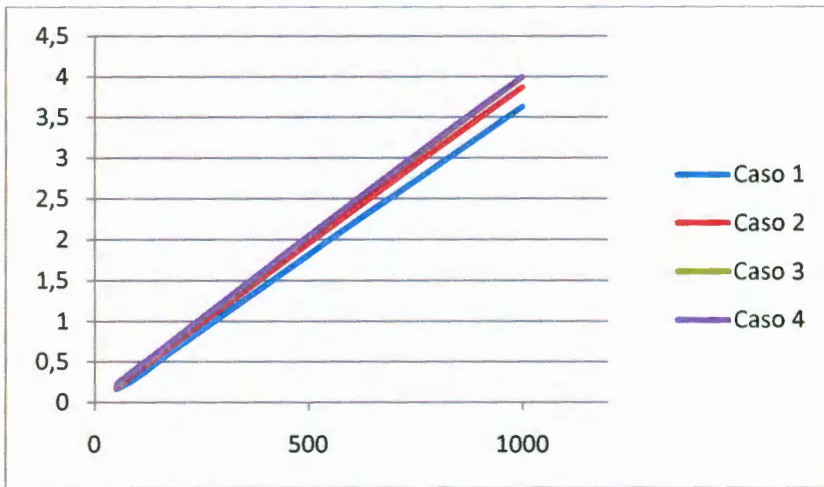
**Fig 5.11** Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Y Presfuerzo ( $\text{Ton/m}^2$ ) vs. Fuerza cortante (Ton)



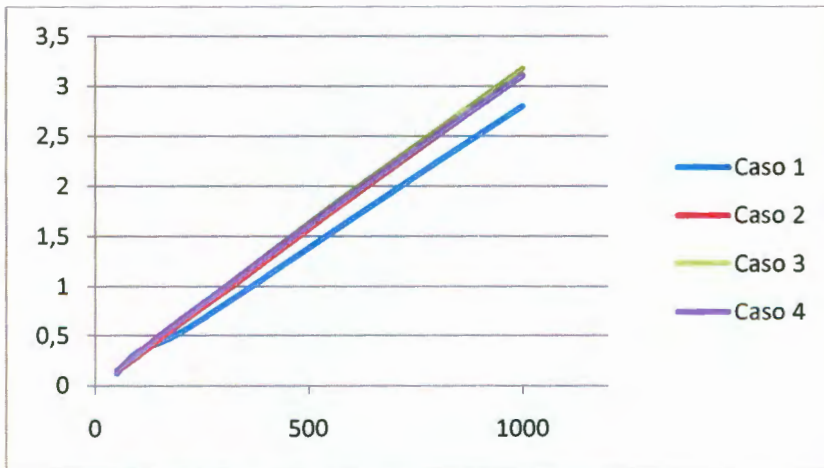
**Fig 5.12** Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Z Presfuerzo ( $\text{Ton/m}^2$ ) vs. Fuerza cortante (Ton)



**Fig 5.13** Gráfica momento torsionante en tubo perimetral Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Momento torsionante (Ton-m)



**Fig 5.14** Gráfica de momento flexionante en Y Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Momento flexionante (Ton-m)



**Fig 5.15** Gráfica de momento flexionante en Z Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Deformación (m)

Como podemos observar, los desplazamientos aumentan de manera proporcional con la altura. Los desplazamientos máximos están ubicados en la zona de la membrana que está cercana a los apoyos bajos. Como las fuerzas están dirigidas en el sentido de la gravedad, esto provoca que los cables que están en dirección Z pierdan tensión y por lo tanto tengan mayores desplazamientos. Los desplazamientos máximos se encuentran en los puntos donde las barras en dirección Z y las fuerzas externas son casi colineales. En esos mismos puntos los cables que están en dirección X tienen muy poca pendiente, lo cual genera una resultante pequeña para contrarrestar las que podrían considerarse “presiones de lluvia” (en sentido de la gravedad) que van en la misma dirección que las tensiones en Z. La configuración deformada de nuestra estructura se puede apreciar claramente en la figura 5.31.

Como estamos modelando la presión de lluvia en sentido de la gravedad, vamos a provocar que los cables en dirección X que son los que cuelgan (llevan las cargas hacia los apoyos superiores) se tensionen más y por lo tanto tengan mayores esfuerzos. Para los cables en dirección Z que pierden tensión es más importante fijarnos en los esfuerzos mínimos, ya que si estos son negativos (están indicado que trabajan a compresión) significa que en la realidad la tela se arrugaría en esas zonas.

Como era de esperarse, para el tubo perimetral los esfuerzos crecen de manera lineal con los presfuerzos en la membrana. El principal efecto que existe en nuestro tubo es el momento flexionante que debido a las secciones y material escogidos en nuestro tubo son correctamente soportados. Esto se evalúa a partir de la ecuación:

$$\frac{P}{0.6F_b} + \frac{M_{yc}}{0.6F_y I_x} + \frac{M_{zc}}{0.6F_y I_z} \leq 1.0 \quad (5.1)$$

### Ec 5.1 Ecuación de la esquadria como revisión para secciones de acero

Resaltemos el hecho de que la membrana tiene un comportamiento claramente lineal. Cuando el presfuerzo tiende a cero también las tensiones y los esfuerzos en la membrana tienden a cero. Analizando esto desde un punto de vista más estricto aunque las cargas externas sean cero, la membrana tendrá esfuerzos muy pequeños debidos a su peso propio. Esto no es fácil de notar gráficamente ya que la ligereza es una de las cualidades de la membrana arquitectónica.

## 5.2 Variación de las propiedades mecánicas del material

Existe una gran gama de materiales en el mercado con los cuales se pueden hacer lonarias. Sus propiedades mecánicas varían mucho entre ellos y dentro del mismo material. Por ejemplo, para saber la resistencia al corte y/o rasgado de cierta producción, se ensayan muestras representativas que muestran valores distintos. Finalmente, los datos que se le otorgan al diseñador son probabilísticos.

Ya que existen muy diversos usos para las lonarias, como ya hemos mencionado anteriormente, se requiere de propiedades y ventajas específicas que sólo cierto material puede otorgar.

Esto en virtud de que los proveedores no dan la información completa sobre las membranas que producen y sería difícil hacer una comparación de cierta membrana con un particular módulo de elasticidad y tratar de comparar los presfuerzos con los de otro tipo de membrana de otras propiedades.

Con base en el módulo de elasticidad ( $7530\text{kg/cm}^2$ ) haremos los cambios a otros datos que son fracción de este:  $3765\text{kg/cm}^2$ ,  $15060\text{kg/cm}^2$  y  $22590\text{kg/cm}^2$ , que son, respectivamente, la mitad, el doble y el triple.

Para las próximas gráficas serán:

Caso 1:  $E= 3765\text{ kg/cm}^2$

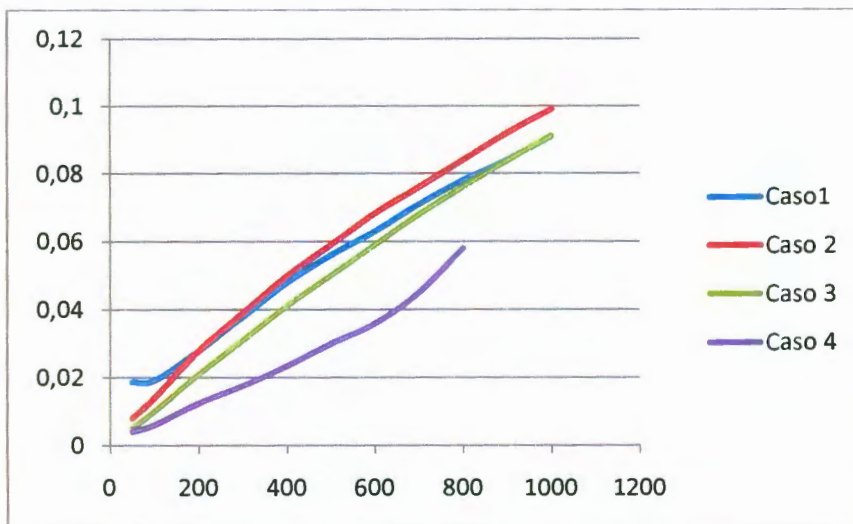
Caso 2:  $E=75300\text{ kg/cm}^2$

Caso 3:  $E=15060\text{ kg/cm}^2$

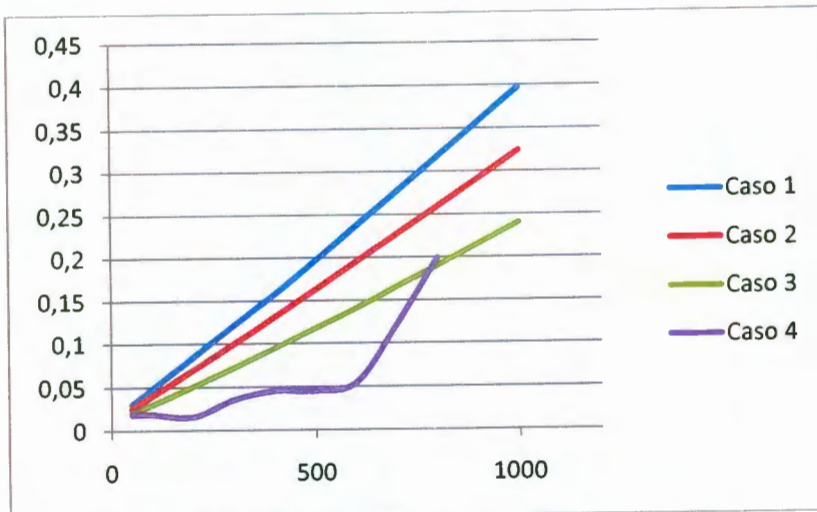
Caso 4:  $E=22590\text{ kg/cm}^2$

De la misma forma que en la variación de la forma usaremos distintos presfuerzos para apreciar su comportamiento.

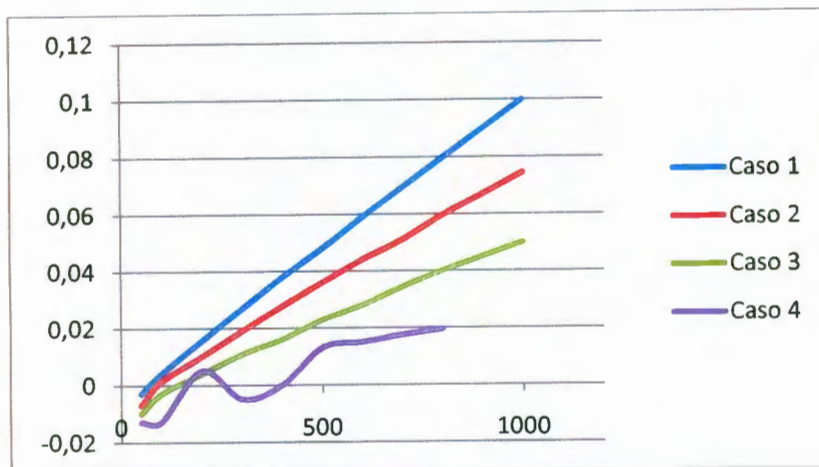
Gráficamente tendríamos lo siguiente:



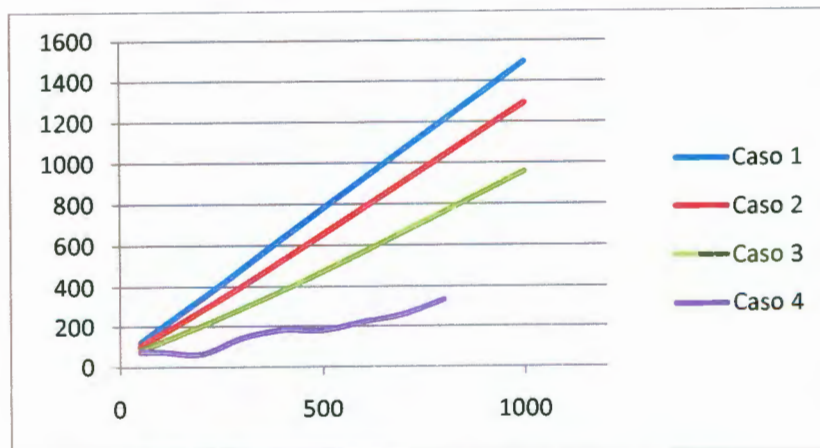
**Fig 5.16** Gráfica de desplazamientos máximos Presfuerzo ( $\text{Ton/m}^2$ ) vs. Deformación (m)



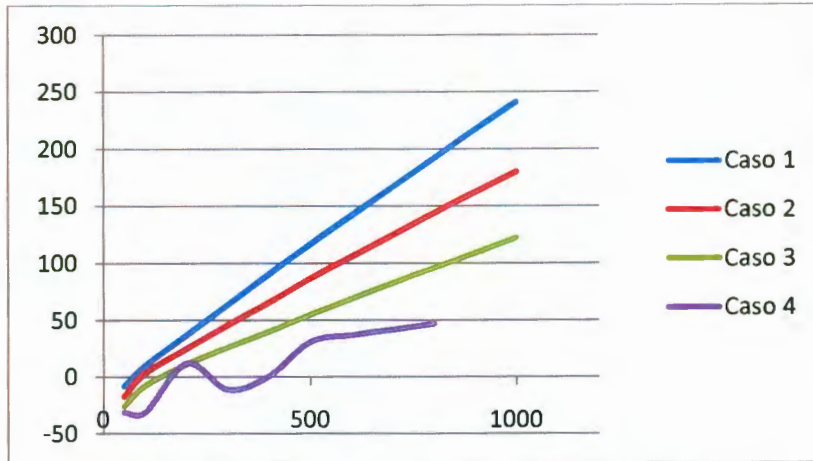
**Fig 5.17** Gráfica de tensiones máximas en X  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Tensión (Ton)



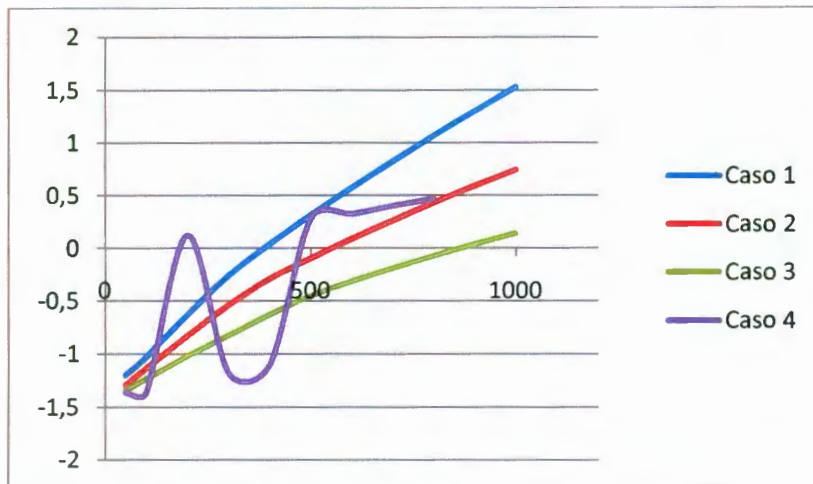
**Fig 5.18** Gráfica de tensiones mínimas en Z  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Tensión (Ton)



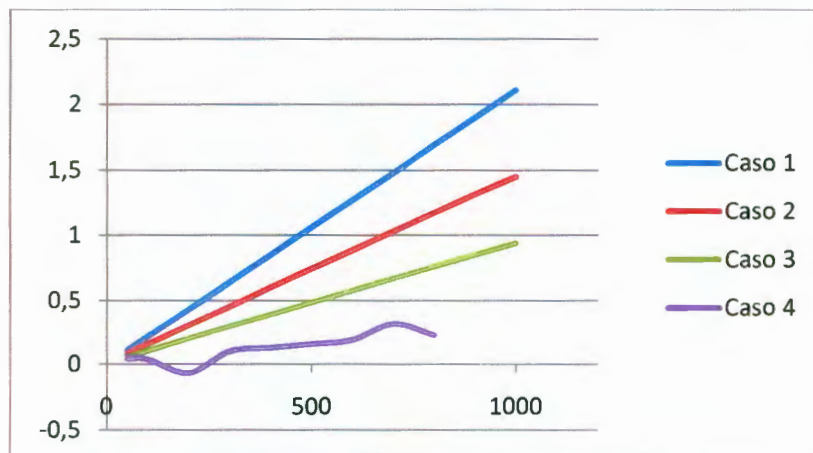
**Fig 5.19** Gráfica de esfuerzos máximos en X  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Esfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>)



**Fig 5.20** Gráfica de esfuerzos mínimos en Z  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Esfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>)

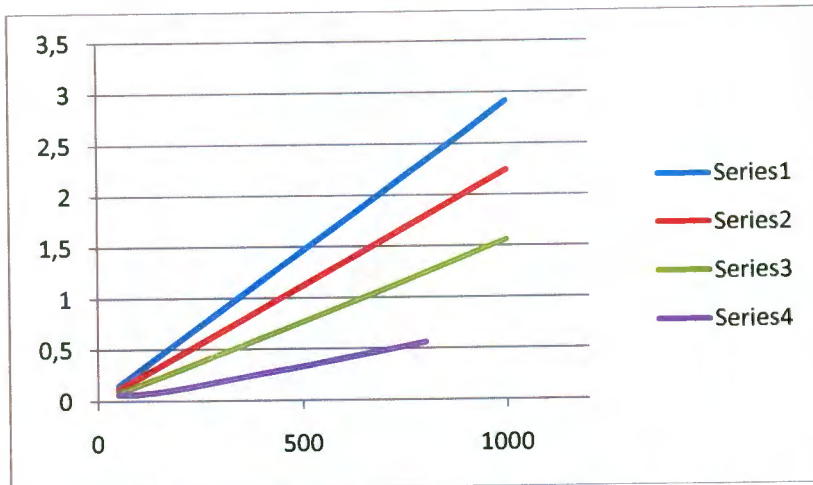


**Fig 5.21** Gráfica de normales máximas en el tubo perimetral  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Fuerza normal (Ton)

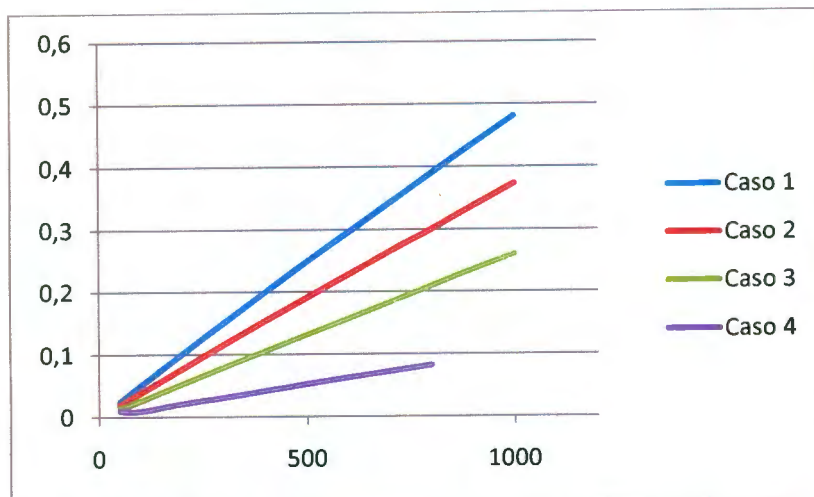


**Fig 5.22** Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Y  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Fuerza cortante (Ton)

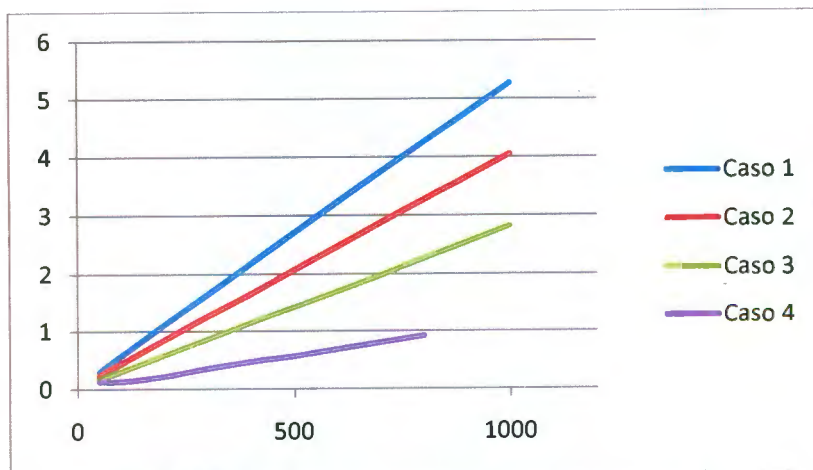




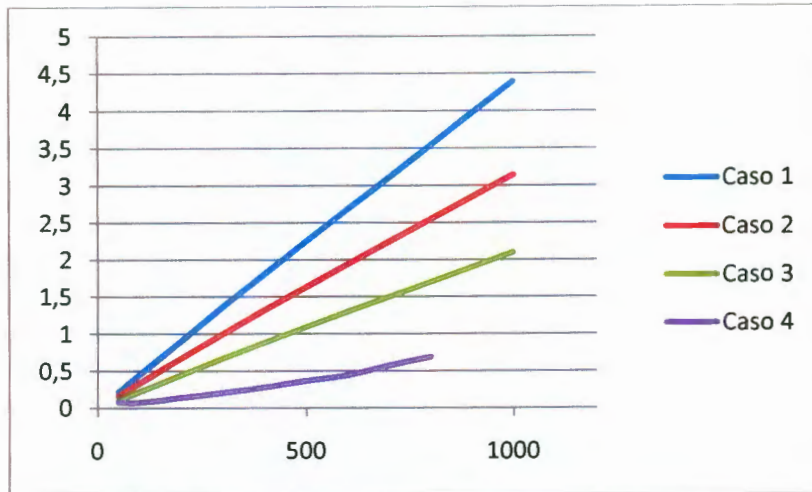
**Fig 5.23** Gráfica de fuerzas cortantes máximas en Z  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Fuerza cortante (Ton)



**Fig 5.24** Gráfica de momento torsionante en tubo perimetral  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Momento torsionante (Ton-m)



**Fig 5.25** Gráfica de momento flexionante en Y  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Momento flexionante (Ton-m)



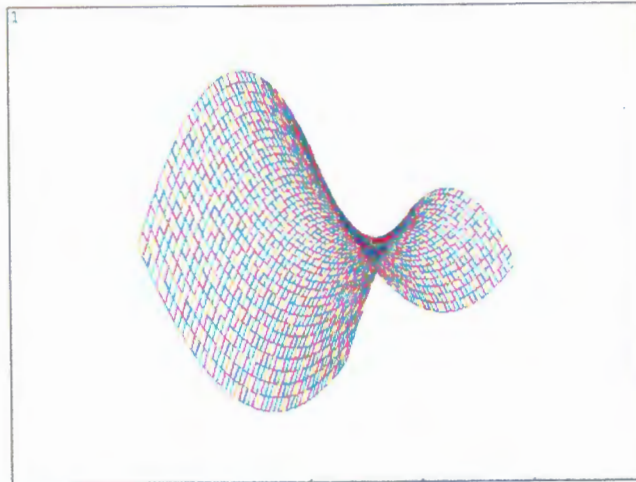
**Fig 5.26** Gráfica de momento flexionante en Z  
Presfuerzo (Ton/m<sup>2</sup>) vs. Momento flexionante (Ton-m)

Lo primero que se hace notar en estas gráficas es el hecho de que en el caso 4, el módulo de elasticidad es demasiado alto para los presfuerzos que se proponen, y esto genera la no convergencia del sistema. El programa está diseñado para que si en cien iteraciones no se obtiene la convergencia del sistema, se impriman los resultados de la última iteración, la cual no es necesariamente la más cercana a un resultado correcto. También cabe destacar que los resultados erróneos sólo se presentan en algunos casos, ya que a partir de las fuerzas cortantes máximas en Z todas las gráficas del caso 4 tienen un comportamiento perfectamente lineal.

Con estas gráficas podemos identificar claramente que los esfuerzos tanto en la membrana como en el tubo perimetral aumentan de forma inversamente proporcional. Pero hay que fijarnos que en una membrana con un módulo de elasticidad más alto, presfuerzos bajos hacen que no haya una convergencia en el sistema y nos de datos erróneos, los cuales podemos identificar fácilmente en las gráficas como puntos que salen de la recta que normalmente tendrían un comportamiento lineal. También, para membranas con módulos de elasticidad bajos, mucho presfuerzo no lleva a una convergencia en el resultado final.

### 5.3 Caso 1. Cargas en sentido de la gravedad

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir del supuesto de que las cargas actúan en sentido de la gravedad. Se emplea un presfuerzo de 500 T/m<sup>2</sup> en ambos sentidos ya que gracias a las gráficas anteriores podemos estar seguros que se llegará rápidamente a la convergencia. Estos son los diagramas típicos de esta estructura, ya que todos los datos obtenidos anterior mente fueron revisados de estas imágenes “ploteadas” por el mismo programa.



**Fig 5.27** Paraboloide hiperbólico. Longx=12m; Ancho=10m; Altura sup = 5m Altura inferior = 6m; Planta: SepX = SepZ = 0.25 m

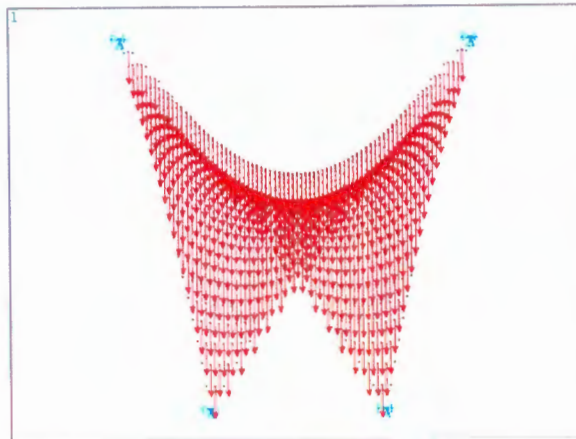


**Fig 5.28** Sección Romboidal del paraboloide hiperbólico; LX = LZ = 10m  
Esfuerzos iniciales en X y Z = 500 T/m<sup>2</sup>

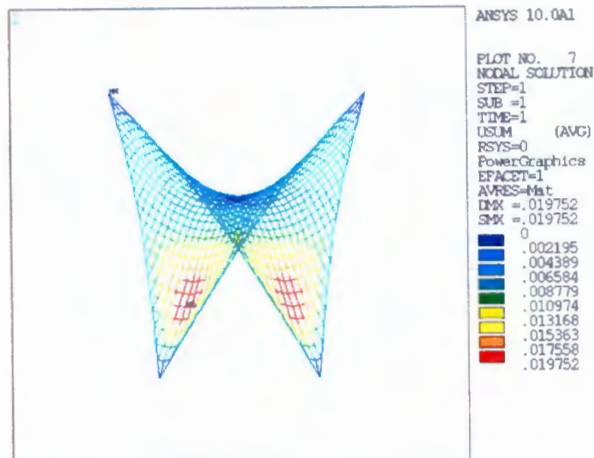


**Fig 5.29** Modelo discreto. 80 Elementos Beam44; 2400 elementos link8

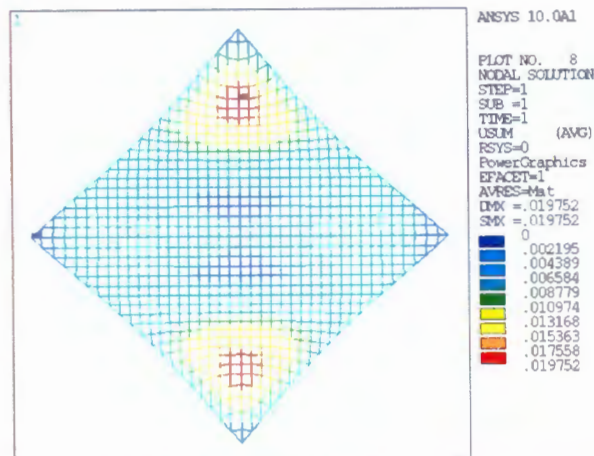
Los datos que brindan las figuras 5.27 a la 5.29 serán los mismos para todos los casos de análisis siguientes.



**Fig 5.30** Condiciones de frontera y fuerzas nodales  
Total de fuerzas nodales = 0.9132 T



**Fig 5.31** Desplazamientos totales del paraboloides (m) en perspectiva



**Fig 5.32** Desplazamientos totales del paraboloides (m) Planta

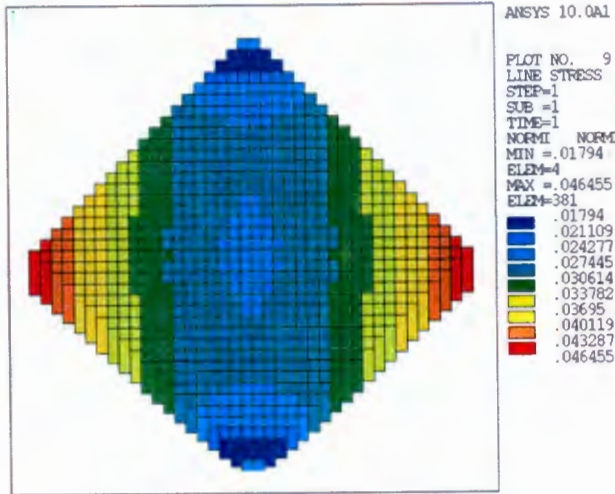


Fig 5.33 Tensiones en barras X (T)

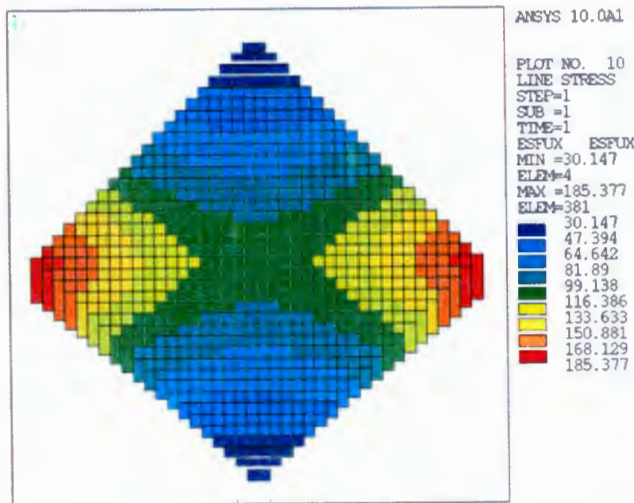


Fig 5.34 Esfuerzos en membrana X ( $T/m^2$ )

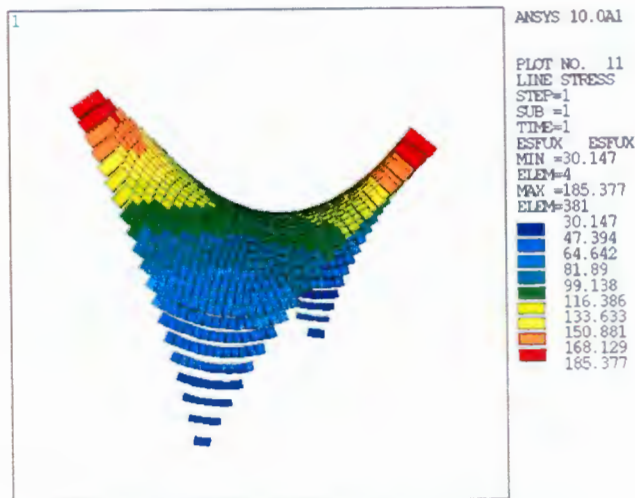
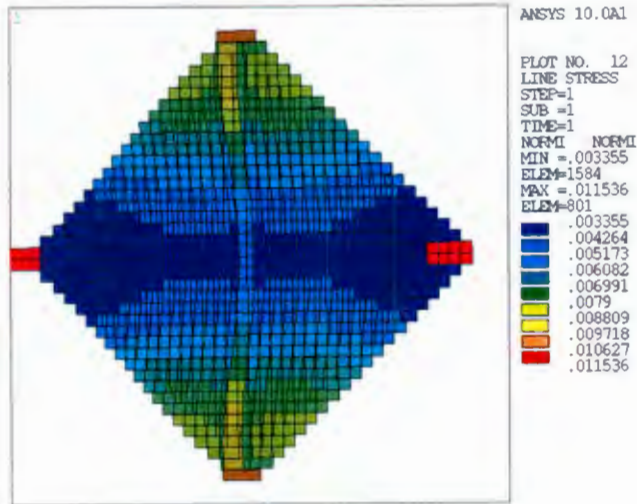
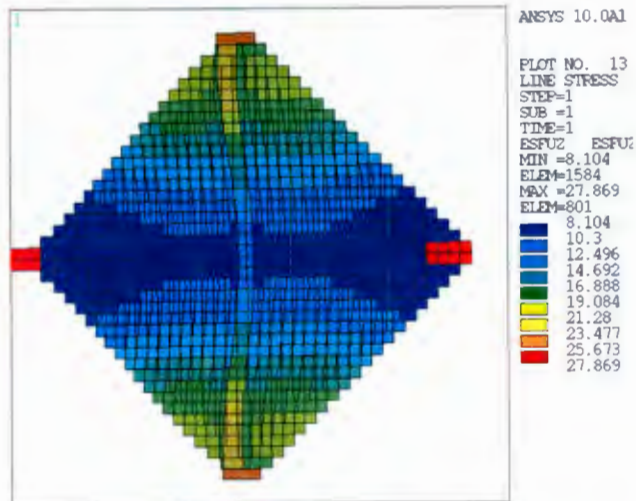


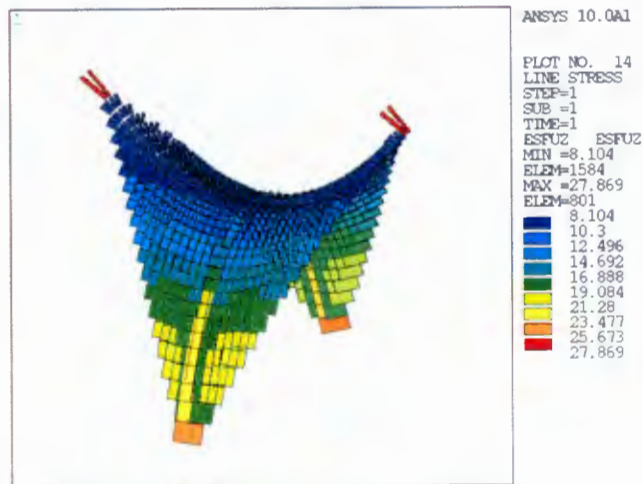
Fig 5.35 Esfuerzos en X. Perspectiva



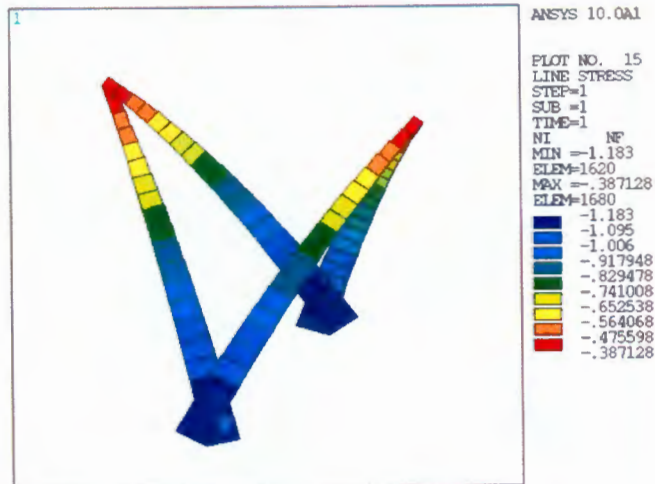
**Fig 5.36** Tensiones en barras Z (T)



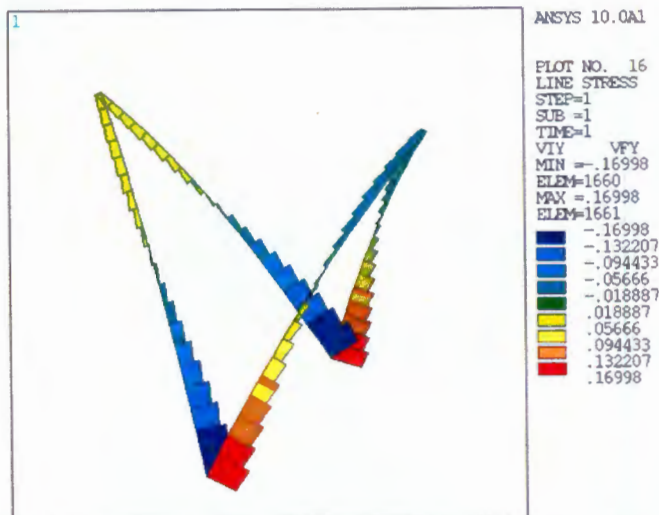
**Fig 5.37** Esfuerzos en Membrana Z (T/m2)



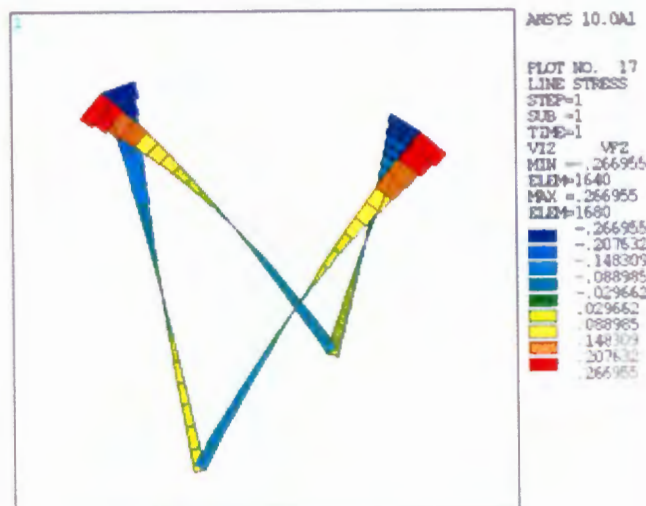
**Fig 5.38** Esfuerzos en membrana Z (T/m2)



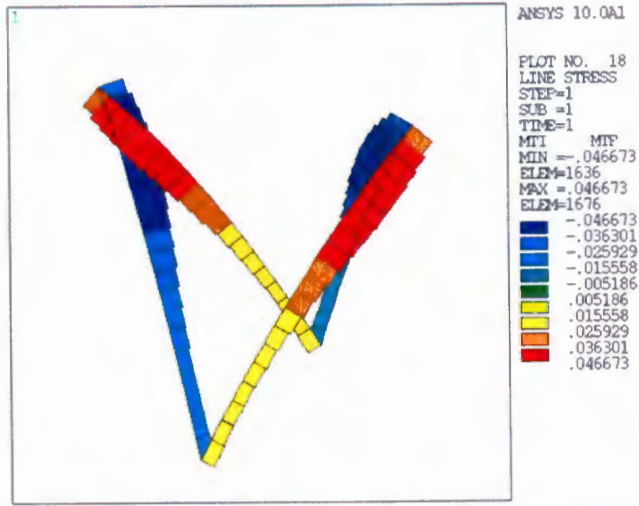
**Fig 5.39** Fuerzas normales en el tubo perimetral (T)



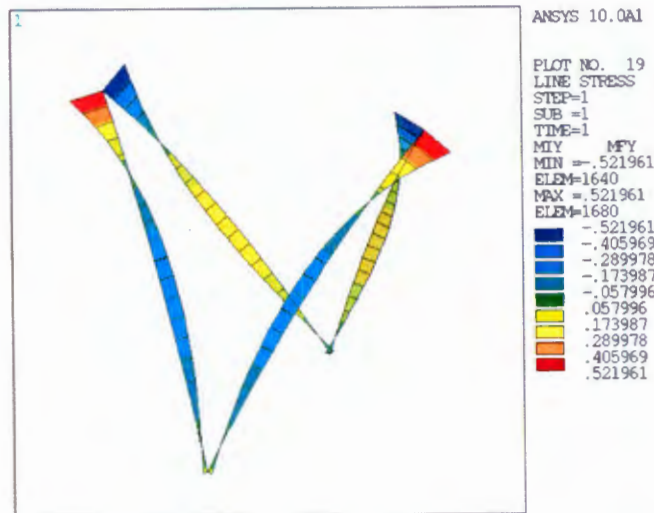
**Fig 5.40** Fuerzas cortantes Y en tubo perimetral (T)



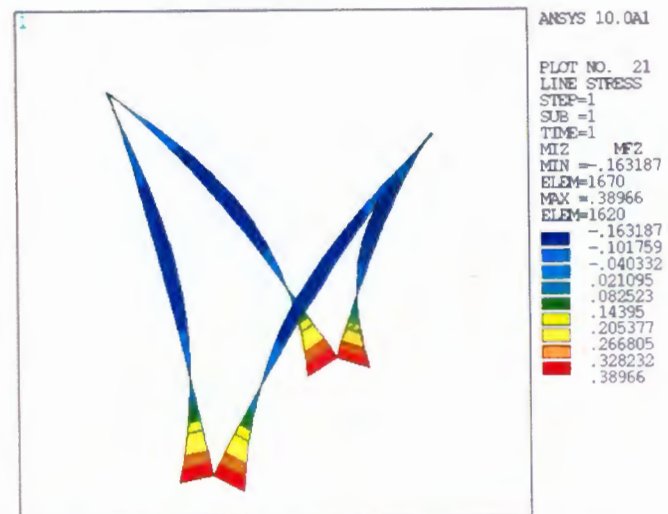
**Fig 5.41** Fuerzas cortantes Z en tubo perimetral (T)



**Fig 5.42** Momento torsionante en tubo perimetral (T-m)



**Fig 5.43** Momento flexionante Y en tubo perimetral (T-m)



**Fig 5.44** Momento flexionante Z en tubo perimetral (T-m)



## 5.4 Caso 2: Viento de frente

Para el caso 2 en el cual estamos aplicando cargas normales a la superficie suponemos una distribución variable del viento, el cual está dirigido en la dirección Z. La distribución del viento está dada como se muestra en la figura 4.3 y es aplicado por medio de una interpolación polinomial. Las dimensiones de este nuevo caso son las mismas que en el caso anterior donde aplicábamos cargas verticales: El modelo discreto también es exactamente el mismo que en el caso anterior.

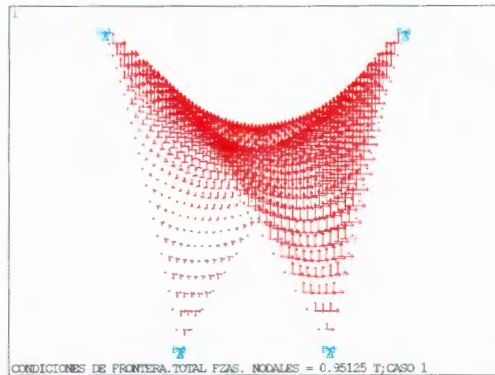


Fig 5.45 Condiciones de frontera y fuerzas nodales

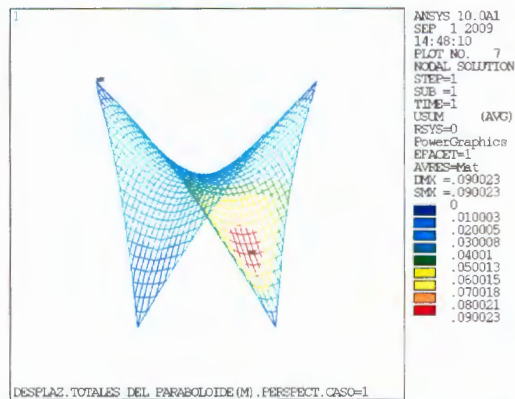


Fig 5.46 Desplazamientos totales del paraboloides (m) en perspectiva

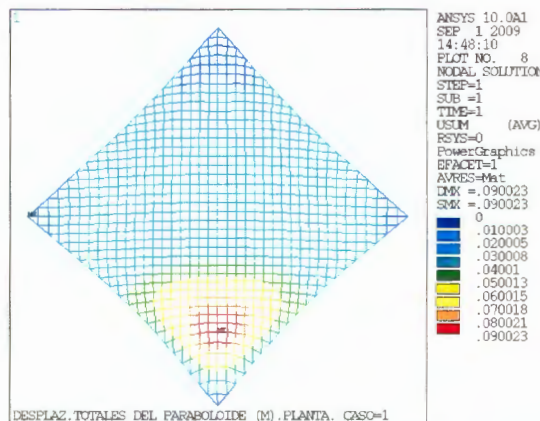
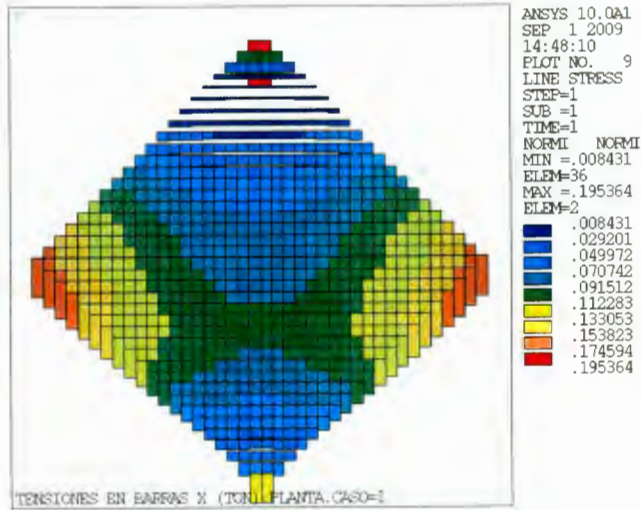
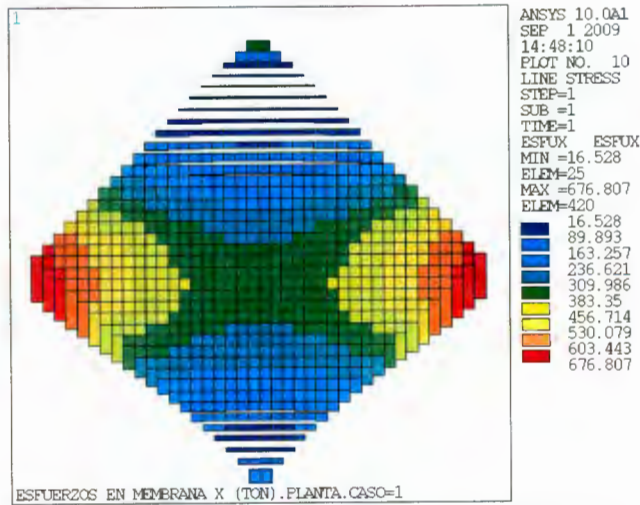


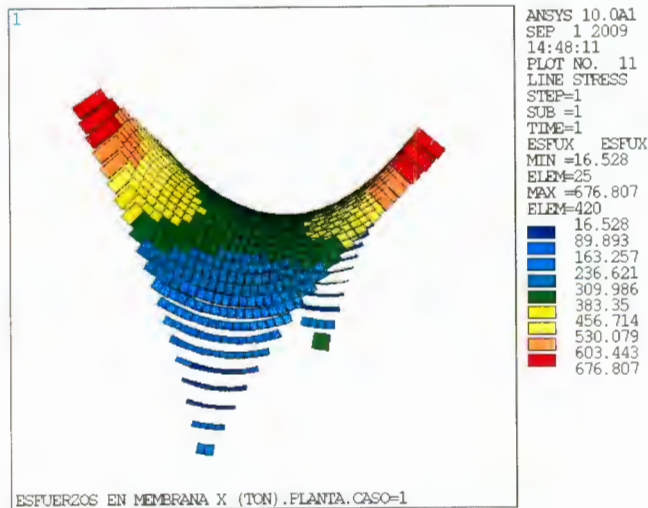
Fig 5.47 Desplazamientos totales del paraboloides (m) Planta



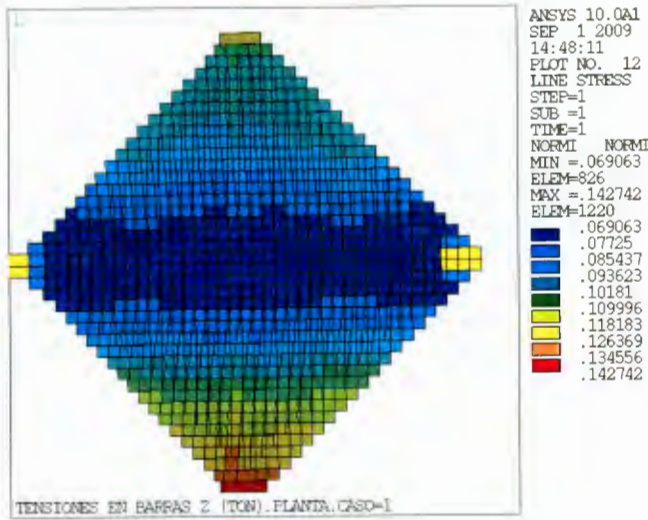
**Fig 5.48** Tensiones en barras X (T)



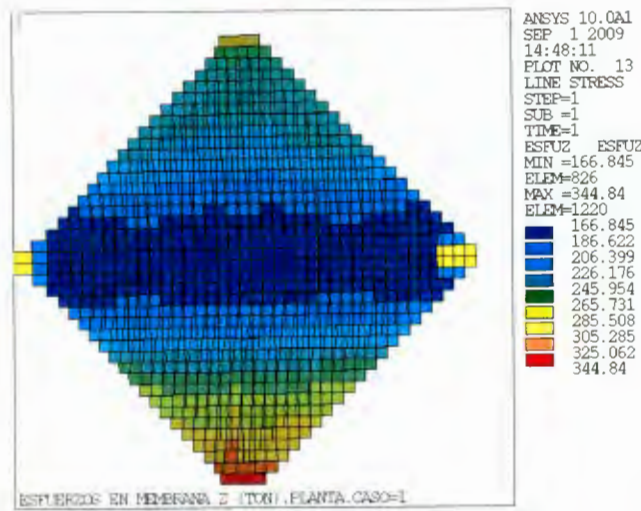
**Fig 5.49** Esfuerzos en membrana X (T/m2)



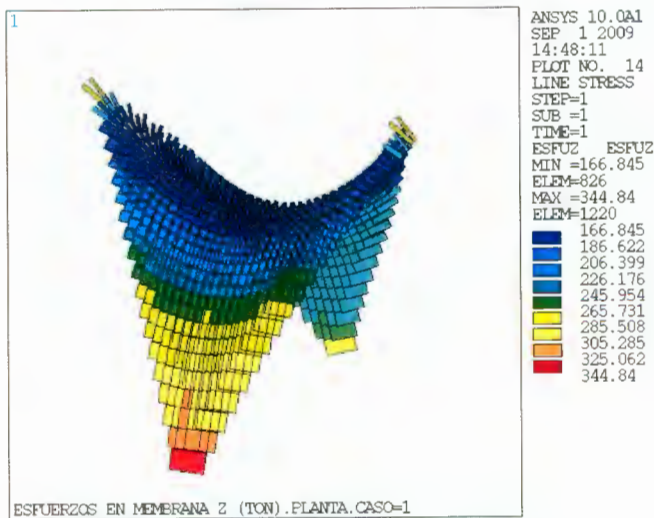
**Fig 5.50** Esfuerzos en X. Perspectiva



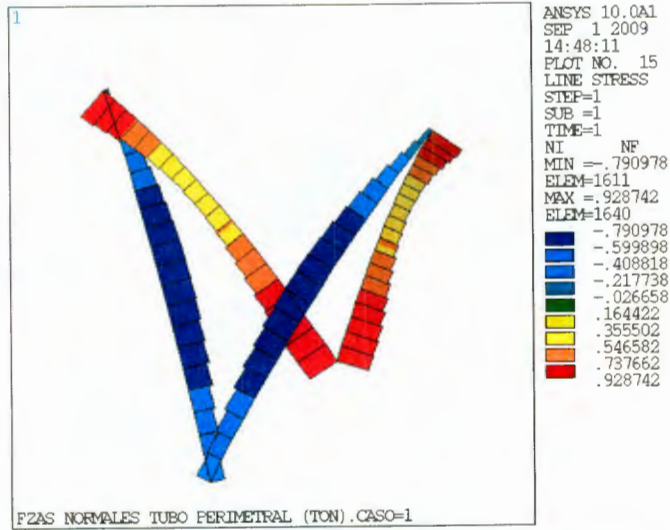
**Fig 5.51** Tensiones en barras Z (T)



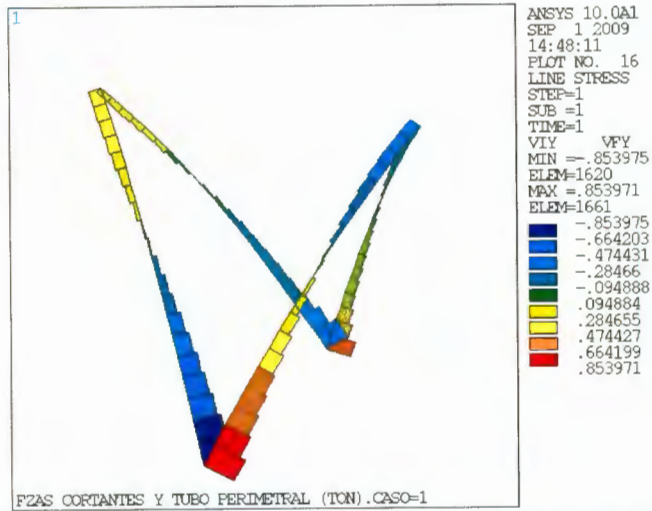
**Fig 5.52** Esfuerzos en Membrana Z (T/m<sup>2</sup>)



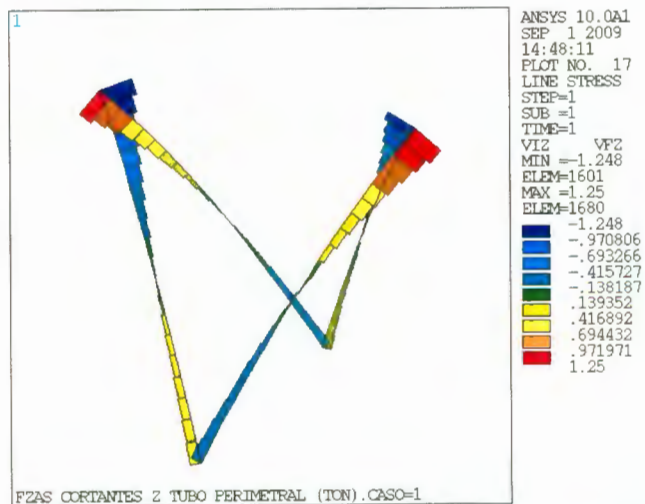
**Fig 5.53** Esfuerzos en membrana Z (T/m<sup>2</sup>)



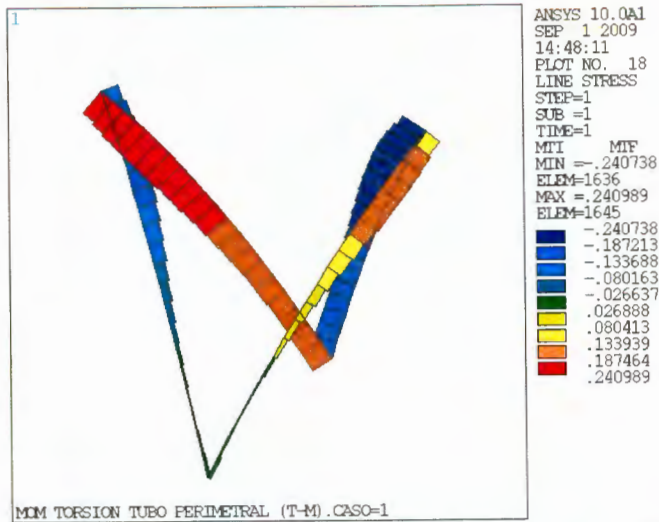
**Fig 5.54** Fuerzas normales en el tubo perimetral (T)



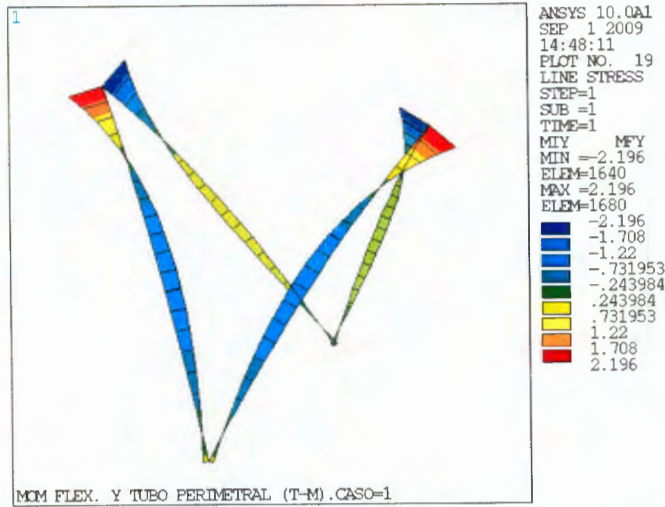
**Fig 5.55** Fuerzas cortantes Y en tubo perimetral (T)



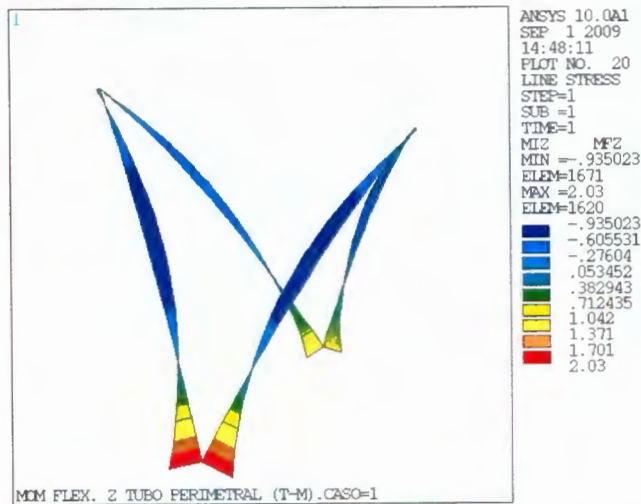
**Fig 5.56** Fuerzas cortantes Z en tubo perimetral (T)



**Fig 5.57** Momento torsionante en tubo perimetral (T-m)

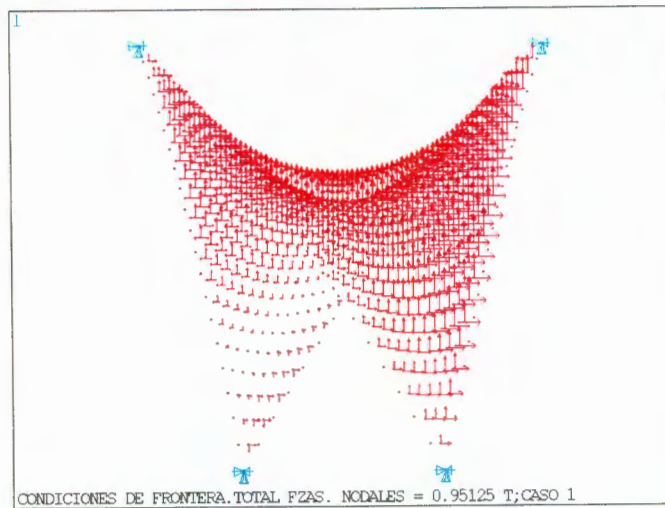


**Fig 5.58** Momento Flexionante Y en tubo perimetral (T-m)

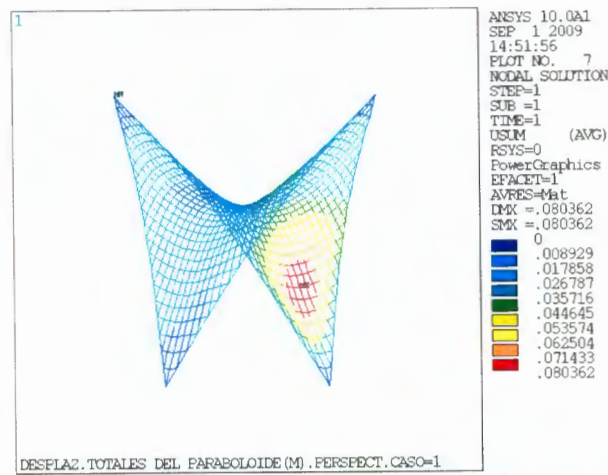


**Fig 5.59** Momento Flexionante Z en tubo perimetral (T-m)

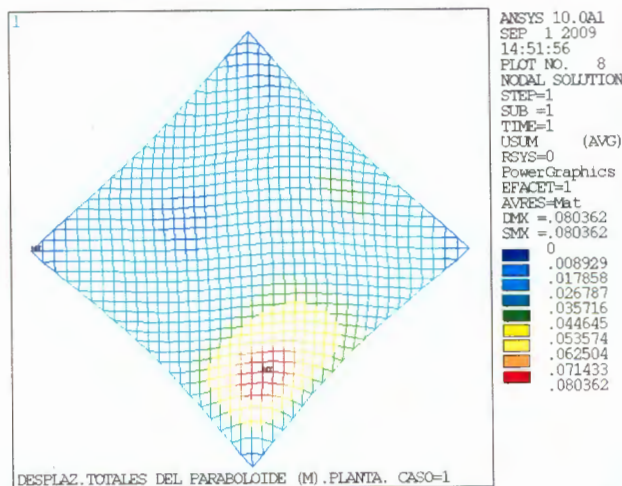
### 5.5 Caso 3: Viento de lado



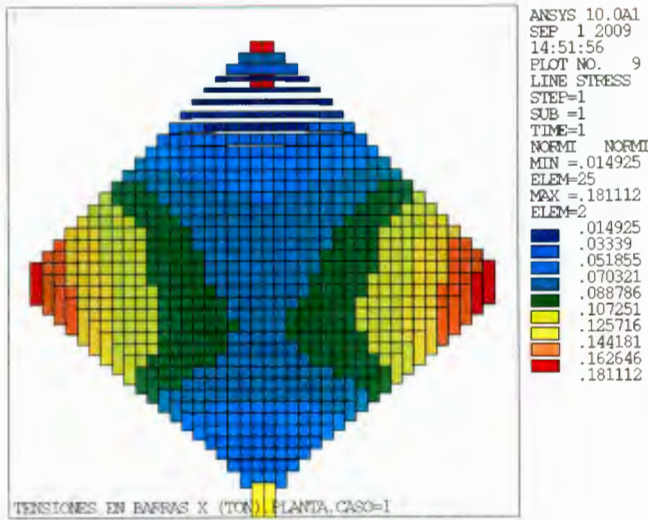
**Fig 5.60** Condiciones de frontera y fuerzas nodales



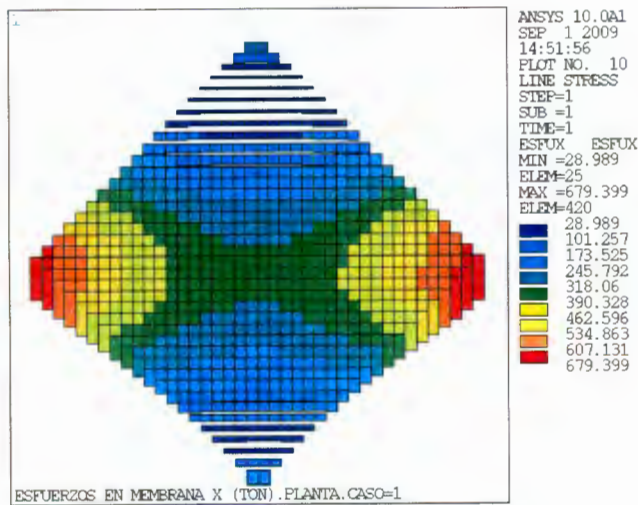
**Fig 5.61** Desplazamientos totales del paraboloides (m) en perspectiva



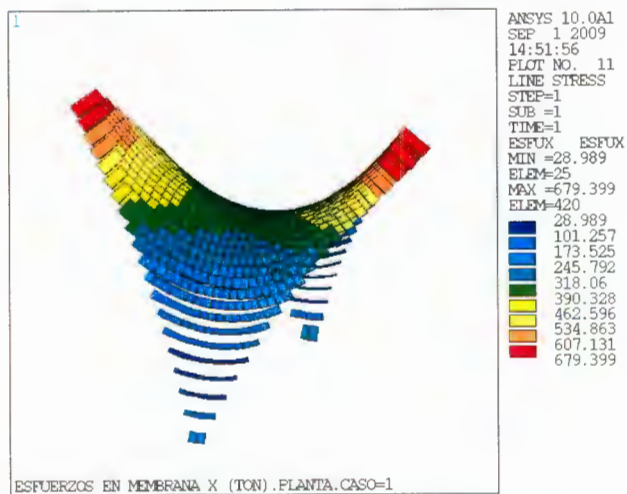
**Fig 5.62** Desplazamientos totales del paraboloides (m) Planta



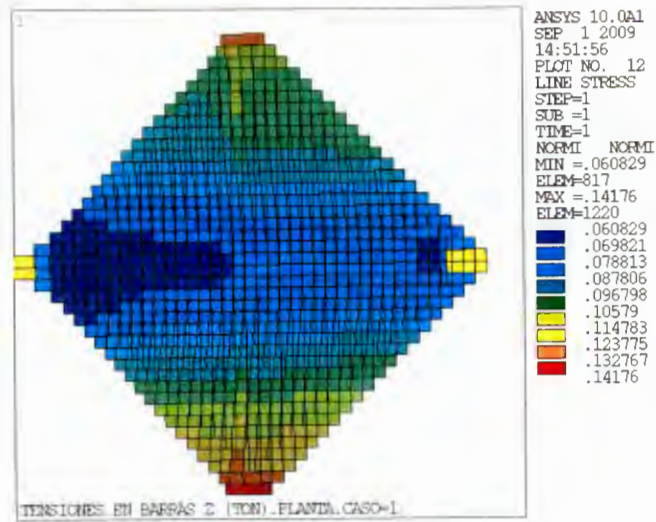
**Fig 5.63** Tensiones en barras X (T)



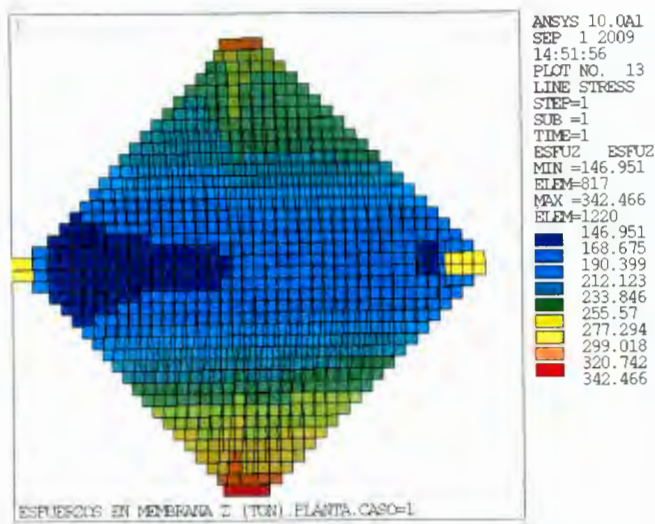
**Fig 5.64** Esfuerzos en membrana X ( $T/m^2$ )



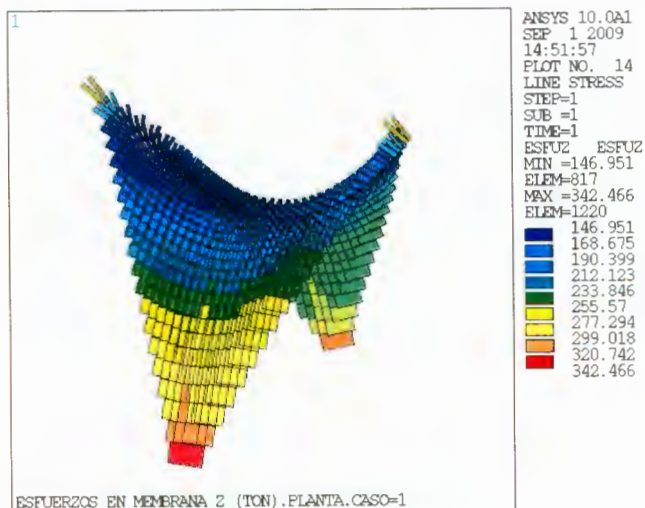
**Fig 5.65** Esfuerzos en X. Perspectiva



**Fig 5.66** Tensiones en barras Z (T)

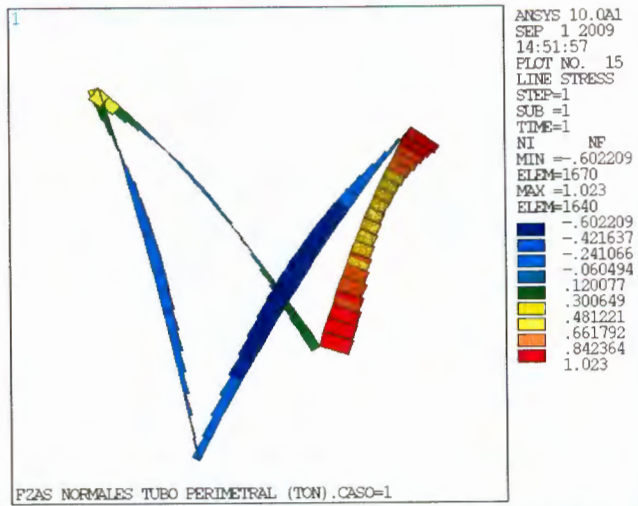


**Fig 5.67** Esfuerzos en Membrana Z (T/m2)

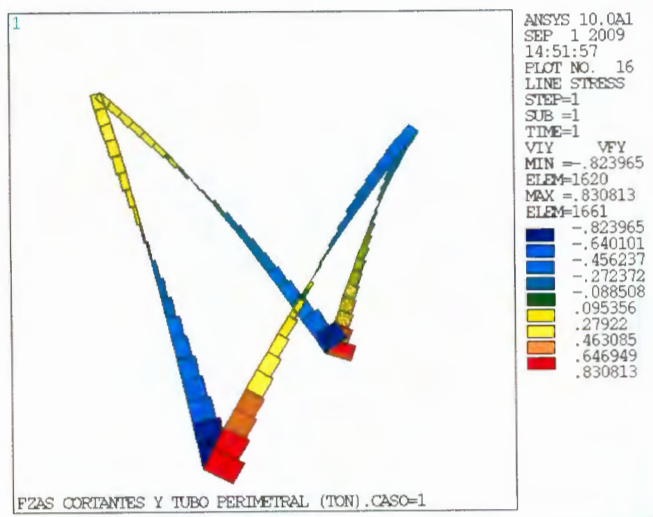


**Fig 5.68** Esfuerzos en membrana Z. Perspectiva

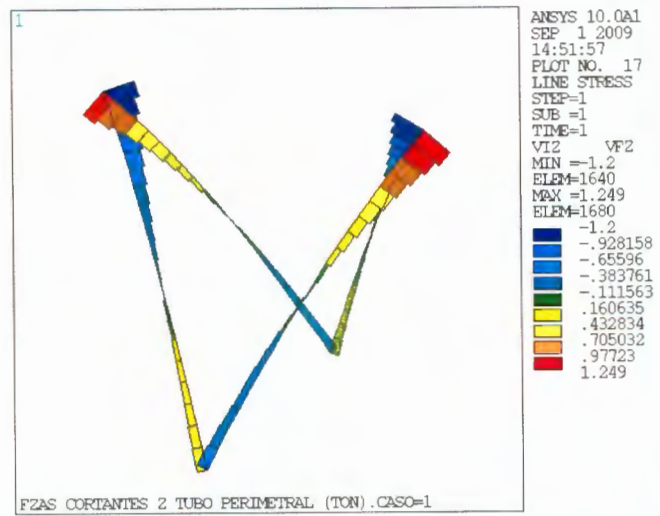




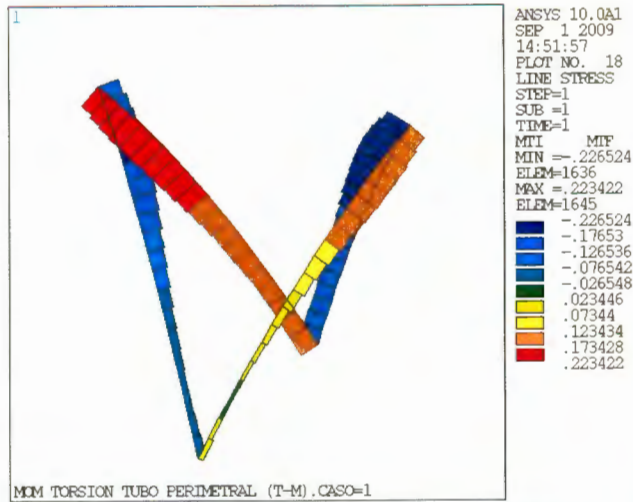
**Fig 5.69** Fuerzas normales en el tubo perimetral (T)



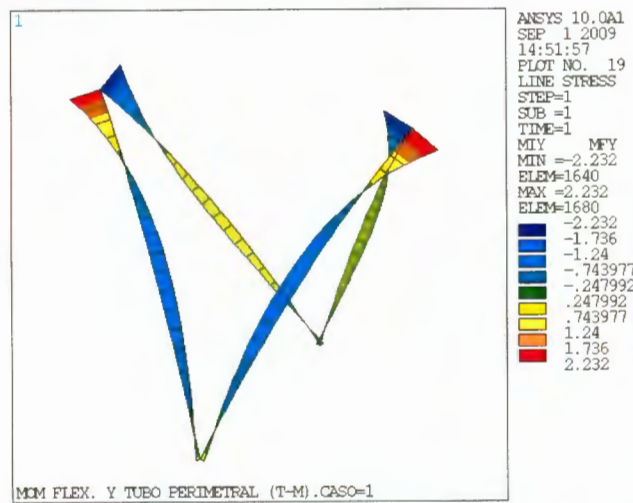
**Fig 5.70** Fuerzas cortantes Y en tubo perimetral (T)



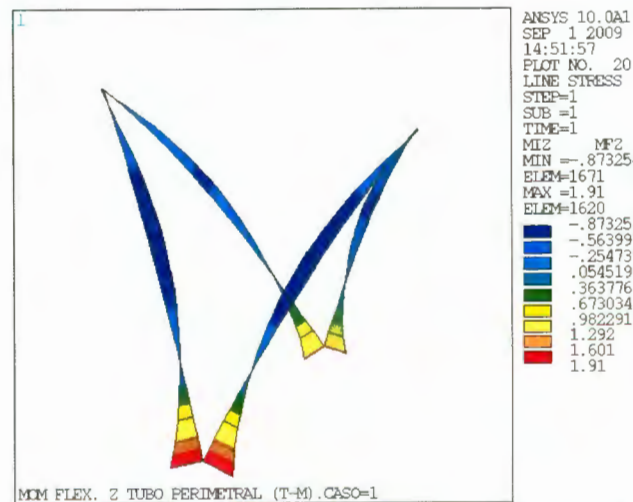
**Fig 5.71** Fuerzas cortantes Z en tubo perimetral (T)



**Fig 5.72** Momento torsionante en tubo perimetral (T-m)



**Fig 5.73** Momento Flexionante Y en tubo perimetral (T-m)



**Fig 5.74** Momento flexionante Z en tubo perimetral (T-m)

## Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

Es interesante ver la configuración de las tensiones así como de los esfuerzos en la estructura, ya que en el caso de convergencia a un estado de equilibrio adecuado luego de aplicadas las cargas se pueden apreciar franjas bien definidas de tensiones y esfuerzos de un orden similar. Para el caso en que las cargas llevan la dirección en el sentido de la gravedad, los mayores esfuerzos y tensiones están ubicados en la parte cercana al apoyo de las franjas en dirección X (de los apoyos altos). Esto era de esperarse ya que como se había mencionado anteriormente, en una superficie anticlástica, las cargas en dirección de la gravedad son transmitidas por medio de los elementos que cuelgan hacia los apoyos en la parte superior de la estructura. Las tensiones de trabajo son de un orden bastante bajo a comparación de la resistencia final, incluso si se habla de la resistencia a la que le aplicamos un factor de seguridad. Con respecto al tubo perimetral está bastante sobrado, ya que evaluando los valores de carga a compresión y momentos en ambas direcciones nos da un valor menor que 1. No hay que perder de vista que los resultados obtenidos vienen en parte de datos propuestos como el coeficiente de distribución de presiones que en la realidad podría tener un valor significativamente diferente al aquí empleado.

En este tipo de estructuras existen muchas variables a considerar para el diseño y es muy importante saber cómo afecta cada una. Hemos hecho aquí variaciones de la geometría, de los materiales para la membrana y la distribución y magnitud de las cargas empleadas. Estas son probablemente las variables que más afectan el resultado final de nuestro análisis. Tomando por ejemplo la variable de la geometría, para el caso de una lonaria muy alta los esfuerzos se reducen; esto puede entenderse si se analiza un cable de gran longitud como los de las torres eléctricas. Mientras mayor sea la diferencia de alturas entre el punto más bajo del cable con el apoyo más alto las tensiones se reducen en la parte baja y aumentan en la alta. En cambio, si quisiéramos hacer que el cable estuviese casi horizontal se presentarían grandes fuerzas resistentes en las torres. Por lo visto es el caso de las características mecánicas del material el que arroja una gama más amplia de resultados, y es el módulo de elasticidad el principal factor que afecta en el diseño, ya que con un módulo de elasticidad alto también deberán ser así los presfuerzos para lograr una rigidez adecuada del conjunto. Con presfuerzos altos, los esfuerzos en los tubos perimetrales también aumentan.

Enfocándonos en la estructura soportante, la variación de los esfuerzos en el tubo perimetral siempre son de carácter lineal (como era de esperarse) y se puede apreciar claramente que conforme aumentamos los presfuerzos, los esfuerzos internos del tubo aumentan de forma lineal; con una extrapolación nos daríamos cuenta que si tendemos los límites a un presfuerzo de cero, los esfuerzos en el tubo también tenderían casi a cero. Esto excepto en el caso de las fuerzas normales, ya que ahí se nota más claramente el efecto del peso propio del tubo.

El análisis arroja que dadas las características de los materiales, la forma de nuestra estructura, los niveles de presfuerzos y la propuesta de cargas, hacen viables la construcción de nuestra estructura.

# Bibliografía

1. Makowski, Estructuras Espaciales de Acero. 2ª Ed. España, Barcelona. 1972
2. Gere – Timoshenko, Mecánica de Materiales. 4ª Ed. México, International Thomson Ed. 1997. 1-187, 267-283
3. Harold C. Martin – Graham F Carey. Introduction to Finite Element Analysis. Theory and Application. USA, Mc Graw Hill, 1973.
4. Bin-Bing Wang, Cable- Strut Systems: Part II – Tensegrity. Tower Center of Space Structures Technology Development, Xu Zhou Tower Group Corporation, Xu Zhou 2211007, China. Oct, 1997.
5. Cornel Sultan - Robert Skelton, Deployment of tensegrity structures. Medical School, Harvard University, Boston, MA 02115, USA b University of California, La Jolla, CA 92093-0411, USA 30 April 2003.
6. Sánchez Casanova A. (2007). Análisis de una estructura minimalista en base a una metodología de optimización no-lineal. Tesis de Maestría en ciencias en construcción. DEPMI, Universidad Autónoma de Querétaro. Mex.
7. Horta Rangel J.; et.all. (2008). “Analysis of a catenoid fabric shell by means of coupled mechanical-optimization model”. Sent to the ASCE Journal.
8. Uehara H. (2007). “Propuesta de una estructura osculante con membrana catenoid”. Congreso Internacional de estructuras espaciales. Venecia, Italia.
9. Ansys Inc. Software, ver.10, 2007
10. Milenko Masic, Robert E. Skelton, Philip E. Gill, Optimization of tensegrity structures. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California San Diego, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0411, United State, March 2005.
11. Bathe K.J. (1982). Finite element procedures in engineering analysis. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ
12. Manual of Steel Construction. AISC, (2005). Chicago, Ill, USA
13. Frangopol D., Cheng F. (1997). Advances in structural optimization. Published by the American society of civil engineers. New York.

14. Manual de diseño de obras civiles. Comision Federal de Electricidad. Estructuras. C. 14 Diseño por viento. Instituto de Investigaciones Electricas.
15. Itoh Kohichi, Tanaka Kontaro, and Ohuchi Yoshiaki., (1986) “An experimental study on tension characteristics of suspension membranes”. Shell Membranes and space frames. Proceedings IASS symposium, Osaka, vol. 2. Elsevier Science Publisher, Amsterdam
16. Ishii Kazuo. “Stress concentration for fabric membrane structures”. Shell Membranes and space frames. Proceedings IASS symposium, Osaka, 1986, vol. 2. Elsevier Science Publisher, Amsterdam
17. Ishizu Nobuhiko, Minami Hirokazu. (1986), “A method of measurement of actual membrane tensile stress”. Shell Membranes and space frames. Proceedings IASS symposium, Osaka, vol. 2. Elsevier Science Publisher, Amsterdam
18. Shaeffer R.E. Tensioned Fabric Structures. Task Committee on Tensioned Fabric Structures. American Society of Civil Engineering, E.U.A.,1996
19. Normas Técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito federal. (NTCRCDF), 2004
20. Kolousek V.; Pirner M.; Fisher O.; Naprstek J. Wind effects on Civil engineering structures. Czechoslovak Academy of sciences. Elsevier, 1984
21. Marikje Mollaert (ed). The Design of membrane and lightweight structures. Proceedings of the symposium at the Vrije Universiteit Brussel. September 15, 2000. Bruselas
22. Jesús Fernando Valdez Vázquez (2008). Análisis dinámico por viento de una estructura minimalista. Tesis de Maestría en ciencias en estructuras. DEPMI, Universidad Autónoma de Querétaro. Mex.
23. The Dymaxion World of Buckminster Fuller (1960, 1973) coauthor Robert Marks
24. Busch, Julia M., A decade of Sculpture: the New Media in the 1960's. London, (1974)
25. Wind load of Structures (2001) John D. Holmes. USA
26. Marijke Mollaert, John Chilton, Mike Barnes, et. al. (2003). Designing Tensile Architecture. TensiNet Symposium. Vrije Universiteit Brussel. Brussel, Bel.

# Anexos

## Anexo 1. Programa Lonaria. Caso 1. Cargas en sentido de la gravedad

```
*CREATE,INICIO

/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
!*

/UIS,MSGPOP,3

/prep7

CONT=1
S=1
N=0
*ASK, FOTOS,DESEA LA IMPRESION DE RESULTADOS (S/N),1
*IF,FOTOS,EQ,1,THEN
JPGPRF,500,100,1
/SHOW,JPEG
*ELSE
*ENDIF

/COM,TENSIONES SUGERIDAS DE PRESFUERZO EN
MEMBRANAS: 1-4 kN/M
/COM,SE SUGIERE AJUSTAR MODULOS Y RESISTENCIA DE
MEMBRANA

multipro,'start',7
*cset,1,3,L,'LONGITUD (M) =',12
*cset,4,6,AN,'ANCHO (M) =',10
*cset,7,9,HS,'ALTURA SUPERIOR (M)',5.0
*cset,10,12,HI,'ALTURA INFERIOR (M)',6
*cset,13,15,SEPX,'SEPARACION EN X (PLANTA)(M)',0.5
*cset,16,18,SEpz,'SEPARACION EN Z (PLANTA)(M)',0.5
*cset,19,21,WT,'CARGA DE DISEÑO (T/M2)',0.020
MULTIPRO,'END'

/COM,FUERZA A APLICAR EN UN NODO INTERNO

FNODE=WT*SEPX*SEpz

multipro,'start',7
*cset,1,3,PESPM,'PESO VOLUM MEMBRANA (T/M3)',0.8
*cset,4,6,MODULX,'MODULO ELAST MEMBR X (T/M2)
=',750000
*cset,7,9,MODULZ,'MODULO ELAST MEMBR Z (T/M2)',750000
*cset,10,12,TMEM,'ESPESOR MEMBRANA (M)',1E-03
*cset,13,15,MPOIM,'MODULO DE POISSON',0.20
*cset,16,18,PREX,'PRESFUERZO X (TON/M2)',500
*cset,19,21,PREZ,'PRESFUERZO Z (TON/M2)',500
MULTIPRO,'END'

/COM,DENSIDAD DE LA MEMBRANA
DENSIDM=PESPM/9.81

multipro,'start',6
```

```
*CSET,1,3,PESPT,'PESO VOLUM TUBO PERIM (T/M3)',7.8
*cset,4,6,MODTUB,'MODULO ELAST TUBO (T/M2) =',2.1E+07
*cset,7,9,DTUBO,'DIAMETRO EXT TUBO (M)',0.168
*cset,10,12,ESPTUBO,'ESPESOR TUBO (M)',0.012
*cset,13,15,MPOIT,'MODULO DE POISSON',0.20
*cset,16,18,CETUB,'COEF EXP TERM',12e-06
MULTIPRO,'END'
```

```
DENSIDT=PESPT/9.81
```

```
/COM,NOTA IMPORTANTE: LOS ESFUERZOS PREX PREY QUE
GENERAN A SU VEZ LAS DEFORMACIONES
/COM,SE INDICAN AQUI EN TERMINOS DE PROYECCION X-Y
POR SU FACIL MANEJO
/COM,ESTO IMPLICA QUE LAS DEFORMACIONES REALES
APLICADAS A LOS CABLES EQUIVALENTES
/COM,SERAN UN POCO DISTINTAS. POR EJEMPLO LOS
CABLES X MAS ALEJADOS TENDRAN UNA
/COM,SEPARACION Z MAYOR QUE GENERA UN AREA MAYOR
Y POR TANTO SERIA EQUIVALENTE
/COM,A UN ESFUERZO MENOR PREX APLICADO.
```

```
/COM,DATOS DEL ELEMENTO A USAR PARA LOS CABLES
EQUIVALENTES
```

```
ET,1,LINK8
```

```
MP,EX,1,MODULX
MP,PRXY,1,MPOIM
MP,DENS,1,DENSIDM
```

```
MP,EX,2,MODULZ
MP,PRXY,2,MPOIM
MP,DENS,2,DENSIDM
```

```
/COM, DATOS DEL ELEMENTO A USAR PARA EL TUBO
PERIMETRAL
ET,2,BEAM4
```

```
/COM,DATOS GEOMETRICOS DEL TUBO SOPORTE
PERIMETRAL
```

```
DTUBOI=DTUBO-2*ESPTUBO
```

```
ATUBO=(3.1416/4)*(DTUBO**2-DTUBOI**2)
IYTUBO=(3.1416/64)*(DTUBO**4-DTUBOI**4)
IXTUBO=2*IYTUBO
```

```
MP,EX,3,MODTUB
MP,PRXY,3,MPOIT
MP,DENS,3,DENSIDT
MP,ALPX,3,CETUB
```

```
/COM,MALLADO TUBO (TYPE 2 REAL MAT 3)
/COM,MALLADO MEMBRANA EQ. CABLES (TYPE 1 REAL
MAT 1-2)
```

```
/COM,GENERACION DEL PARABOLOIDE HIPERBOLICO
```

```
A=L/(2*SQRT(HS))
B=AN/(2*SQRT(HI))
```

```
SUM=1
```

```
/PNUM,KP,0
/PNUM,LINE,0
/PNUM,AREA,0
/PNUM,NUMBER,1
```

```
*DO,IX,-L/2,L/2,SEPX
*DO,IZ,-AN/2,AN/2,SEpz
Y=(IX**2/A**2)-(IZ**2/B**2)
K,SUM,IX,Y,IZ
SUM=SUM+1
*ENDDO
```

```

*ENDDO
/COM,DIMENSIONAMOS LINEAS HTALES Y VERT
NLH=L/SEPX
NLV=AN/SEPX

*do,JX,-L/2,L/2,SEPX
ksel,s,loc,x,JX
SPLINE,ALL
KSEL,ALL
*ENDDO

*GET,TOTLV,LINE,,NUM,MAX

*DO,JZ,-AN/2,AN/2,SEPX
KSEL,S,LOC,Z,JZ
SPLINE,ALL
KSEL,ALL
*ENDDO

*GET,TOTL,LINE,,NUM,MAX

/VIEW,1,1,1,1

/TITLE,PARABOLOIDE HIPERBOLICO.LONGX=%L% M;
ANCHOZ=%AN% M; ALT.SUP=%HS% M; CASO %CONT%
LPLOT
/TITLE,ALT.INF=%HI% M ;PLANTA: SEPX=%SEPX% M
;SEPX=%SEPX% M; CASO %CONT%
LPLOT

*END

*CREATE,ROMBO

/com,generamos areas con lineas

*DO,J,1,NLV,1
AL,J,TOTLV+NLH*(J-1)+1,NLV+J,TOTLV+J*NLH+1
*DO,I,1,NLH-1,1
AL,I*NLV+J,TOTLV+NLH*(J-
I)+(I+1),(I+1)*NLV+J,TOTLV+NLH*J+(I+1)
*ENDDO
*ENDDO

*GET,ATOTL,AREA,,NUM,MAX

/COM,CORTE DEL AREA GENERADA MEDIANTE EL
WORKPLANE
DISTZ=(AN/2)*(SQRT(2))/2
DISTX=DISTZ
HIP=AN/SQRT(2)
wpstyle,1,10,-10,1,0.003,0,0,,5
WPSTYLE,,,,,,,,,1

wpro,,,-45
wpof,,DISTZ
wpof,DISTX
ASBW,ALL

wpro,,,-90
ASBW,ALL

WPOF,-HIP
wpro,,90
ASBW,ALL

WPOF,-HIP
wpro,,90
ASBW,ALL

WPSTYLE,,,,,,,,,0

ASEL,S,LOC,X,-AN/2,AN/2
ASEL,INVE

ADELE,ALL,,,1
ASEL,ALL

/COM,GENERAMOS UN NUEVO SISTEMA LOCAL (11)
CARTESIANO A 45 GRADOS
LOCAL,11,0,,,,,45

ASEL,S,LOC,X,-DISTX,DISTX
ASEL,R,LOC,Z,-DISTZ,DISTZ

ASEL,INVE
ADELE,ALL,,,1
ASEL,ALL

/VIEW,1,0.5,,1
/TITLE,SECCION ROMBOIDAL DEL PARABOLOIDE
HIPERBOLICO.LX=LZ=%AN% CASO %CONT%
APLOT
/TITLE,ESF. INIC. X=%PREX% T/M2 ; ESF. INIC. Z = %PREZ%
T/M2; CASO %CONT%
APLOT

CSYS,0

*END

*create,NUEVOS_REALES

/COM,GENERAMOS UN VECTOR DE LOGITUDES DE LAS
LINEAS CENTRALES
/COM,INICIAMOS CON LA BARRA CENTRAL Z=0

LSEL,S,LOC,Z,0
*GET,NUMLZ,LINE,0,COUNT
*GET,LZMAX,LINE,,NUM,MAX
*DIM,LINZ,,NUMLZ

*DO,I,1,NUMLZ,1
*GET,LINZ(I),LINE,I+LZMAX-NUMLZ,LENG
*ENDDO
LSEL,ALL
/COM,LONGITUDES LINZ=(SEPX)NUEVO

/COM,AHORA LAS LONGITUDES DE LAS BARRAS CENTRALES
X=0
LSEL,S,LOC,X,0
*GET,NUMLX,LINE,0,COUNT
*GET,LXMAX,LINE,,NUM,MAX
*DIM,LINX,,NUMLX

*DO,I,1,NUMLX,1
*GET,LINX(I),LINE,I+LXMAX-NUMLX,LENG
*ENDDO
LSEL,ALL
/COM,LONGITUDES LINX=(SEPX)NUEVO

/COM,NUEVAS AREAS

*DIM,ARX,,NUMLX-1
*DIM,ARZ,,NUMLZ-1

*DO,I,1,NUMLX-1,1
ARX(I)=TMEM*(LINX(I)+LINX(I+1))/2
*ENDDO

*DO,I,1,NUMLZ-1,1
ARZ(I)=TMEM*(LINZ(I)+LINZ(I+1))/2
*ENDDO

/COM,ASIGNACION DE LOS REALES CORRESPONDIENTES A
LOS CABLES

DEFORX=PREX/MODULX
DEFORZ=PREZ/MODULZ

```

```

*DO,I,1,NUMLX-1,1
R,I,ARX(I),DEFORX
*ENDDO

*DO,I,1,NUMLZ-1,1
R,NUMLX+I-1,ARZ(I),DEFORZ
*ENDDO

R,NUMLX+NUMLZ-
1,ATUBO,IYTUBO,IYTUBO,DTUBO,DTUBO,0
RMORE,,IXTUBO,2,2

save,ROMBO1

*END

*CREATE,NSECC

/com,con el fin de no volver otra vez a correr la geometria (que tarda)
aqui se podria modificar las propiedades de los elementos si se desea por
ejemplo propongamos otra seccion tubo y otros presfuerzos en x-z
introduciremos entonces aqui una opcion para proceder necesitamos
primero generar los nuevos reales que vamos a sustituir

/PREP7

multipro,'start',7
*CSET,1,3,PREX,'NUEVO PRESFUERZO X (TON/M2)',500
*CSET,4,6,PREZ,'NUEVO PRESFUERZO Z (TON/M2)',500
*CSET,7,9,MODULX,'NUEVO MODULO ELAST MEMBR X
(T/M2)',750000
*CSET,10,12,MODULZ,'NUEVO MODULO ELAST MEMBR Z
(T/M2)',750000
*CSET,13,15,DTUBO,'DIAMETRO EXT TUBO (M)',0.168
*CSET,16,18,ESPTUBO,'ESPESOR TUBO (M)',0.012
*CSET,19,21,WT,'NUEVA CARGA DE DISEÑO (T/M2)',0.020
MULTIPRO,'END'

FNODE=WT*SEPX*SEpz

DEFORX=PREX/MODULX
DEFORZ=PREZ/MODULZ

*DO,I,1,NUMLX-1,1
R,I,ARX(I),DEFORX
*ENDDO

*DO,I,1,NUMLZ-1,1
R,NUMLX+I-1,ARZ(I),DEFORZ
*ENDDO

DTUBOI=DTUBO-2*ESPTUBO

ATUBO=(3.1416/4)*(DTUBO**2-DTUBOI**2)
IYTUBO=(3.1416/64)*(DTUBO**4-DTUBOI**4)
IXTUBO=2*IYTUBO

R,NUMLX+NUMLZ-
1,ATUBO,IYTUBO,IYTUBO,DTUBO,DTUBO,0
RMORE,,IXTUBO,2,2

*END

*CREATE,LCON
/COM,EXTRAEMOS EL CONTADOR
*DIM,CONTAD,,1
*VREAD,CONTAD,ESCALAR,,,1
(1F4.2)
CONT=CONTAD(1)
*END

*CREATE,MALLADO

*IF,CONT,GT,1,THEN
/VIEW,1,0.5,,1
/TITLE,NUEVOS DATOS DEL PARABOLOIDE HIPERBOLICO.
DIAM.TUBO=%DTUBO% CASO %CONT%
APLOT
/TITLE,ESF.INI.X=%PREX%/M2;ESF.INI.Z=%PREZ%/M2;MOD
X=%MODULX%;MODZ=%MODULZ%;CASO%CONT%
APLOT

*ELSE
*ENDIF

/COM,MALLADO TUBO (TYPE 2 REAL MAT 3)
/COM,MALLADO MEMBRANA EQ. CABLES (TYPE 1 REAL
MAT 1-2)
/COM,MALLADO DE LAS LINEAS X

TYPE,1
MAT,1
LESIZE,ALL,,,1

LSEL,S,LOC,Z,-AN/2+SEpz
REAL,1
LMESH,ALL

*DO,I,2,AN/SEpz-1,1
LSEL,A,LOC,Z,-AN/2+I*SEpz
REAL,I
LMESH,ALL
*ENDDO

*GET,EL1,ELEM,0,COUNT
*GET,EL1MAX,ELEM,,NUM,MAX

LSEL,ALL

/COM,MALLADO DE LAS LINEAS Z

TYPE,1
MAT,2
LESIZE,ALL,,,1

LSEL,S,LOC,X,-AN/2+SEpX
REAL,NUMLX
*DO,I,2,AN/SEpX-1,1
LSEL,A,LOC,X,-AN/2+I*SEpX
REAL,NUMLX+I-1
*ENDDO

LMESH,ALL

*GET,EL2,ELEM,0,COUNT
*GET,EL2MAX,ELEM,,NUM,MAX

LSEL,ALL

/COM,MALLADO DEL TUBO EXTERIOR
CSYS,11

LSEL,S,LOC,X,-DISTX
LATT,3,NUMLX+NUMLZ-1,2,,,,
LESIZE,ALL,,,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL

LSEL,S,LOC,X,DISTX
LATT,3,NUMLX+NUMLZ-1,2,,,,
LESIZE,ALL,,,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL

LSEL,S,LOC,Z,-DISTZ
LATT,3,NUMLX+NUMLZ-1,2,,,,
LESIZE,ALL,,,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL

```



```

LSEL,S,LOC,Z,DISTZ
LATT,3,NUMLX+NUMLZ-1,2,...
LESIZE,ALL,...,1
LMESH,ALL
LSEL,ALL

ESEL,S,MAT,,3
*GET,EL3,ELEM,0,COUNT
ESEL,ALL

CSYS,0

NLINK=EL1+EL2
/PNUM,ELEM,1
/NUMBER,1
/VIEW,1,0.5,,1
/TITLE,MODELO DISCRETO %EL3% ELEMENTOS BEAM4:
%NLINK% ELEMENTOS LINK8. CASO %CONT%
EPLOT

*END

*CREATE,ANALISIS

FINISH
/SOLU
ANTYPE,0
SSTIF,ON
nsubst,1
AUTOTS,ON
SOLCONTROL,ON
OUTRES,BASIC,LAST
/COM,CONVERGENCIA PARA EL ANALISIS DE PRESFUERZO
CNVTOL,U,..001,..0.0001
CNVTOL,F,..001,..0.001

/COM,RESTRICCION EN DESPLAZAMIENTOS NOTA
REQUERIMOS IDENTIFICARLOS PARA USO POSTERIOR

NSEL,S,LOC,X,-AN/2
*GET,NRX1,NODE,0,NUM,MAX
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,X,AN/2
*GET,NRX2,NODE,0,NUM,MAX
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,-HI
NSEL,R,LOC,Z,-AN/2
*GET,NRZ1,NODE,0,NUM,MAX
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,-HI
NSEL,R,LOC,Z,AN/2
*GET,NRZ2,NODE,0,NUM,MAX
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL

/COM,ACTIVAMOS PESO PROPIO
ACEL,..9.81
/COM,APLICAREMOS AHORA LAS CARGAS VERTICALES EN
NODOS

```

```

CSYS,11

NSEL,S,LOC,X,-DISTX+0.1,DISTX-0.1
NSEL,R,LOC,Z,-DISTZ+0.1,DISTZ-0.1
*GET,NTOT1,NODE,0,COUNT

/COM,COMIENZA INTRODUCCIÓN DE CARGAS

F,ALL,FY,-FNODE
NSEL,ALL

/COM,TERMINA INTRODUCCIÓN DE CARGAS

FTOTA=NTOT1*FNODE

/COM,CSYS,0

/PBC,U,,1
/PBC,ROT,,1
/PBC,F,,1
/VSCALE,0.2
/TITLE,CONDICIONES DE FRONTERA.TOTAL FZAS. NODALES
=%FTOTA% T.CASO %CONT%
NPLOT

SOLVE
FINISH

*END
*create,postproceso

/POST1

/COM,SOLICITAMOS EL RESULTADO DE LA ULTIMA
ITERACION
SET,LAST

/COM,ALMACENAMOS AHORA LAS FUERZAS NORMALES DE
LOS CABLES EQUIV

ESEL,S,MAT,,1
ETABLE,NORMI,SMISC,1
ETABLE,ESFUX,LS,1
ESEL,ALL

ESEL,S,MAT,,2
ETABLE,NORMI,SMISC,1
ETABLE,ESFUZ,LS,1
ESEL,ALL

/COM,ALMACENAREMOS AHORA LAS FUERZAS Y
MOMENTOS DEL TUBO PERIMETRAL

ESEL,S,MAT,,3
ETABLE,NI,SMISC,1
ETABLE,NF,SMISC,7
ETABLE,VII,SMISC,2
ETABLE,VFY,SMISC,8
ETABLE,VIZ,SMISC,3
ETABLE,VFZ,SMISC,9

ETABLE,MTI,SMISC,4
ETABLE,MTF,SMISC,10
ETABLE,MII,SMISC,5
ETABLE,MFY,SMISC,11
ETABLE,MIZ,SMISC,6
ETABLE,MFZ,SMISC,12

ESEL,ALL

/COM,ALMACENAREMOS EN UN VECTOR LAS REACCIONES
EN LOS APOYOS

*GET,FRXN1,NODE,NRX1,RF,FX
*GET,FRYN1,NODE,NRX1,RF,FY

```

```

*GET,FRZN1,NODE,NRX1,RF,FZ
*GET,MRXN1,NODE,NRX1,RF,MX
*GET,MRYN1,NODE,NRX1,RF,MY
*GET,MRZN1,NODE,NRX1,RF,MZ

/TITLE,TENSIONES EN BARRAS X
(TON).PLANTA.CASO=%CONT%
ESEL,S,MAT,,1
PLLS,NORMI,NORMI,-1

*GET,FRXN2,NODE,NRX2,RF,FX
*GET,FRYN2,NODE,NRX2,RF,FY
*GET,FRZN2,NODE,NRX2,RF,FZ
*GET,MRXN2,NODE,NRX2,RF,MX
*GET,MRYN2,NODE,NRX2,RF,MY
*GET,MRZN2,NODE,NRX2,RF,MZ

/TITLE,ESFUERZOS EN MEMBRANA X
(TON).PLANTA.CASO=%CONT%
PLLS,ESFUX,ESFUX,-1

*GET,FRXN3,NODE,NRZ1,RF,FX
*GET,FRYN3,NODE,NRZ1,RF,FY
*GET,FRZN3,NODE,NRZ1,RF,FZ
*GET,MRXN3,NODE,NRZ1,RF,MX
*GET,MRYN3,NODE,NRZ1,RF,MY
*GET,MRZN3,NODE,NRZ1,RF,MZ

/VIEW, 1, 0.338741126495 , 0.362654065309 , 0.868179980267
/ANG, 1, 0.504492631796
/TITLE,ESFUERZOS EN MEMBRANA Z
(TON).PLANTA.CASO=%CONT%
PLLS,ESFUX,ESFUX,-1

*GET,FRXN4,NODE,NRZ2,RF,FX
*GET,FRYN4,NODE,NRZ2,RF,FY
*GET,FRZN4,NODE,NRZ2,RF,FZ
*GET,MRXN4,NODE,NRZ2,RF,MX
*GET,MRYN4,NODE,NRZ2,RF,MY
*GET,MRZN4,NODE,NRZ2,RF,MZ

/COM,-----

ESEL,ALL
/VIEW,1,,1
/TITLE,TENSIONES EN BARRAS Z
(TON).PLANTA.CASO=%CONT%
ESEL,S,MAT,,2
PLLS,NORMI,NORMI,-1

*DIM,REACCION,ARRAY,6,4

/TITLE,ESFUERZOS EN MEMBRANA Z
(TON).PLANTA.CASO=%CONT%
PLLS,ESFUZ,ESFUZ,-1

*DO,I,1,4,1
REACCION(1,I)=FRXN%I%
REACCION(2,I)=FRYN%I%
REACCION(3,I)=FRZN%I%
REACCION(4,I)=MRXN%I%
REACCION(5,I)=MRYN%I%
REACCION(6,I)=MRZN%I%
*ENDDO

/VIEW, 1, 0.338741126495 , 0.362654065309 , 0.868179980267
/ANG, 1, 0.504492631796
/TITLE,ESFUERZOS EN MEMBRANA Z
(TON).PLANTA.CASO=%CONT%
PLLS,ESFUZ,ESFUZ,-1
/COM,-----

*DIM,LABEL,CHAR,4
LABEL(1)='NODO_IQ'
LABEL(2)='NODO_DER'
LABEL(3)='NODO_SUP'
LABEL(4)='NODO_INF'

ESEL,ALL
ESEL,S,MAT,,3

/COM,EL ARCHIVO RESULT_REAC No. CONTENDRA LAS
REACCIONES DE CADA CASO ANALIZADO (CONT)
/COM,SE ALMACENARAN COMO 4 COLUMNAS CONTENIENDO
CADA UNA: RX RY RZ MX MY MZ DE CADA NODO

/TITLE,FZAS NORMALES TUBO PERIMETRAL
(TON).CASO=%CONT%
PLLS,NI,NF,-1
/COM,-----

*CFOPEN,'C:\Documents and
Settings\Edgar\RESULT_REAC%CONT%'
*VWRITE,LABEL(1),LABEL(2),LABEL(3),LABEL(4)
(A9,' ',A9,' ',A9,' ',A9)
*VWRITE,REACCION(1,1),REACCION(1,2),REACCION(1,3),REAC
CION(1,4)
(F9.6,' ',F9.6,' ',F9.6,' ',F9.6)
*CFCLOS

/TITLE,FZAS CORTANTES Y TUBO PERIMETRAL
(TON).CASO=%CONT%
PLLS,VIY,VFY,-1
/COM,-----

*END

/TITLE,FZAS CORTANTES Z TUBO PERIMETRAL
(TON).CASO=%CONT%
PLLS,VIZ,VFZ,-1
/COM,-----

*CREATE,VISUALIZACION

/TITLE,MOM TORSION TUBO PERIMETRAL (T-
M).CASO=%CONT%
PLLS,MTI,MTF,-1

/VIEW,I,-0.5,,0.8
/TITLE,DESPLAZ.TOTALES DEL
PARABOLOIDE(M).PERSPECT.CASO=%CONT%
PLNSOL,U,SUM,0,1.0
/COM,-----

/TITLE,MOM FLEX. Y TUBO PERIMETRAL (T-
M).CASO=%CONT%
PLLS,MIY,MFY,-1

/VIEW,I,,1
/TITLE,DESPLAZ.TOTALES DEL PARABOLOIDE (M).PLANTA.
CASO=%CONT%
PLNSOL,U,SUM,0,1.0
/COM,-----

*END

*CREATE,CONTADOR

ESEL,ALL

/COM,LOS SIGUIENTES COMANDOS SON PARA MANTENER
VIGENTE EL CONTADOR CONT CADA CASO

```

```

CONT=CONT+1

*DIM,ESCAL,,1

ESCAL(1)=CONT

*CFOPEN,'C:\Documents and Settings\Edgar\ESCALAR'
*VWRITE,ESCAL(1)
(1F4.2)
*CFCLOS

*END

*CREATE,NCASO
/CLEAR,START
RESUME,ROMBO1
*USE,NSECC
*USE,LCON
*USE,MALLADO
*USE,ANALISIS
*USE,POSTPROCESO
*USE,VISUALIZACION
*USE,CONTADOR

*END

*CREATE,OPCION

/COM,*****
*ASK,CASE,DESEA ANALIZAR OTRA OPCION (S/N),S
*IF,CASE,EQ,1,THEN
*USE,NCASO
*ELSE
*ASK,TER,ANALISIS TERMINADO. OPRIMA CUALQUIER
TECLA.
*ENDIF
/COM,*****

/COM,SI SE DESEA CONTINUAR REVISANDO OTRAS
OPCIONES, SE DEBERA ENTONCES
/COM,INTRODUCIR MANUALMENTE LOS COMANDOS ENTRE
ASTERISCOS

*END

*create,INSTRUCCIONES

*USE,INICIO
*USE,ROMBO
*USE,NUEVOS_REALES
*USE,MALLADO
*USE,ANALISIS
*USE,postproceso
*USE,VISUALIZACION
*USE,CONTADOR
*USE,OPCION

*end

*use,instrucciones

/COM,NOTA:CADA VEZ QUE SE DESEE ANALIZAR UNA
NUEVA OPCION
/COM,SE DEBERA TECLEAR: USE OPCION

```

## Anexo 2. Análisis Caso 2. Viento de frente

Para el 2º caso de análisis, en el que se involucra el efecto de viento de manera

normal a la superficie se debe hacer un cambio en la subrutina: Análisis

Está indicado en el Anexo 1 las líneas:

/COM, COMIENZA (Y TERMINA) INTRODUCCIÓN DE CARGAS. Entre ambas líneas debe reemplazarse el contenido anterior por el siguiente:

```

CSYS,0

/COM, COMENZAMOS CON LA APLICACIÓN DE CARGAS

/COM, COMENZAMOS CALCULANDO EL VALOR QUE
DEBE TENER CADA VECTOR
/COM,EN X, Y y Z PARA OBTENER UN VECTOR UNITARIO
A LA SUPERFICIE
/COM, AQUÍ NO IMPORTA LA DIRRECCIÓN DE LA
FUERZA, ESTA PARTE SE INTRODUCIRÁ
/COM, A LAS CARGAS CON SU VALOR ABSOLUTO

*AFUN,DEG
CERO=0

*DO,CORZ,AN/2,-AN/2,-SEPZ
  MZ=(2*CORZ)/(B**2)
  *IF,MZ,EQ,CERO,THEN
    COMPZ=0
  *ELSE
    MZINV=-1/MZ
  *ENDIF

  *DO,CORX,-AN/2,AN/2,SEPX
    MX=(2*CORX)/(A**2)
  *IF,MX,EQ,CERO,THEN
    COMPX=0
  *ELSE
    MXINV=-1/MX
  *ENDIF

  *IF,ABS(MXINV),GT,ABS(MZINV),THEN
    RELMZI=MZINV/(SQRT(1+(MZINV/MXINV)**2))
    ALFA=ATAN(RELMZI)
  *ELSE
    RELMXI=MXINV/(SQRT(1+(MXINV/MZINV)**2))
    ALFA=ATAN(RELMXI)
  *ENDIF

*IF,MZ,EQ,CERO,AND,MX,EQ,CERO,THEN
  COMPY=1
*ELSE
  COMPY=SIN(ALFA)
  COMPX=COMPY/MXINV
  COMPZ=COMPY/MZINV
*ENDIF

/COM,AQUI DETERMINAMOS LA DIRECCIÓN QUE DEBE
LLEVAR CADA CARGA
/COM,PARA QUE SEA PRESIÓN (LAS CARGAS POR
RPESIÓN SON "POSITIVAS")

DIRECY=-1

*IF,CORX,GE,CERO,THEN
  DIRECX=1

```

```

*ELSE
  DIRECX=-1
*ENDIF

*IF,CORZ,GE,CERO,THEN
  DIRECZ=-1
*ELSE
  DIRECZ=1
*ENDIF

/COM,CALCULAMOS EL COEFICIENTE DE PRESIONES (O
SUCCIONES) CORRESPONDIENTE
/COM,A CADA PUNTO POR MEDIO DE LA SUPERFICIE

XI=ABS(CORX)
ZI=CORZ

CP1=-2-0.08*XI+0.27*ZI
CP2=0.04*XI**2+0.164*XI*ZI
CP3=0.082*ZI**2

CP=CP1+CP2+CP3

/COM,AHORA SELECCIONAMOS EL NODO
CORRESPONDIENTE A LAS COORDENADAS
/COM,CORX Y CORZ QUE HEMOS UTILIZADO

NSEL,S,LOC,X,CORX
NSEL,R,LOC,Z,CORZ

/COM, PARA ASIGNARLE LA COMBINACIÓN DE CARGAS
EN X,Y y Z QUE
/COM, GENERAN LA FUERZA NORMAL A LA SUPERFICIE
(COMP) LA DEBIDA
/COM, AL ÁREA TRIBUTÁREA (FNODE) Y LA DEBIDA A LA
SUCCIÓN O PRESIÓN CON
/COM, SU RESPECTIVO COEFICIENTE DE PRESIÓN
(DIREC*CP)

F,ALL,FX,FNODE*ABS(COMPX)*DIRECX*CP
F,ALL,FY,FNODE*ABS(COMPY)*DIRECY*CP
F,ALL,FZ,FNODE*ABS(COMPZ)*DIRECZ*CP

NSEL,ALL

  *ENDDO
*ENDDO

/COM,PARA FINALIZAR HAY QUE QUITAR LAS CARGAS
EN EL TUBO PERIMETRAL

CSYS,11

DIDIST=0.25*SQRT(2*(AN**2))

NSEL,R,LOC,X,DIDIST
NSEL,A,LOC,X,-DIDIST
NSEL,A,LOC,Z,DIDIST
NSEL,A,LOC,Z,-DIDIST

F,ALL,FX,CERO
F,ALL,FY,CERO
F,ALL,FZ,CERO

NSEL,ALL

CSYS,0

/COM, HASTA AQUÍ LO QUE LE AFECTA LA
MODIFICACIÓN DE CARGAS

```

### Anexo 3. Análisis Caso 3. Viento de lado

Para el caso 3, la única parte que va a cambiar es lo concerniente al cálculo del factor CP.

Debe eliminarse la parte que toma el valor absoluto de la coordenada X y cambiarse los valores que producen la interpolación polinomial:

```

/COM,CALCULAMOS EL COEFICIENTE DE PRESIONES (O
SUCCIONES) CORRESPONDIENTE A CADA PUNTO POR
MEDIO DE LA SUPERFICIE

```

```

XI=CORX
ZI=CORZ

```

```

CP1=-2-0.08*XI+0.27*ZI
CP2=0.04*XI**2+0.164*XI*ZI
CP3=0.082*ZI**2

```

```

CP=CP1+CP2+CP3

```

# Glosario

**Anticlástica** Una superficie anticlástica tiene menos curvatura de Gauss que cero. A nivel local, las superficies anticlástica son de forma de montura. La mayoría de las fronteras de las estructuras de membrana tensadas se componen de superficies anticlásticas.

**Arrugas** Arrugamiento o condición de arrugarse en la superficie de la membrana. Pueden ocurrir cuando los esfuerzos de tensión Biaxial no son logrados durante la instalación o posteriormente seguidos de la relajación textil.

**Caballote y Valle** Configuración estructural compuesta de superficies anchas entre una serie de cables superiores e inferiores. Se parece a un abanico corrugado.

**Cable** Un componente flexible resistente a la tensión, generalmente hecho de filamentos enlazados.

**Componente Axial Estructural** Expresión de uso común para todos los componentes estructurales cuya delimitación de volumen es significativamente mayor en una de las tres direcciones de ejes principales. Estos incluyen puntales, tirantes y algunas vigas y marcos.

**Cono / Cónica / Conic** Una de las formas más comunes de techos textiles. El término se refiere vagamente a la forma de cono y no a los puros conos de Euclidiano.

**Costura** Relación lineal entre cada uno de los paños de una Estructura de Membrana. Por lo general, realizado mediante la soldadura, pero en algunos casos, todavía por costura o pegamento.

**Deformación** Proporción de la extensión con carga de un miembro estructural de la longitud sin esfuerzo.

**Doble Curvatura** Una superficie con curvatura gaussiana no igual a cero que tiene doble curvatura.

**Elemento Axial Estructural** Un elemento finito utilizado para representar un componente axial estructural.

**Elementos Finitos** Objeto de discretización individual de un mallado computacional, utilizado para la elaboración de modelos de ingeniería de estructuras.

**Esfuerzo** La definición habitual de la ingeniería de esfuerzo es, la fuerza por unidad de área. Debido a la complejidad de la naturaleza no uniforme, de los materiales de revestimiento textil usados para la arquitectura de tensión, los esfuerzos textiles por lo general se expresan como fuerza por unidad de anchura.

**Estructura Ligera** La clase de estructura que abarca una amplia gama de configuraciones, incluyendo muchas que son resistentes a la flexión, y algunas puramente compresiones. No obstante, el termino de estructura ligera parece haberse convertido principalmente, asociados con estructuras ligeras tensionantes.

**Estructura Minimalista** Mínima expresión que se puede conseguir entre los elementos indispensables, para obtener una estructura, en este caso de estudio a tensión.

**Estructura de Membrana** La clase de estructura que utilizan esfuerzos Biaxiales en los componentes de la membrana.

**Estructura Primaria** Los componentes de una estructura de tensión son a menudo divididos entre las estructuras primarias y las secundarias. La Estructura Primaria se compone de: Mástiles, arcos y otros apoyos semirígidos. La Estructura Secundaria se compone de: la Membrana y cables asociados.

**Estructura de Superficie** Una estructura compuesta de membrana, Shell o bien por componentes estructurales de red de cables.

**Estructura a Tensión** Clases de configuraciones estructurales donde la mayoría de los componentes estructurales experimenta sólo Fuerzas a Tensión.

**Exceso de Esfuerzo** La condición de contar con más esfuerzo en una estructura diseñado para las condiciones de largo plazo. Esto es a menudo deliberadamente planificado, con el fin de permitir la relajación de los textiles.

**Factor Cp** Coeficientes de presión de cargas de viento depende de la forma estructural y el medio ambiente local. Puede ser derivado de los ensayos en túnel de viento, pero a menudo derivado de los datos publicados y la experiencia.

**Fill** nombre americano para el Weft de un textil.

**Fronteras** Los términos de Límites y Fronteras son sinónimamente utilizados para referirse a ambos límites completos de componentes estructurales de superficies tensadas, así como las secciones individuales de fronteras.

**Frontera de Estructura de Membrana Tensionada** Una de las dos clases principales de las estructuras de membrana arquitectónicas. A diferencia de las estructuras neumáticas, en donde la pretensión se introduce por la presión del aire, las fronteras de estructuras de membrana son pretesionadas por la ubicación de las fronteras.

**Fuerza de Equilibrio** Estado de un modelo estructural en que para todos los grados de libertad de la malla, la suma de las fuerzas internas y externas que actúan son cero.

**Hypar** La expresión Hypar, derivada de Paraboloides hiperbólico, es comúnmente usada para referirse a la forma de montura en las superficies. Incluso los que no son puros Paraboloides hiperbólicos.

**Isotrópica** Un material cuyas propiedades mecánicas son similares en todas las direcciones que se denomina Isotrópica. Por lo contrario, si las propiedades mecánicas del material varían con respecto a la orientación de cargas, se denomina Anisotrópica. Los Revestidos Textiles utilizado normalmente para estructuras de membrana arquitectónicas, son fuertemente Anisotrópica elástica, en tanto que las laminas ETEFE son casi Isotrópicas.

**Link / conexión** Término general que se utiliza en Modelización Computacional para hacer referencia a cualquier elemento axial que representa conexiones, puntales, componentes resistentes a flexión, así como elementos axiales que representan Textiles.

**Malla** Expresión utilizada durante la modelización computacional de estructuras para describir las colecciones conectadas de Elementos Finitos en representación de las superficies y otros componentes estructurales.

**Membrana** Una superficie de estructura que no resiste a la flexión y de ese modo capaz de resistir sólo fuerzas de tensión.

**Modelación Física** Proceso generalmente usado para la determinación de las formas estructurales a través del uso de los materiales físicos. Las dos principales técnicas de uso súperelásticos de telas existentes, o películas de jabón. Tradicionalmente utilizado para la producción de encontrando la forma y generación de patrones de corte. Aunque en gran parte reemplazado por la producción de diseño de Modelación Computacional, la técnica sigue siendo la adecuada y se utiliza ampliamente en la etapa de diseño conceptual.

**Montura** Comúnmente expresión general para superficies arquitectónicas Anticlásticas que no son ni de formas cónicas ni de caballete y valle.

**Ortotrópico** Un material es Ortotrópico si es anisotrópico con los ejes de anisotropía orientados normalmente. Los tejidos textil utilizado normalmente en la arquitectura textil tienen

**Paño** Aunque el término paño se utiliza a menudo para referirse al material textil, que por lo general se refiere a piezas individuales de material de membrana de la que los grupos del sector textil de estructura son fabricados.

**Película de Jabón** Técnicas de Modelización Física que se utiliza para determinar las formas constante de lo esfuerzos, por la explotación de la energía, minimizando el comportamiento de las películas de jabón.

**Pretensado** El esfuerzo transportado por una estructura, cuando es sometida a una carga externamente no aplicada.

**Propiedades de Sección** Las propiedades geométricas de la sección transversal de un miembro estructural utilizado durante análisis de carga.

**PTFE / Vidrio** Tejidos textiles de vidrio recubiertos con PTFE (Poli Tetra Fluor Etileno). Comúnmente utilizados para las estructuras textiles permanentes que requieren una larga vida.

**Punto Alto** Expresión de uso común para un modelado de estructura cónica radialmente con elevados anillos medianos.

**PVC / poliéster** Tejido de poliéster textil recubierto con PVC (Poli Cloruro de vinilo). El material más utilizado para la fabricación de membranas de estructura textil. La resistencia a la suciedad se puede aumentar mediante el uso de varios recubrimientos superiores.

**Revestimientos Textil** La mayoría de los materiales utilizados para las estructuras de membrana son revestidos Textiles. Estos son compuestos por una base de tela y un revestimiento. Los más comunes son los textiles a base de tela poliéster y vidrio.

**Poliéster** Textil es usualmente recubierto con PVC. Vidrio textil suele ser revestidos Con PTFE, aunque el recubrimiento con Silicón va en aumento.

Revestimientos de PVC suelen estar protegidas con una cubierta superior o de una película protectora para aumentar la resistencia a la suciedad. Materiales utilizados incluyen PVDF.

**Rigidez** En la ingeniería en general, los materiales utilizados constantemente para representar la rigidez, es el Módulo de Young E. E es definido como la relación entre el esfuerzo y deformación de un material elásticamente lineal. Debido a la compleja micro estructura del Revestimiento Textil y materiales entrelazados normalmente utilizados para la arquitectura de

tensión, la rigidez por lo general, es más medida y especificada junto con el área de la sección transversal. La combinación de la rigidez del material con la constante E con el área A se denomina Valor EA. En el caso del Textil, Los valores EA se especifican para una unidad de anchura.

**Sinclástica** Una superficie Sinclástica tiene curvatura Gaussiana mayor que cero. A nivel local, las superficies Sinclásticas son en forma de domo. Las estructuras Neumáticas se componen exclusivamente de superficies sinclásticas, o combinaciones de Sinclásticas y superficies Anticlásticas.

**Superficies de Múltiples Capas** Con el fin de mejorar el comportamiento climático de las Estructuras de Membrana, el doble o triple de superficies de membrana pueden ser utilizadas. El espacio entre las membranas puede estar sin llenar, llenarlas de aislante, o presurizado.

**Suspensión por Cable** Un componente de apoyo tensionante por lo general conectado a un mástil superior, de una estructura secundaria. El término se utiliza para una gama más amplia de los componentes que en el campo de la ingeniería de puentes.

**Tela** Material superficial fabricado de los hilos. La mayoría de las telas se utilizan en estructuras ligeras son textiles entrelazados, pero no tejidos también están disponibles.

**Tensegriudad** Circuito cerrado de elementos que se encuentran unidos mediante cables sujetos a tensión. (Unidad estructural estabilizada mediante tensores).

**Textil** Material del tela usualmente tejido desde la orientación a los hilados ortotrópicos.

**Warp** Los hilos longitudinal y paralelo a la membrana en un tejido textil. (Longitudinal)

**Weft** El filling de los hilos corriendo perpendicular a los hilados Warp. (Transversal)