



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias en Estructuras

**ESTUDIO ANALÍTICO-EXPERIMENTAL DE UNA LONARIA SUJETA A  
EFECTOS DINÁMICOS POR VIENTO**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Estructuras

**Presenta:**

Ing. Edgar Alán Castellanos Espinosa

**Dirigido por:**

Dr. Jaime Horta Rangel

Dr. Jaime Horta Rangel

Presidente

Dr. José Luis Reyes Araiza

Secretario

Dra. Ma. de la Luz Pérez Rea

Vocal

Dr. Marco Antonio Montiel Ortega

Suplente

Dr. Alfonso Gutiérrez López

Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Febrero de 2012

México

# RESUMEN

Se exponen las características de las estructuras lonarias: su forma, el pretensado, consideraciones de equilibrio y su clasificación. Se presenta la metodología a seguir para un análisis numérico computacional por medio de una modelación con el Método del Elemento Finito paralelo a un análisis experimental con un modelo físico a escala reducida. Se incluyen en ambos análisis las cargas debidas a peso propio, efectos iniciales estáticos del presfuerzo y adicionalmente los efectos dinámicos del viento. El procedimiento de análisis para el modelo numérico 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 las propiedades de la membrana, las tensiones iniciales de presfuerzo y las cargas debidas al viento. En el modelo físico, las tensiones son calculadas a partir de las deformaciones unitarias en la membrana medidas con extensómetros (strain gages). Finalmente, se hace una comparativa de los resultados a partir de los esfuerzos de Von-Misses en el modelo numérico y esfuerzos calculados por las deformaciones en la membrana con datos obtenidos de los extensómetros. Las cargas predominantes para el caso de estudio son las de presfuerzo y los resultados parecen similares.

*Palabras clave: Lonaria, Análisis No-lineal, Efectos de viento, Modelo a escala reducida, Programación APDL.*

# ABSTRACT

This paper presents information on the characteristics of fabric shells, as their shape, their prestressed membrane, their equilibrium considerations and their classifications. This thesis provides a methodology to do a numerical analysis by computer with a model of the Finite Element Method, parallel, following an experimental analysis with a reduced scale model. Included in both analyses are the loads by self-weight, static beginner's effects by prestressed structure; additionally, the effects by wind load. The procedure analysis for the numerical model is based on a non-lineal model that is developed in a FORTRAN (APDL) program that runs in Ansys environment. The implications that the properties of the shell have in design are analyzed, as well as the initial prestressed membrane forces, and the windloads. In the physical model, the tensions are calculated from the unitary deformations in the shell with strain gages. Finally, a comparative analysis of results is made, checking Von-Misses's strains in the numerical model and calculating principal strains in the reduced scale model on the membrane with strain gages. Prestress is the most important load for this case of study and where the similitude of the results is notable.

*Keywords: Fabric Shell, non-lineal analysis, wind effects, Model scale reducted, programmation APDL.*

*A mis padres Yolanda y Oscar*

# Agradecimientos

A mis padres Yolanda y Oscar, por darme la oportunidad de crecer con base en sus enseñanzas. Por incentivar en mí el desarrollo personal hacia donde quise.

A mi novia Nancy, por estar conmigo siempre, apoyarme en todo momento y por haber crecido juntos.

A mi asesor el Dr. Jaime Horta Rangel, por mostrarme el interesante campo de la investigación científica y apoyarme con su asesoría para la realización de esta tesis.

A mis sinodales: Dr. José Luis Reyes Araiza, Dra. Ma. de la Luz Pérez Rea, Dr. Marco Antonio Montiel Ortega y al Dr. Alfonso Gutiérrez López, por su ayuda, correcciones y comentarios para mejorar este trabajo de tesis, que sea un mejor investigador y persona.

A la UAQ por educarme en la verdad y en el honor.

Al Cedart “Ignacio Mariano de las Casas”, por dejar en mí la semilla de la creatividad.

Al CONACYT por ayudarme con el apoyo para poder estudiar la maestría.

A la empresa “Spider Tenso Estructuras”, en especial al Arq. Alejandro Landgrave Ramírez por toda su ayuda en datos técnicos y material de lona estructural.

A la empresa “Sensitec”, en especial a Maricela García por su apoyo en la instrumentación del modelo a escala reducida.

A mi compa Arturo, por recordarme siempre pensar diferente.

A mis amigos de la licenciatura, los gatos Edgardo y Valentín, por brindarme su amistad todo este tiempo y a mi amigo Joaquín, por ayudarme cuando estuve a punto de rendirme.

A mis profesores quienes inculcaron en mí la responsabilidad que tengo como universitario y me mostraron lo fascinante de la ingeniería.

A mis compañeros Sara y Juan, que estuvieron conmigo en esta etapa.

A mis amigas Cecilia y Elsa, por su amistad y apoyo todos estos años.

A mis amigas Samantha, Carmen, Lucía, Lupita y Abigail, quienes me hacen olvidar mi edad.

A mi amiga Odile Shnee, por recordarme que puedo conocer gente maravillosa cuando menos lo espero.

A la secretaria Guadalupe Centeno, por hacer la vida de todos más fácil en el posgrado.

# Índice General

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Prefacio	1
1.2. Equilibrio	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.5. Hipótesis	4
1.6. Características Generales	5
1.7. Alcances	5
1.8. Aportación	6
<b>2. Capítulo 2. Antecedentes</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción	7
2.2. Ingeniería de la tela arquitectónica	7
2.3. Forma y comportamiento de las estructuras de tela	8
2.4. Forma superficial	8
2.4.1. Estructuras tensionadas de membranas anticlásticas	11
2.4.1.1 Formas básicas de membrana anticlástica	13
2.5. Pretensado	13
2.6. Deformabilidad	16
2.7. Sistema estructural	17
2.8. Cualidades de la membrana arquitectónica	18
2.8.1. Ligeras	18
2.8.2. Traslucidez	18
2.8.3. Flexibilidad	19

2.8.4. Escultural	19
2.8.5. Seguridad	19
2.8.6. Materiales resistentes al fuego	20
2.8.7. Protección del clima	20
2.8.8. Móviles y temporales	21
2.8.9. Convertibles y adaptables	21
2.9. Clasificación	22
2.9.1. Abiertas	23
2.9.1.1. Abiertas y cubiertas	23
2.9.1.2. Abiertas y adheridas	25
2.9.2. Cerradas	26
2.9.2.1. Cerradas y cubiertas	26
2.9.3. Convertibles	27
2.9.3.1. Convertibles y cubiertas	28
2.9.3.2. Convertibles e internas	29
2.9.3.3. Convertibles y adheridas	29
2.10. Estructuras de apoyo de la membrana	31
2.10.1. Mástiles externos e internos	31
2.10.2. Bordes	31
2.10.2.1. Placas base	33
2.10.2.2. Anclajes	33
2.11. Material	34
2.11.1. Una distinción en la construcción	34
2.11.2. El material tela	35
2.11.3. Hilos	35
2.11.4. Composición del material base	36
2.11.5. Costuras	37
2.11.6. Recubrimientos	38
2.12. Cargas de diseño	38
2.13. Estructuras lonarias en México	39
2.13.1. Estructuras lonarias en Querétaro	40

2.14. Modelos físicos a escala	42
2.14.1. Introducción a la modelación física en ingeniería estructural	42
2.14.2. Modelos estructurales, definiciones y clasificaciones	43
2.14.3. Clasificación de los modelos	43
2.14.3.1. Modelo elástico	43
2.14.3.2. Modelos de efecto de viento	43
2.14.3.3. Los modelos de diseño	44
2.14.4 Selección de la escala	44
2.14.5 Ventajas y limitaciones del análisis de modelos	45
2.14.6 Una breve perspectiva histórica sobre modelos	45
2.14.7 Galgas extensométricas (Strain Gages)	46
2.14.7.1 Fenómeno físico	46
2.14.7.2 Puente de Wheatstone	47
<b>3 Capítulo 3. Metodología</b>	<b>50</b>
3.1 Introducción	50
3.2 Aspectos generales del proyecto	51
3.2.1 La forma	51
3.2.2. Las cargas	52
3.2.3. Planteamiento del problema variacional	53
3.3 Mediciones en el modelo analítico	55
3.3.1 Análisis modal	56
3.4 Generalidades del programa	57
3.5 El modelo físico a escala reducida	58
3.5.1 Mediciones en el modelo físico a escala reducida	62
3.5.2 El túnel de viento	63
<b>4 Capítulo 4. Desarrollo</b>	<b>65</b>
4.1 La acción del viento	65
4.2 Efectos dinámicos. Factor de magnificación dinámica	66

4.3 Aplicación de cargas equivalentes en el modelo numérico	69
4.3.1 Presfuerzo	69
4.3.2 Cargas de viento	70
4.4 Aplicación de cargas en el modelo físico a escala reducida	71
4.4.1 Presfuerzo	71
4.4.2 Fuerzas debidas al viento dentro del túnel	72
<b>5 Capítulo 5. Resultados</b>	<b>73</b>
5.1 Análisis modal	73
5.2 Mediciones en el modelo numérico	74
5.3 Mediciones en el modelo físico a escala reducida	79
<b>6 Capítulo 6. Discusión de resultados</b>	<b>81</b>
<b>7 Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>84</b>
<b>8 Bibliografía</b>	<b>87</b>
<b>9 Anexo 1. Programa lonaria</b>	<b>90</b>
<b>10 Anexo 2. Modelo discreto del elemento finito</b>	<b>97</b>
<b>11 Anexo 3. Cálculo de cargas</b>	<b>101</b>
<b>12 Anexo 4. Propiedades de los materiales</b>	<b>107</b>
<b>13 Glosario</b>	<b>110</b>

# Índice de Figuras

1.1. La tienda negra	1
1.2. Equilibrio de fuerza axial	3
2.	
2.1. Tienda circo “Chapiteau”	8
2.2. Superficie anticlástica	9
2.3. Forma sinclástica y anticlástica	11
2.4. Formas anticlásticas: hypar, cono y montura	13
2.5. Cresta y valle	13
2.6. Equilibrio de cables	14
2.7. Mecanismo de funcionamiento del presfuerzo	16
2.8. Clasificación de lonarias	23
2.9. Tienda de asamblea, Malasya (abierta y cubierta)	24
2.10. Scott Wilson, Basingstoke, UK (abierta e interna)	24
2.11. Casa de la Ópera Glyndebourne, UK (abierta y adherida)	25
2.12. Lugar para encuentros. Bruselas, Bélgica (cerrada y cubierta)	26
2.13. Edificio de Oficinas. Miunich, Alemania (internas y cerradas)	27
2.14. Sala de Gimnasia Olímpica. Seúl (cerrada y cubierta)	28
2.15. Pabellón de los Venezolanos	29
2.16. Las pantallas en Bristol, Reino Unido (interna y convertible)	30
2.17. Ruinas de la iglesia de Bad Hersfeld, Alemania	30
2.18. Mástil interno y externos	32
2.19. Bordes flexibles	32
2.20. Bordes rígidos	32
2.21. Placas base	33
2.22. Anclajes	33
2.23. Patrones de tejido sencillo	37
2.24. Costura engrapada	37
2.25. Costuras soldadas	37
2.26. Costuras encajadas	37

2.27. Soccer City, Aguascalientes, Ags.	39
2.28. Plaza de los artistas, Celaya, Gto.	39
2.29. Plaza Veleros	40
2.30. Auditorio Guelaguetza, Oaxaca	40
2.31. Lonaria en la Alameda Hidalgo	40
2.32. Lonaria en el Instituto Tecnológico de Querétaro	41
2.33. Kiosco Minimalista	41
2.34. Tecnológico de Monterrey	42
2.35. Plaza Maravillas	42
2.36. Extensómetro (Strain Gage)	47
2.37. Disposición eléctrica del circuito	47
2.38. Puente de Wheatstone	48
3.	
3.1. Forma de la membrana en perfil, planta e isométrico	51
3.2. El catenoide	52
3.3. Distribución de coeficientes de presión de viento	53
3.4. Modelo discreto de elementos finitos	56
3.5. Diagrama de bloques del programa	57
3.6. El modelo físico a escala reducida	58
3.7. Proceso de elaboración de membrana	59
3.8. Gajo de corona	59
3.9. Diagrama del modelo físico	60
3.10. Gage instalation Tester 1300	60
3.11. Strain Indicator P-3500 y Switchand Balance Unit	61
3.12. Ubicación de los extensómetros	62
3.13. Diagrama del túnel de viento	64
3.14. El túnel de viento en el laboratorio	64
4.	
4.1. Presfuerzo en modelo analítico	69
4.2. Viento en modelo analítico	70
4.3. Medición de velocidad de viento vía anemómetro	72

5.	
5.1. Frecuencias del modelo	73
5.2. Modo fundamental tipo traslacional	73
5.3. Esfuerzos de Von-Misses en prototipo (T/m <sup>2</sup> )	74
5.4. Esfuerzos en Y (T/m <sup>2</sup> )	75
5.5. Cargas y esfuerzos Von-Misses en prototipo con acción de viento (T/m <sup>2</sup> )	76
5.6. Detalle de esfuerzos Von-Misses en prototipo (T/m <sup>2</sup> )	76
5.7. Esfuerzos Von-Misses del prototipo (T/m <sup>2</sup> ). Vista en planta	77
5.8. Detalle de esfuerzos Von-Misses en el modelo numérico (T/m <sup>2</sup> )	78
5.9. Esfuerzos Von-Misses en el modelo numérico (T/m <sup>2</sup> ). Vista en planta	78
A4.1 Gráfica fuerza vs deformación biaxial	108
A4.2 Gráficas de esfuerzo-deformación	108
A4.3 Gráficas de resistencia a la ruptura	108

# 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 fieltr 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.

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 (Figura 1.1) que tiene el velum tensionado en formas de la silla de montar.

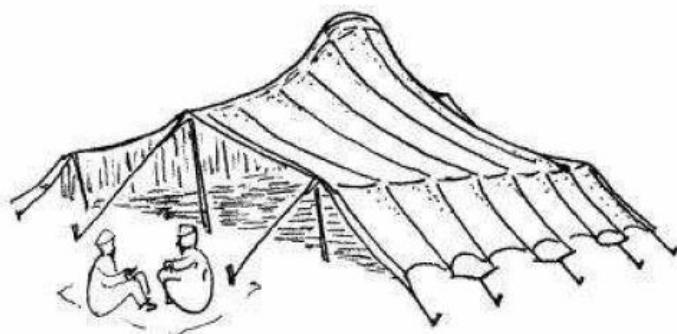


Figura 1.1. La tienda negra (Seaffer R. E. 1996)

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, aportando a la 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 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 estática 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 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” (Shaeffer R.E., 1996).

## 1.2. 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 pretensoras en cada punto deben lograr un equilibrio entre sí. Esta condición obliga a una membrana o en un cable de red de superficie anticlástica (Figura 1.2). En cualquier punto, se pueden identificar dos secciones 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. Por ejemplo, la aplicación de una carga de succión aumentará la tensión de la membrana en la otra dirección" (Shaeffer R.E., 1996).

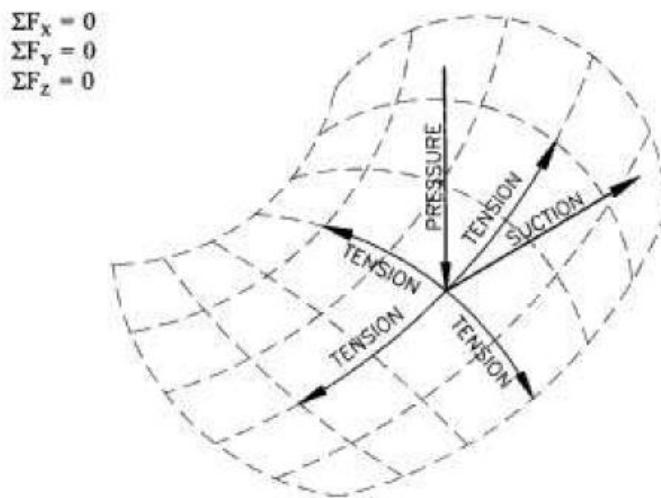


Figura 1.2. Equilibrio de fuerza axial (Seaffer R. E. 1996)

### 1.3. Justificación

La aparición de una membrana en una estructura requiere de un análisis interesante debido a las implicaciones que conlleva un análisis no lineal, la aparición de presfuerzo y la elección de la forma. Las estructuras a tensión es un tema novedoso y vasto para ser estudiado y aplicado a nuevas formas de estructuras minimalistas.

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 ionarias 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). El trabajo a realizar abordará el análisis de una estructura

minimalista pretensada por medio de dos modelaciones: una analítica a través del programa Ansys y la otra con un modelo físico a escala reducida. Teniendo en cuenta que resolvemos modelos y no la estructura real, es interesante poder comparar los resultados.

#### **1.4. Objetivos**

Estudiar el comportamiento de la membrana en una estructura lonaria considerando los efectos dinámicos del viento a través de la comparativa de modelaciones tanto analítica como experimental. El modelo analítico será capaz de darnos la respuesta de la estructura debido a las cargas impuestas en diferentes escalas geométricas, por lo que haremos el modelado analítico en las mismas dimensiones de nuestro modelo físico a escala reducida para la comparación.

Fabricar un túnel de viento dentro del laboratorio de Física y Química en la Facultad de Ingeniería que tenga suficiente tamaño y flujo de viento para hacer mediciones en nuestro modelo. Este túnel debe poder ensamblarse y desensamblarse en lapsos relativamente cortos de tiempo con la finalidad de que sea utilizado para otras prácticas de laboratorio sin afectar las actividades del laboratorio mientras no esté en uso.

#### **1.5. Hipótesis**

- Es posible realizar la modelación tanto analítica como experimental en un modelo a escala reducida de una estructura lonaria en forma de cono del tipo cerrada.
- Las cargas aplicadas al modelo a escala reducida por medio de un túnel de viento casero son suficientes para producir deformaciones medibles con extensómetros (strain gages) sobre la membrana.
- Vamos a poder calcular esfuerzos principales en ciertos puntos críticos de la membrana del modelo físico a escala reducida.
- En estas modelaciones los resultados serán parecidos en esfuerzos el modelo a escala y en el modelo analítico con las dimensiones del modelo a escala.

## 1.6. Características Generales

Este estudio incluye un breve análisis de algunas de las lonarias existentes tanto en nuestro país como en el extranjero. Derivado de este análisis se elige una lonaria de forma típica y representativa que sea aplicable a diferentes circunstancias. Se elige la forma de “catenoide” con base cuadrada.

El estudio analítico incluirá:

- Pesos propio
- Fuerzas equivalentes debidas a efectos de presfuerzo
- Fuerzas equivalentes debidas a efectos de viento
- Análisis modal

El estudio experimental incluirá:

- Peso propio
- Presfuerzo
- Efectos de viento

## 1.7. Alcances

Para llevar a cabo nuestra modelación analítica partimos de datos obtenidos de estudios experimentales que nos brindan la distribución de presiones en la superficie. Esto nos limita a la forma específica que debe tener nuestra membrana y las condiciones de carga aplicables.

Se fabricará un túnel de viento “casero” para poder probar el modelo físico. Para las circunstancias particulares de nuestro estudio en el modelo físico, no contamos con sensores de presión para corroborar los datos de dichos estudios, por lo tanto nos limitaremos a medir en algunos puntos de interés deformaciones uni-axiales en las direcciones principales para así calcular esfuerzos.

Restricciones:

- No se evalúan funciones historia-tiempo de las cargas aplicadas.
- No se miden presiones debidas al viento en el modelo físico a escala reducida.
- No se plantea un diseño para la aplicación del presfuerzo en el modelo analítico.

### **1.8. Aportación**

Establecer una metodología de análisis para una estructura lonaria por medio de la comparativa de estudios analíticos y experimentales.

La creación de un túnel de viento que pueda ser utilizado para futuros trabajos en la Facultad de Ingeniería de la UAQ.

# 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 (Designing Tensile Architecture, 2006).

## 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 viajero. 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” (Figura 2.1), 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 perimetales, 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 es ligeramente pretensar el

pañó, 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 (Shaeffer R.E., 1996).



Figura 2.1. Tienda circo “Chapiteau” (Designing Textile Architecture, 2003)

### 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 (Figura 2.2). 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 que son longitudinal y transversal respectivamente) dentro de la membrana.

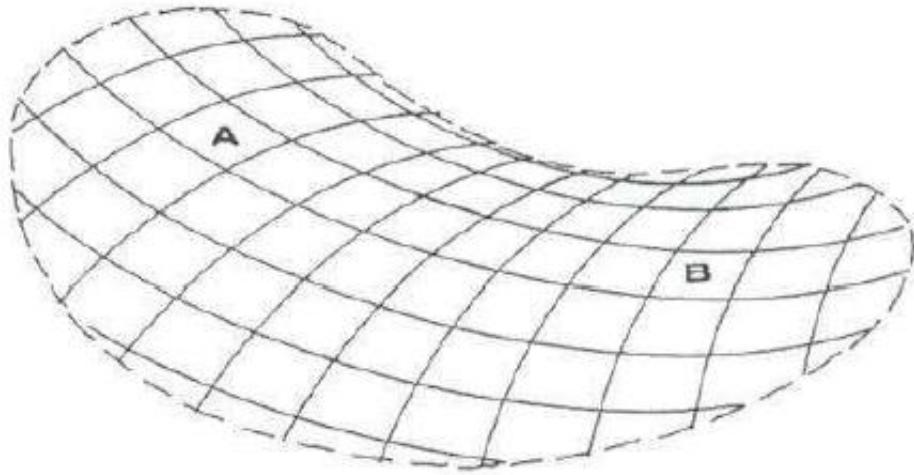


Figura 2.2. Superficie anticlástica (Designing Textile Architecture, 2003)

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 internas y externas. 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 una trayectoria que le permite soportar las cargas de la forma más eficiente posible. 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, encuentra 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 curveadas, 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 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 de los patrones de corte, 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 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.

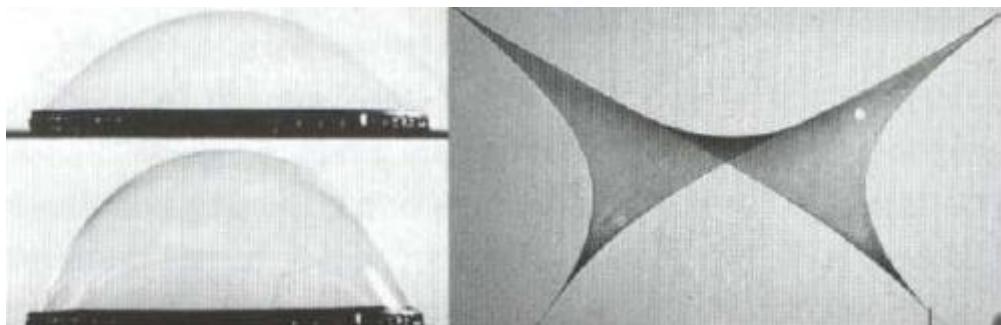


Figura 2.3. Forma sinclástica (izquierda) y anticlástica (derecha). (Seaffer R. E. 1996)

#### 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 estén 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 doblemente 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 por 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 cresta 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 grandes 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 (Figuras 2.4 y 2.5): “el hypar”, “el cono”, “la montura” y la “cresta 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.



Figura 2.4. Formas anticlásticas: Hypar, Cono y Montura



Figura 2.5. Cresta y Valle

#### 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 del 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.

Las membranas anticlásticas tienen una fuerte correlación entre forma, presfuerzo y comportamiento estructural. Para un claro dado y carga, un pequeño radio de curvatura produce pequeñas fuerzas de membrana que un largo radio. Más aun, la curvatura anticlástica, combinada con el presfuerzo, provee estabilidad. Cuando una cadena o cable cuelga entre dos puntos se ajustará la forma para cualquier condición de carga, una membrana anticlástica resiste tales deformaciones por capas de curvatura mutuamente opuesta, justo como dos cables que cruzan uno al otro estabilizan su mutuo punto de cruce (figura 2.6 A). Similarmente, la curvatura anticlástica con dos capas de cables de curvatura mutuamente opuesta, la curvatura anticlástica estabiliza una serie de puntos de cruce y así la superficie completa (figura 2.6 B).

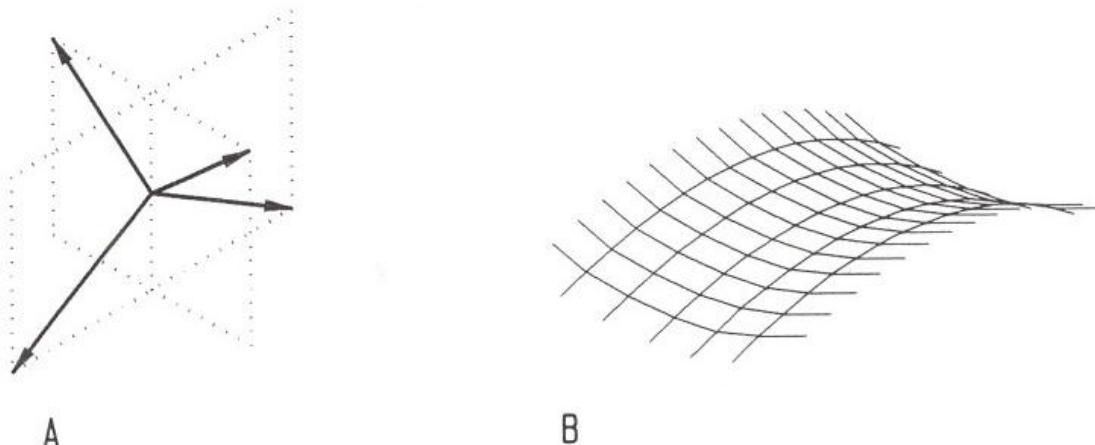


Figura 2.6. Equilibrio de cables (Space Structures 4, 1993)

“El efecto del presfuerzo reduce la deformación y provee estabilidad a la membrana. Esto puede ser ilustrado con los modelos idealizados de la figura 2.7 de una cadena elástica sin presfuerzo (A) y con presfuerzo (B); donde  $F$  = fuerza,  $PS$  = presfuerzo, y  $P$  = carga aplicada. La carga aplicada a media altura de la cadena causa una deformación “delta” en el

modelo (A); la parte de arriba de la cadena lleva la carga entera mientras que la parte de debajo de la cadena no lleva carga y se vuelve floja. La cadena en el modelo (B) es sometida a un presfuerzo inicial. Cuando la carga  $P$  es aplicada, la parte de arriba y de debajo de la cadena llevará cada uno la mitad; la última reduciendo su presfuerzo. Desde que cada parte lleva sólo la mitad de la carga, la deflexión resultante es  $\Delta/2$ . Una vez que el presfuerzo en la parte de abajo es reducido a cero, cualquier carga adicional causará la misma deflexión que en un modelo no-pretensado (A), como el ilustrado en la figura 2.7 del  $P/\Delta$  diagrama (C) donde “a” es la curva  $P/\Delta$  del modelo (A); “b” es el  $P/\Delta$  curva del modelo (B) con presfuerzo; y “c” es la curva  $P/\Delta$  del modelo (B) después de que la parte inferior de la cadena reduce su presfuerzo a cero. Cuando la parte de abajo en cualquiera de los modelos es floja, se vuelve inestable. Estas observaciones pueden ser aplicables a membranas anticlásticas, tal como en el modelo de la figura 2.7B. Si el modelo está sin presfuerzo, una carga gravitacional aplicada puede ser llevada por las capas cóncavas solamente y las capas convexas se volverán flojas y por lo tanto inestables. Pero si el modelo tiene la correcta cantidad de presfuerzo, las capas cóncavas y convexas cada una llevarán la mitad de la carga, el último a través de reducción de presfuerzo; resultando en solamente la mitad de la deflexión de un caso no presforzado. Modelos de prueba de redes de cables anticlásticas han demostrado que cuando las cargas por gravedad reducen el presfuerzo a cero tal estructura es altamente inestable. Similares observaciones fueron hechas por Schierle durante las pruebas de un prototipo de prueba para las estructuras de membrana de Expo’64, Lausanne, Suiza. Una primera evaluación de prototipo de lienzos naturales con bordes de cables deformados excesivamente debido al deslizamiento con resultados en fibras flojas y por lo tanto inestabilidad. La adición de una red de cables soportantes resolvió el problema. Por tanto, el presfuerzo en membranas anticlásticas y redes de cables siempre debe estar en un nivel que prevenga su reducción a cero y los miembros flojos bajo cualquier condición de carga esperada. Al menos la mayoría de cables o fibras de membrana deben mantener presfuerzos positivos” (Space structures 4, 1993).

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.

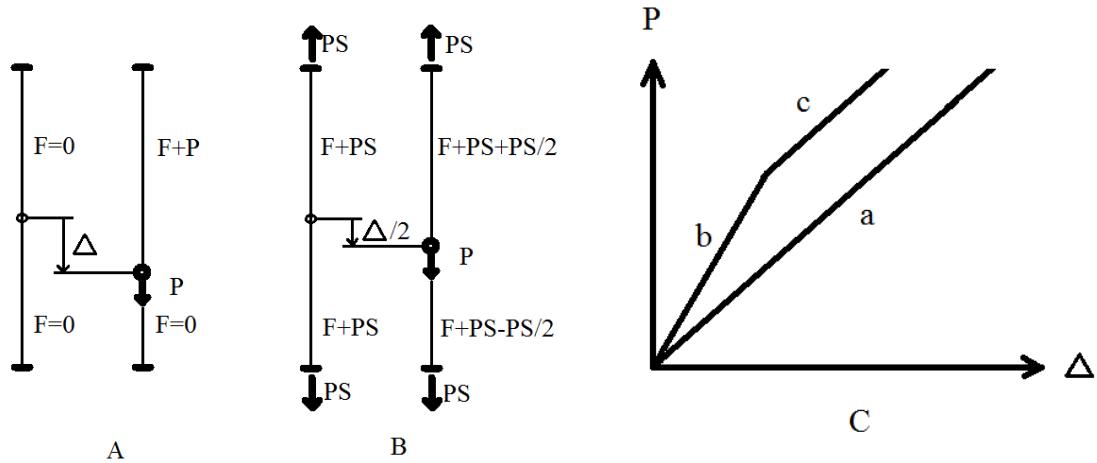


Figura 2.7. Mecanismo de funcionamiento del presfuerzo (Space Structures 4, 1993)

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 Tensile 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 junto 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, 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, 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 se 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 cambiará 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, ésta 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 pequeños 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 antoclástica 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 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.

#### **2.8.7 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 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.

#### **2.8.8 Móviles 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 móvil. 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 aun rápidamente, ocupar un modesto volumen, cuando no esté en uso. Estas características son útiles, para las estructuras temporales y móviles 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.

#### **2.8.9 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, son mejoradas 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 (Figura 2.8) 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, etc.), el espacio, si es convertible o no, el grado de enclaustramiento, 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.

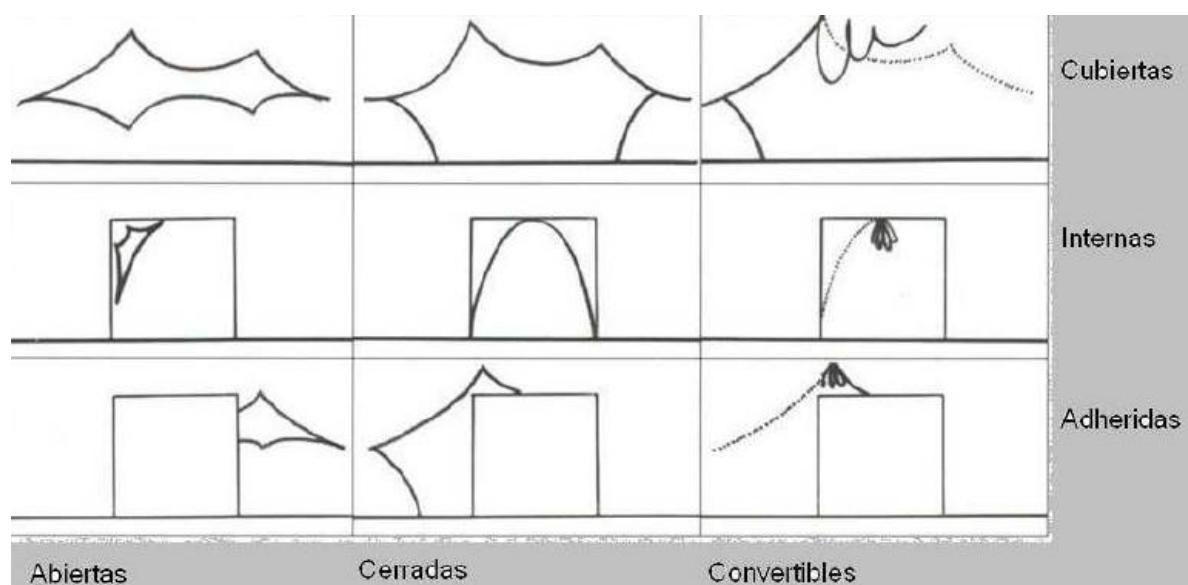


Figura 2.8 Clasificación de lonas

### 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.



Figura 2.9 Tienda de asamblea, Malasya (Abierta y cubierta) (1)

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.



Figura 2.10 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 2.11 Casa de la Ópera Glyndebourne, UK (abierta y adherida) (2)

## 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.

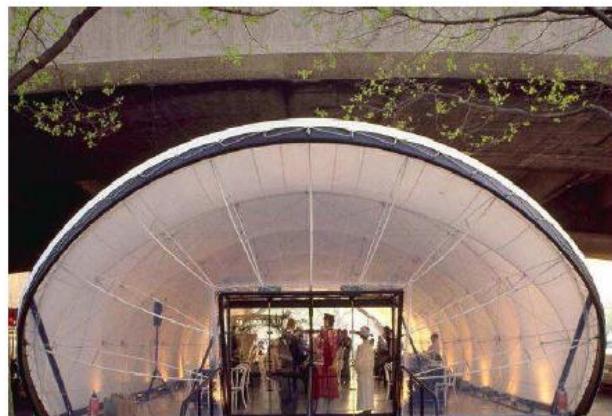


Figura 2.12 Lugar para encuentros. Bruselas, Bélgica (cerrada y cubierta) (3)

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.



Figura 2.13 Edificio de Oficinas. Miunich, Alemania (internas y cerradas) (4)

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.

### 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.

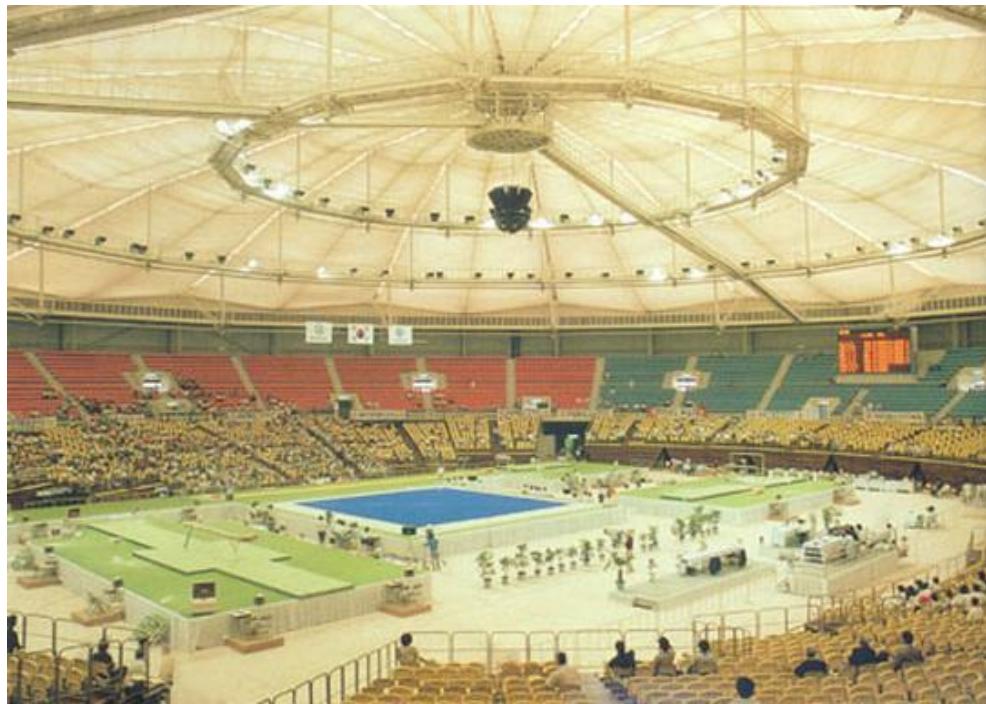


Figura 2.14 Sala de Gimnasia Olímpica. Seúl (cerrada y cubierta) (5)

### 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 se 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.



Figura 2.15 Pabellón de los Venezolanos (6)

### 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.

### 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.



Figura 2.16 Las pantallas en Bristol, Reino Unido (interna y convertible)

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.



Figura 2.17 Ruinas de la iglesia de Bad Hersfeld, Alemania (7)

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 lonas 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.

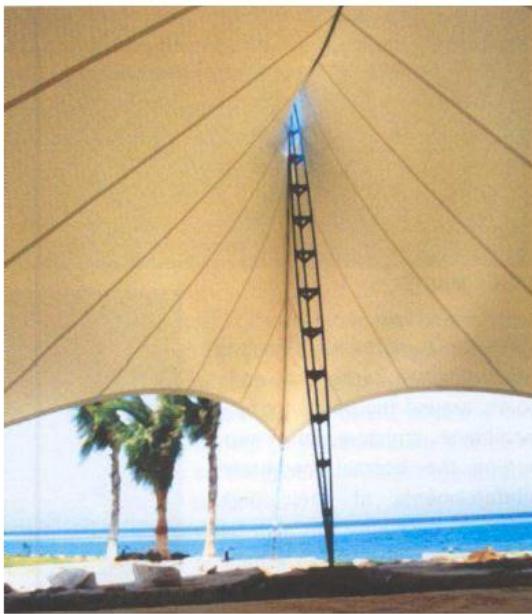
Existen diversos tipos de estructuras de apoyo de membrana, siendo las más comunes los mástiles internos y externos, los bordes rígidos o flexibles, las placas base y los anclajes.

### **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 mediatrix entre las tensiones resultantes de la membrana y los cables con los que se auxilia (figura 2.18A). En caso que se quiera tener un claro libre de obstáculos los mástiles externos son una opción adecuada y viable para lograrlo (figura 2.19B).

### **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 se muestran en las figuras 2.19 y 2.20.



A



B

Figura 2.18 Mástil interno y externos

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.

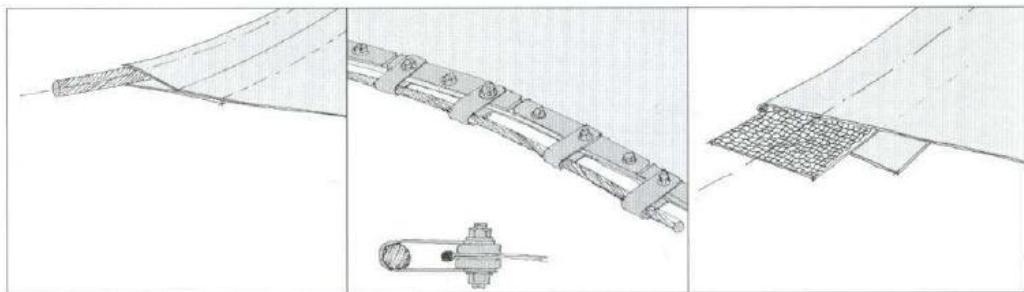


Figura 2.19 Bordes flexibles

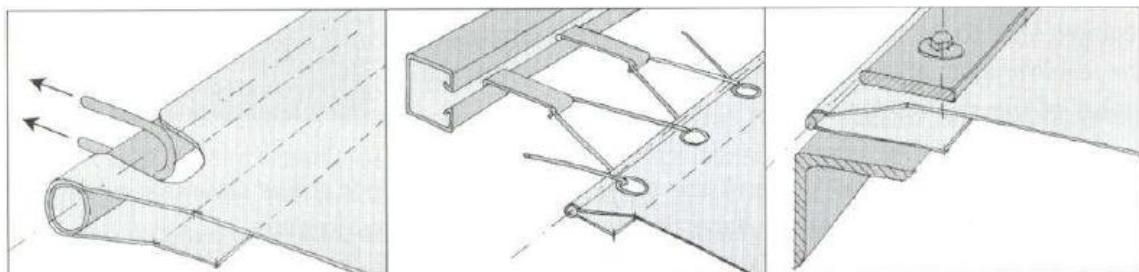


Figura 2.20 Bordes rígidos

### 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 (figura 2.21).

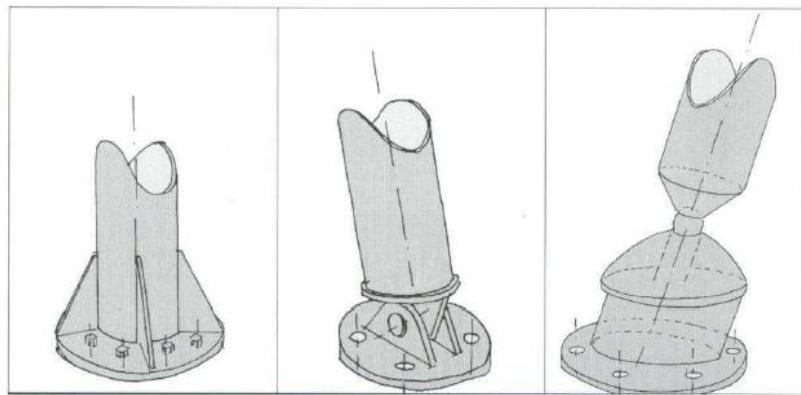


Figura 2.21 Placas base

### 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 (figura 2.22).

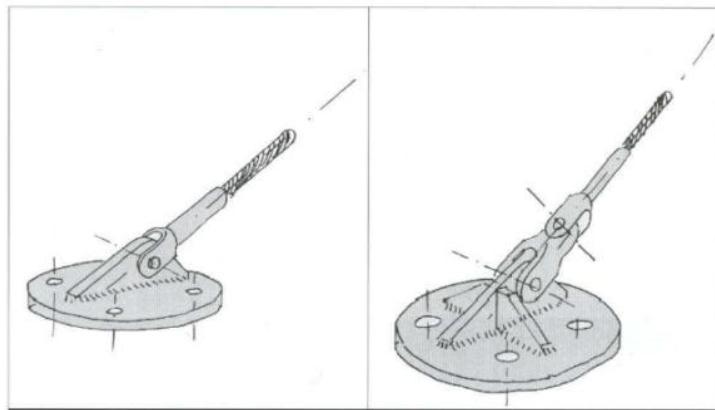


Figura 2.22 Anclajes

## 2.11 Material

### 2.11.1 Una distinción en la 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 para 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 usado. 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 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 (como vidrio y poliéster) o de una solución como las aramidas.

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**

La tela que es normalmente usada para estructuras de membrana es construida 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 (figura 2.23). Es también usual decir 2\*2 Panama o 3\*3 Panama que significa que la operación de tejido se hace, 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.

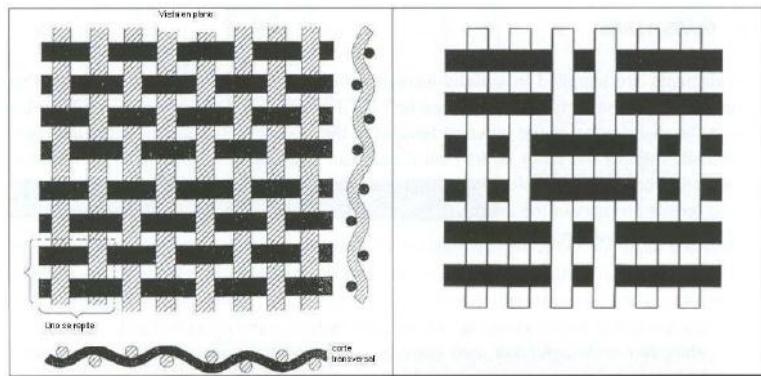


Figura 2.23 Patrones de tejido sencillo (Designing Textile Architecture, 2003)

### 2.11.5 Costuras

Parte importante de la construcción de las lonas 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. Diferentes ejemplos de costura se pueden ver en las figuras 2.24, 2.25 y 2.26.

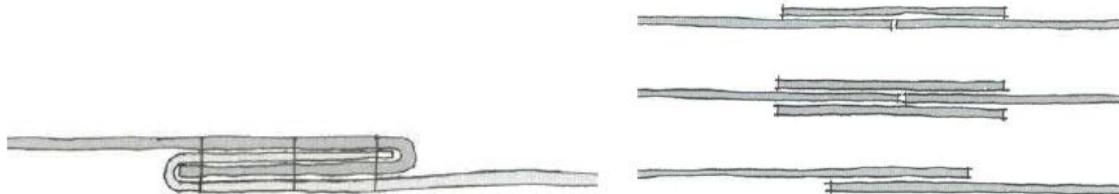


Figura 2.24 Costura engrapada

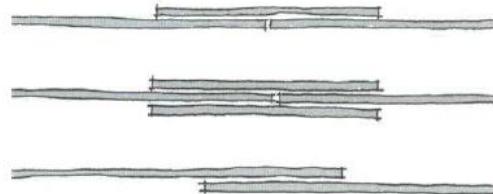


Figura 2.25 Costuras soldadas

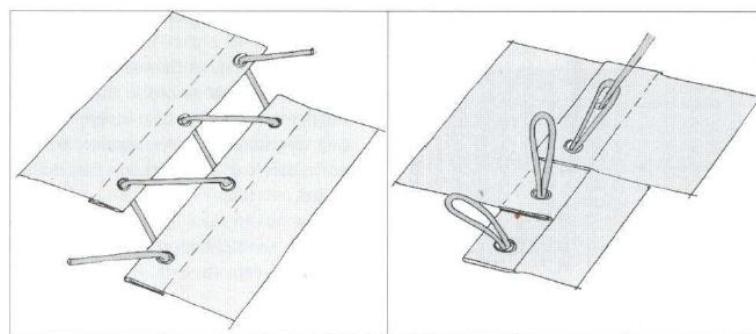


Figura 2.26 Costuras encajadas

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, traslucidez 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.

## 2. 13 Estructuras Lonarias en México

Existen diversas lonarias construidas en México, por ejemplo:



Figura 2.27 Soccer City, Aguascalientes, Ags.



Figura 2.28 Plaza de los artistas, Celaya, Gto



Figura 2.29 Plaza Veleros



Figura 2.30 Auditorio Guelaguetza, Oaxaca

### 2.13.1 Estructuras lonarias en Querétaro



Figura 2.31 Lonaria en la Alameda Hidalgo



Figura 2.32 Lonaria en el Instituto Tecnológico de Querétaro



Figura 2.33. Kiosco Minimalista.



Figura 2.34 Tecnológico de Monterrey



Figura 2.35 Plaza Maravillas

## 2.14. Modelos Físicos a escala

### 2.14.1. Introducción a la modelación física en ingeniería estructural

“Es importante hacer notar la diferencia entre los modelos arquitectónicos y los estructurales que son los que nos interesa en este trabajo. Modelos puramente arquitectónicos son también importantes en la planificación de una nueva construcción y la correlación de los espacios, pero este tipo de modelos no serán considerados aquí debido a que su rol es completamente diferente para el modelaje estructural. Los modelos estructurales incluyen cargas estáticas, simulaciones de sismos, efectos térmicos y de viento.

## **2.14.2. Modelos estructurales, definiciones y clasificaciones**

Un modelo estructural es definido como “una representación física de una estructura o de una porción de estructura. Más comúnmente, el modelo será construido en una escala reducida”. Esto aplica igualmente también a modelos de estructuras hechos de cualquier material, por supuesto. Una segunda definición dada por Janney et al. (1970) es:

“Un modelo estructural es cualquier elemento estructural o montaje de elementos estructurales construido a una escala reducida (en comparación con la estructura de tamaño real) que está hecha para ser probada, y para cuyas leyes de similitud deben ser empleadas para interpretar los resultados de las pruebas”.

## **2.14.3. Clasificación de los modelos**

Para clasificar un modelo, lo primero que nos debemos preguntar es, ¿qué esperamos lograr de las pruebas?, ¿esperamos solamente una respuesta elástica, o esperamos cargar el modelo hasta la falla para poder observar completamente su comportamiento incluido el modo de falla y la capacidad última? Esto nos brinda un buen comienzo para empezar a planear nuestro modelo.

### **2.14.3.1 Modelo Elástico**

Este tipo de modelo tiene una semejanza geométrica directa al prototipo, pero es hecho de un material homogéneo que no necesariamente se asemeja al material del prototipo. El modelo elástico es restringido al rango elástico del comportamiento del prototipo. Plásticos como un metil-metacrilato (plexiglás, lucita, perspex) y polyvinylchloride (PVC) son los más ampliamente usados en la construcción de modelos elásticos, incluso a pesar de las dificultades que presentan sus propiedades dependientes del tiempo.

### **2.14.3.2 Modelos de efectos de viento**

Hay varias formas de clasificar los modelos para efectos de viento. Podemos utilizar “modelos de forma”, donde sólo debe ser medida las fuerzas totales o la presión del viento sobre la estructura, y los “modelos aeroelásticos”, donde ambos, las propiedades de la forma y rigidez del prototipo de la estructura son modelados para medir los esfuerzos

inducidos por el viento, deformaciones y la interacción dinámica de la estructura en el túnel de viento. Este es el tipo de modelo usado en el presente trabajo.

#### **2.14.3.3. Los modelos de diseño**

Algunos modelos de diseño pueden ser usados sólo como una herramienta conceptual para tener una mejor idea de cómo una estructura propuesta se deforma bajo cargas; se puede esperar en otros la predicción de posibles modos de inestabilidad o para predecir la verdadera capacidad de carga de la estructura.

Una mayor aplicación de los modelos físicos en el diseño es ayudar a verificar los cálculos para estructuras monumentales donde las consecuencias de la falla pudieran ser extremadamente serias (como una gran pérdida de vida, de capital de inversión o la ruptura de líneas de servicio esenciales). La estructura de un reactor nuclear es un buen ejemplo de esta aplicación.

Tal vez la mayor desventaja de utilizar un modelo para propósitos de diseño, para el punto de vista de una consulta ingenieril, es el tiempo y el dinero que conlleva el estudio del modelo.

#### **2.14.4. Selección de la escala**

Cualquier modelo dado para ser construido en un laboratorio dado tiene un óptimo factor geométrico de escala. Modelos muy pequeños requieren cargas pequeñas, pero presentan grandes dificultades en la fabricación y la instrumentación. Grandes modelos son más fáciles de construir pero requieren un equipo de aplicación de cargas mucho más pesado. El último requerimiento no es serio en un laboratorio que está completamente equipado para hacer las pruebas a grandes estructuras, pero es un gran obstáculo en pequeños laboratorios. Factores de escala típicos para las estructuras que van a ser probadas por efectos de viento son, para un modelo elástico de un orden de 1/300 a 1/50. En nuestro caso el factor de escala es de 1/20 debido al equipo del que disponemos para aplicar las cargas y al espacio en el laboratorio.

#### **2.14.5. Ventajas y limitaciones del análisis de modelos**

La principal ventaja de un modelo físico sobre un modelo analítico es que se puede conocer el comportamiento completo de la estructura cargada hasta la etapa de colapso. El primer motivo para llevar a cabo experimentos en estructuras a escala reducida es la reducción del costo. La reducción de los costos viene de dos áreas: la reducción en el equipo de aplicación de cargas y los elementos de apoyo. Luego, una reducción en el costo de la prueba de la estructura, la preparación y el manejo de los escombros generados luego de las pruebas.

Las mayores limitaciones en la utilización de modelos estructurales son el tiempo y el dinero. Comparando modelos físicos con modelos analíticos, encontramos que el último es normalmente menos caro y más rápido y no se espera que los modelos físicos reemplacen a los analíticos cuando el último brinda una aceptable definición del comportamiento de la estructura prototipo. Por eso los modelos físicos están casi siempre confinados a las situaciones donde el análisis matemático no es adecuado o no factible. Otro factor limitante es que cambios en el diseño del prototipo resulta que los datos del estudio del modelo requiere un segundo modelo para corroborar el diseño. El tiempo que envuelve el modelaje es sujeto a menudo a presiones debido a que la decisión de hacer un estudio físico es tomada en el último minuto.

#### **2.14.6 Una breve perspectiva histórica sobre los modelos**

Muchos modelos utilizados para predecir el comportamiento estructural requieren de la medición de esfuerzos, desplazamientos y fuerzas. Así, el desarrollo de la modelación como una herramienta práctica ha sido formalmente influenciado por nuestras habilidades en el análisis experimental de esfuerzos.

Uno de los métodos más usados en las técnicas del análisis experimental de esfuerzos han sido las galgas extensométricas, o extensómetros (strain gages) debido a su propiedad de resistencia eléctrica. Esto es quizá el desarrollo más importante en términos de proveer un sencillo método para determinar los esfuerzos tanto estáticos como dinámicos de una estructura. Así, su introducción en los años 40's puede ser considerada la base para el

moderno análisis experimental de esfuerzos y análisis de modelos estructurales" (Sabnis, Harris, White and.1983).

#### **2.14.7. Galgas extensométricas (Strain Gages)**

Una galga extensométrica o extensímetro, es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica. Inventado por los ingenieros Edward E. Simmons y Arthur C. Ruge en 1938.

En su forma más común, consiste en un estampado de una lámina metálica fijada a una base flexible y aislante. La galga se adhiere al objeto cuya deformación se quiere estudiar mediante un adhesivo, como el cianoacrilato. Según se deforma el objeto, también lo hace la lámina, provocando así una variación en su resistencia eléctrica.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones metálicas, como por ejemplo constantán, nicrom o elementos semiconductores como por ejemplo el silicio y el germanio. Es por ello que podemos clasificar las galgas en dos tipos: las metálicas y las semiconductoras.

##### **2.14.7.1. Fenómeno físico**

"Las galgas extensiométricas aprovechan la propiedad física de la resistencia eléctrica y su dependencia no sólo de la resistividad del conductor, la cual es una propiedad del propio material, sino también de la geometría del conductor. Cuando un conductor eléctrico es deformado dentro de su límite de elasticidad, de tal forma que no se produzca rotura o deformación permanente en el mismo, éste se volverá más estrecho y alargado. Este hecho incrementa su resistencia eléctrica. Análogamente, cuando el conductor es comprimido se acorta y ensancha, reduciendo así su resistencia al paso de corriente eléctrica. De esta manera, midiendo la resistencia eléctrica de la galga, puede deducirse la magnitud del esfuerzo aplicado sobre el objeto.

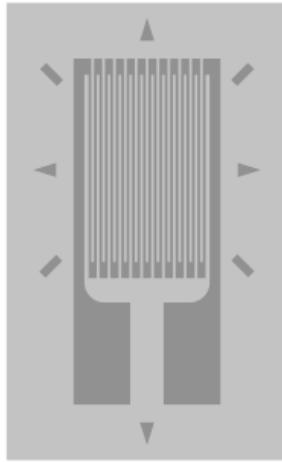


Figura 2.36. Extensómetro (Strain Gage)

Se muestra en la figura 2.36 la galga extensiometrígica de lámina. La galga es mucho más sensible a las deformaciones en la dirección vertical que en la horizontal. Las marcas al rededor sirven para alinear la galga durante la instalación” (Strain Gage Users' Manual, 1992).

#### 2.14.7.2. Puente de Wheatstone

Un puente de Wheatstone (figura 2.38) se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

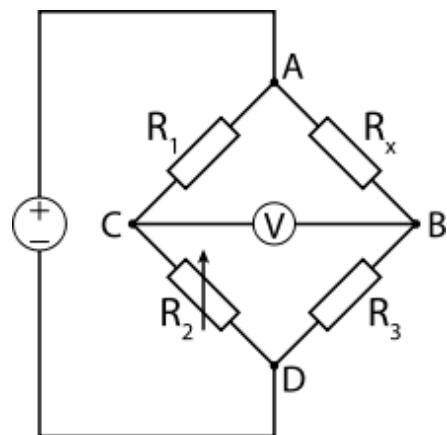


Figura 2.37. Disposición eléctrica del circuito



Figura 2.38. Puente de Wheatstone

En la figura 2.37 vemos que,  $R_x$  es la resistencia cuyo valor queremos determinar,  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son resistencias de valores conocidos, además la resistencia  $R_2$  es ajustable. Si la relación de las dos resistencias del brazo conocido ( $R_1/R_2$ ) es igual a la relación de las dos del brazo desconocido ( $R_x/R_3$ ), el voltaje entre los dos puntos medios será nulo y por tanto no circulará corriente alguna entre esos dos puntos C y B.

Para efectuar la medida lo que se hace es variar la resistencia  $R_2$  hasta alcanzar el punto de equilibrio. La detección de corriente nula se puede hacer con gran precisión mediante el galvanómetro V.

La dirección de la corriente, en caso de desequilibrio, indica si  $R_2$  es demasiado alta o demasiado baja. El valor de la F.E.M. (E) del generador es indiferente y no afecta a la medida. Cuando el puente está construido de forma que  $R_3$  es igual a  $R_2$ ,  $R_x$  es igual a  $R_1$  en condición de equilibrio (corriente nula por el galvanómetro).

Asimismo, en condición de equilibrio siempre se cumple que:

$$R_x = \frac{R_1 \times R_3}{R_2}$$

Si los valores de  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  se conocen con mucha precisión, el valor de  $R_x$  puede ser determinado igualmente con precisión. Pequeños cambios en el valor de  $R_x$  romperán el equilibrio y serán claramente detectados por la indicación del galvanómetro.

De forma alternativa, si los valores de  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son conocidos y  $R_2$  no es ajustable, la corriente que fluye a través del galvanómetro puede ser utilizada para calcular el valor de  $R_x$  siendo este procedimiento más rápido que el ajustar a cero la corriente a través del medidor (Edwin F. 1912).

# 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. 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 la estructura perimetral, el presfuerzo y el grado de exactitud con el que estemos trabajando. 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 un catenoide, sólo que para lograr hacerse un cuadrado en la parte baja es necesario generar una transición continua a partir de la forma que nos da la función del coseno hiperbólico rotado con respecto a un eje.

## 3.2. Aspectos generales del proyecto

### 3.2.1. La forma

Se ha decidido trabajar con una superficie que asemeja a un catenoide, con la diferencia de que en este caso en particular, sus condiciones de frontera llevan de un círculo en la parte superior y a un cuadrado en su parte inferior por medio de una transición continua a lo largo de su altura (figura 3.1). Esto es debido a que la forma de cuadrado en la base sirve como módulo para un sistema de más elementos que se repiten en patrones constantes y que podría formar una superficie de mayores dimensiones.

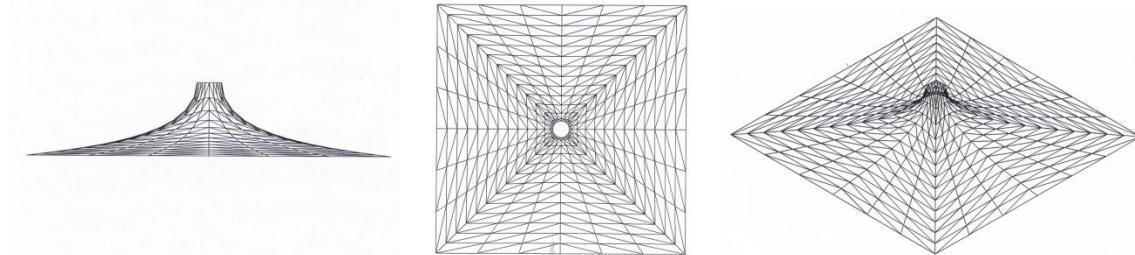


Figura 3.1. Forma de la membrana en perfil, planta e isométrico

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

$$Z = \cosh(x) \quad (3.1)$$

Al rotar esta gráfica con respecto al eje “Z”, obtenemos un catenoide (figura 3.2).

El catenoide es posiblemente la superficie mejor conocida de todas las minimales. Puede caracterizarse como la única superficie minimal, aparte del plano, que es invariante bajo rotaciones alrededor de un eje; en otras palabras, es la única superficie minimal de revolución. (Pascual Lucas, 1999).

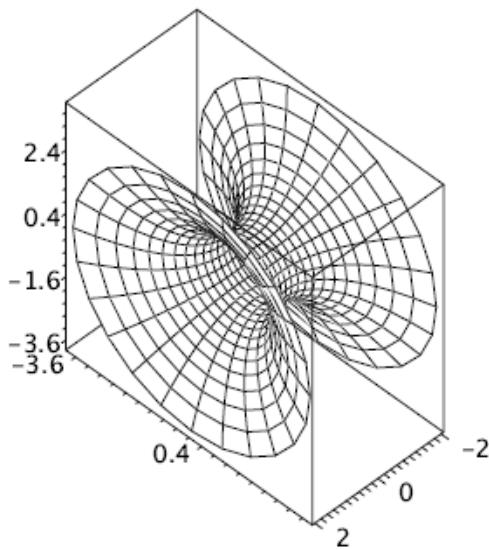


Figura 3.2. El catenoide

### 3.2.2. Las cargas

Otro aspecto interesante de la modelación es cómo se proponen las cargas. Siendo una estructura lonaaria con poca masa y una amplia superficie expuesta, las cargas que regirán el diseño son las del viento. 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. Gracias a los numerosos estudios realizados a estructuras de formas típicas se puede saber cómo es la interacción del viento en este tipo de estructuras, pero debido a las características de las estructuras lonarias y principalmente a sus formas complejas, se hace difícil tener con un buen grado de exactitud cómo sería la interacción del viento en la estructura durante toda su vida útil.

Para un correcto estudio, se debería contar con datos de historia-tiempo del viento en el sitio donde fuera a colocarse la estructura y sensores de presión en una forma como la que vamos a construir en diversas ubicaciones de 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.

Si se quiere hacer un estudio exhaustivo para conocer el comportamiento de la estructura bajo la influencia del viento de diseño, primero se debe hacer un modelo físico y someterlo a una prueba de túnel de viento. Esto nos daría una mejor idea del comportamiento de la estructura bajo estas condiciones, pero finalmente son condiciones controladas. En el presente caso de estudio contamos con los datos de la distribución de presiones de viento gracias a un artículo referente al tema, el cual apreciamos en la figura 3.3.

De tipo cerrado hace referencia a la condición en la parte inferior a la superficie que tiene barreras que impiden el paso del aire. Se ha decidido trabajar con el tipo cerrado ya que es más fácil reproducir las condiciones de frontera tanto en el modelo numérico como físico.

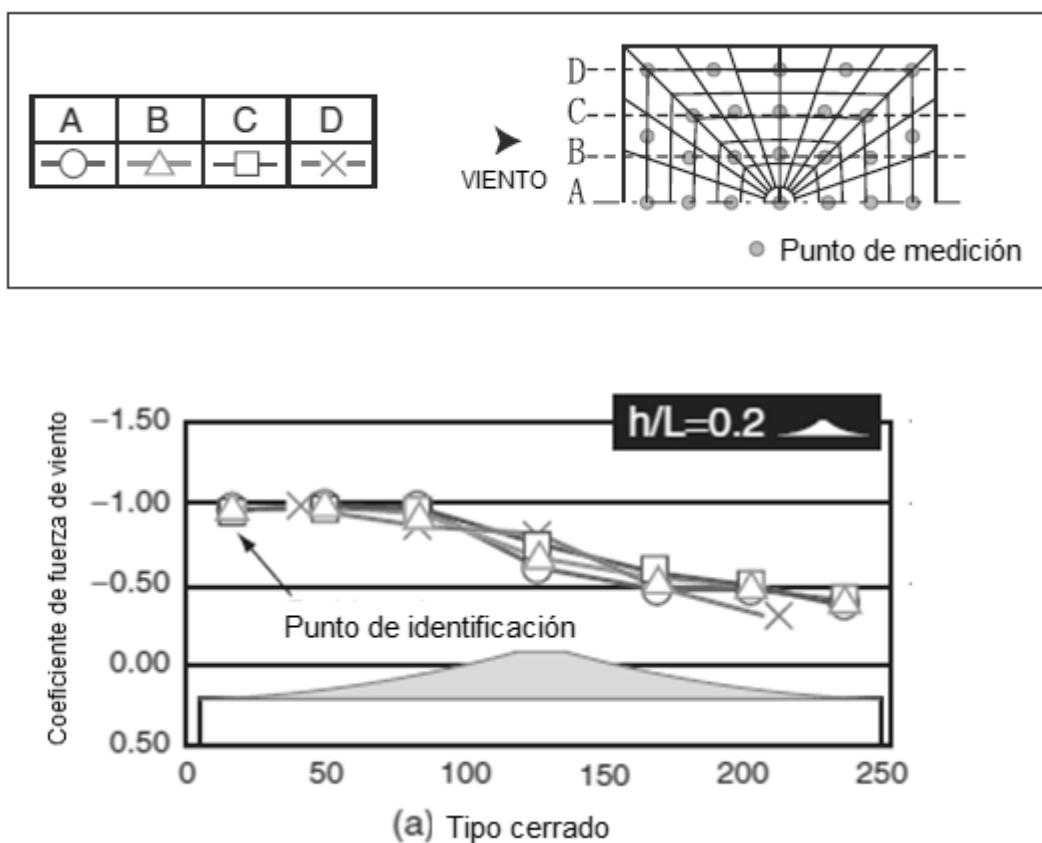


Figura 3.3. Distribución de coeficientes de presión de viento (Yuki Nagai et all, 2010)

### 3.2.3 Planteamiento del problema variacional

El problema de estudio se basa en la teoría de elasticidad lineal, con aspectos puntuales referidos al presfuerzo. Los elementos del modelo discreto correspondientes a los

elementos membrana basan su comportamiento en el siguiente modelo (Gere & Weaver, 1980). Para el caso de un elemento bidimensional con 2 grados de libertad por nodo como se muestra en la figura . 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.

En esta ecuación se destaca la participación de la rigidez general del sistema, del efecto de soporte sobre la membrana, las presiones sobre la membrana, el peso de los elementos estructurales, las deformaciones por temperatura y las fuerzas puntuales aplicadas en los nodos.

La ecuación A2.1 se puede mostrar en una forma más compacta:

$$([K_s] + [K_c])\{U\} = \{f\} \quad (3.2.1)$$

Siendo:

$[K_s]$  : Matriz de la estructura.

$[K_c]$  : Matriz de rigidez de una interface elástica.

$\{U\}$  : Vector de desplazamientos nodales.

$\{f\}$  : Vector carga.

Para el mallado de nuestro modelo numérico utilizamos elementos finitos tipo shell41 triangular de ancho constante sin rigidez a la compresión. Se da una descripción de este elemento en el anexo 2.

Uno de los elementos de atención en cuanto a los esfuerzos resultantes en la membrana, son los esfuerzos de Von-Misses, que otorga información respecto al estado general de esfuerzos, siendo este además un criterio de falla. Los esfuerzos de Von-Misses (o esfuerzos equivalentes) se evalúan a través de la relación siguiente:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.3)$$

Siendo  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , las tensiones principales, y habiéndose obtenido la expresión a partir de la energía de distorsión en función de las tensiones principales:

$$E_{def, dist} = \frac{1}{6G} \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (3.4)$$

La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado debe su nombre a Richard Edler von Mises (1913) propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor. Sin embargo, el criterio fue claramente formulado con anterioridad por Maxwell en 1865 (Ford, 1963) más tarde también Huber (1904), en un artículo en polaco anticipó hasta cierto punto la teoría de fallo de Von Mises (Hill, 1950). Por todo esto a veces se llama a la teoría de fallo elástico basada en la tensión de Von Mises como teoría de Maxwell-Huber-Hencky-von Mises y también teoría de fallo  $J_2$ .

### 3.3 Mediciones en el modelo analítico

En el modelo analítico (figura 3.4), se hace una corrida donde sólo se aplican las fuerzas equivalentes al presfuerzo (además del peso propio que se considera en todos los casos) y se pueden observar los resultados que éstas generan. Estos resultados que se evalúan serán los esfuerzos de Von-Misses. Luego, para visualizar la interacción que se genera a partir de

la adición del viento, se hace otra corrida donde se incluye las fuerzas equivalentes debidas al viento. Esto genera un cambio en los resultados de nuestra membrana.

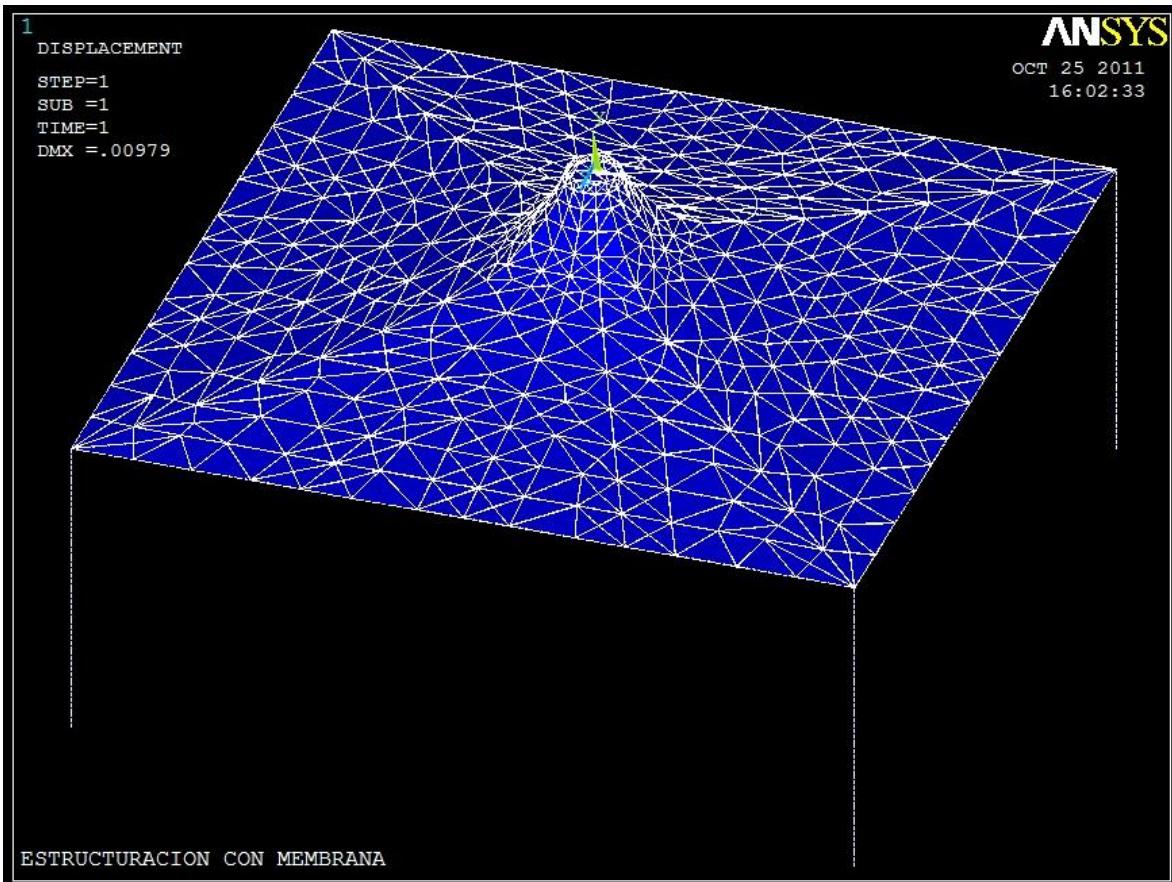


Figura 3.4. Modelo discreto de elementos finitos

### 3.3.1 Análisis Modal

El análisis modal nos permite conocer las frecuencias naturales de la estructura con la finalidad de prever algún fenómeno de resonancia. También, es necesario conocer la frecuencia fundamental de la estructura para poder aplicar el método de magnificación dinámico que marca en reglamento para efectos de viento. La ecuación modal de estudio es la mostrada en la ecuación 3.5.

$$([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]) \{\mathbf{U}\} = \mathbf{0} \quad (3.5)$$

$\omega$ : Frecuencia natural de la estructura

K: Matriz de rigidez

M: Matriz de masa

U: Vector de desplazamientos nodales

Aplicaremos el Método de Block - Lanzos (manual Ansys, 2011) sin especificar los grados maestros.

### 3.4. Generalidades del programa

Nuestro programa toma elementos ya establecidos que incluye el programa Ansys, tales como elementos finitos, “solvers”, métodos estructurales, etc. De este punto partimos para formular nuestro problema particular. Un esquema del proceso de generación del modelo y sus resultados se muestra en la figura 3.5. Al final, los resultados se solicitan a través de la interfaz gráfica.

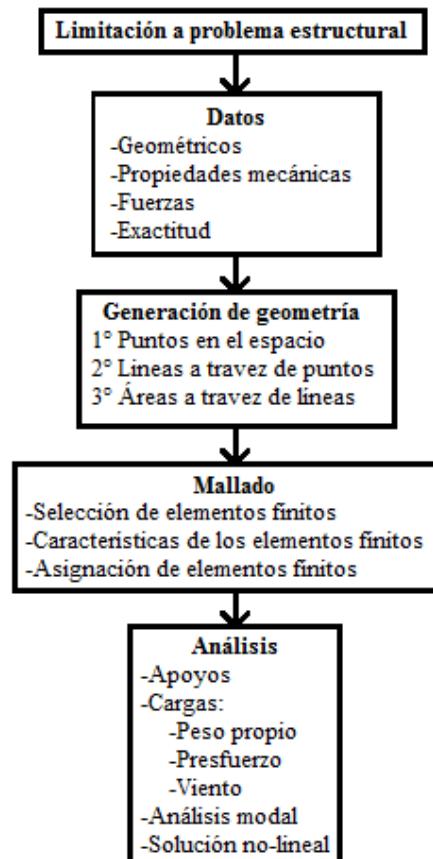


Figura 3.5. Diagrama de bloques del programa

### 3.5. El modelo físico a escala reducida

El modelo a escala se elabora al combinar la lona estructural con un marco y cables de acero (figura 3.6). Un tubo hace el trabajo de puntal y es equilibrado por la lona y cuatro cables tensionantes que lo comprimen. Este modelo se somete a una fuerza pretensora inicial y luego a efectos en túnel de viento para medir en cada uno de estos estados sus deformaciones con extensómetros (strain-gages) y así calcular sus esfuerzos. La fuerza de presfuerzo será medida a partir de la deformación unitaria producida en el puntal partiendo del hecho que se cuenta con las propiedades geométricas y mecánicas de dicho elemento. El efecto de viento será cuantificado por la velocidad producida por éste dentro del túnel a través de un anemómetro de aguja y por medio de las expresiones que marcan las NTC-DF 2004 para calcular las presiones actuantes.

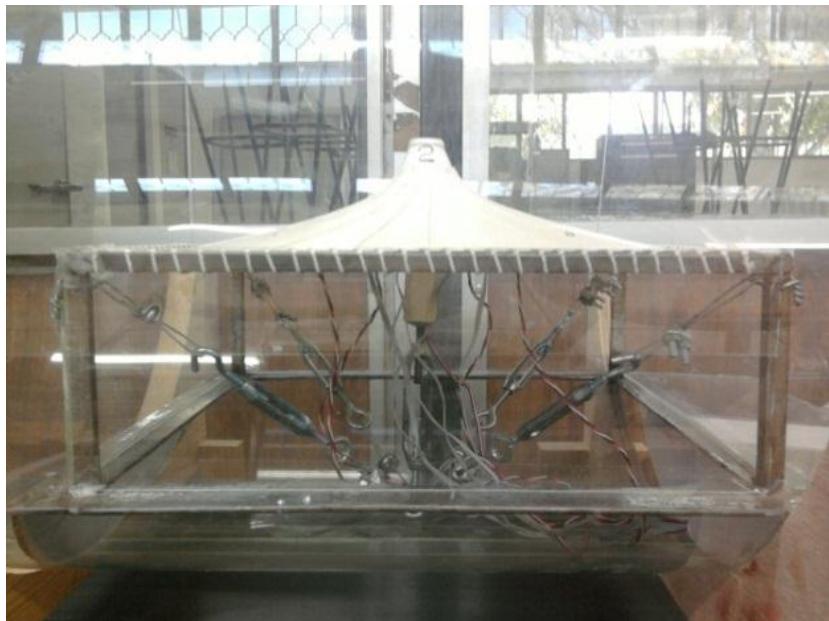


Figura 3.6. El modelo físico a escala reducida

Para la elaboración de la membrana, primero se calcula la forma de las áreas que serían los “gajos” que uniéndolos formarían la superficie. Se dibuja en AutoCAD la forma 3D de esta superficie, para después dividirla en gajos. Estos gajos a su vez, se dividen en varios segmentos de modo que cada gajo fuese formado exclusivamente por triángulos. De este modo, se puede obtener la forma de una superficie plana que al “acoplarse” con sus colindantes resulten en justamente la forma que buscamos.

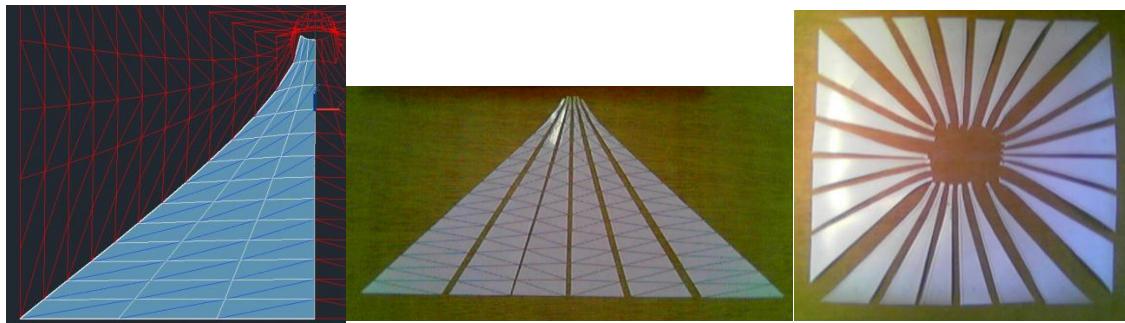


Figura 3.7. Proceso de elaboración de membrana

El modelo físico a escala está hecho con el material de lona estructural que se menciona en el Anexo 4 y tiene la forma que se muestra en la figura 3.7. La membrana está elaborada mayoritariamente por gajos en dirección concéntrica, pero que debido a las uniones resultaba difícil la colocación de los extensómetros. Se opta por hacer un solo gajo en la parte superior de la membrana para no tener problemas en la colocación de los extensómetros que se ubicarán en la parte más alta de la membrana (figura 3.8).



Figura 3.8. Gajo de corona

La estructura metálica soldada está hecha con una sección cuadrada de acero de 1cm de lado con las dimensiones mostradas en la figura 3.9. Para la colocación en el túnel de viento se hace un marco de solera a modo de base, con la misma dimensión interna que el marco que sostiene a la membrana. El modelo se sostiene simplemente apoyado en ambos lados de la solera que tienen contacto con el túnel por medio de fricción (el peso de la estructura es muy grande a comparación de las fuerzas de viento que se van a aplicar).

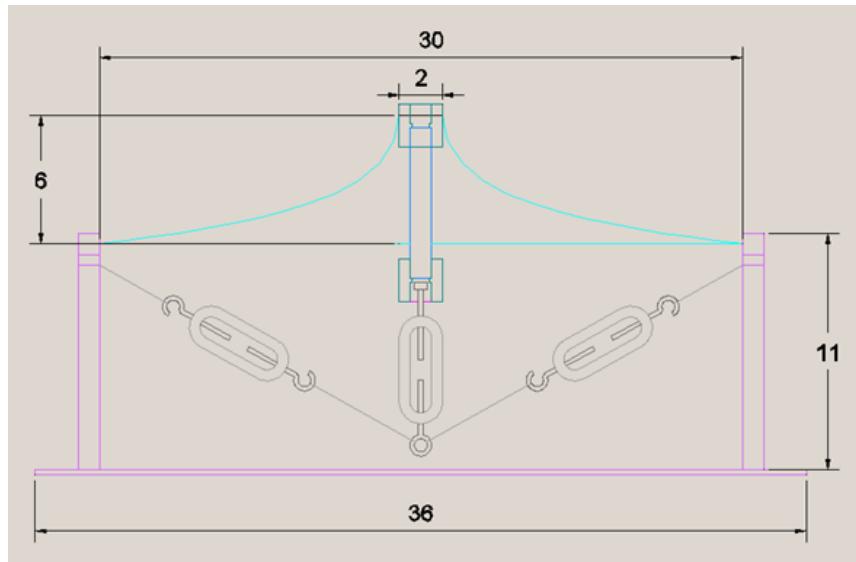


Figura 3.9. Diagrama del modelo físico a escala

Para las mediciones se usa equipo de “Instruments Division”. El equipo “Gauge Installation Tester 1300” (figura 3.10) se utiliza para asegurarse que la instrumentación de los extensómetros haya sido realizada correctamente. Dos equipos “Strain Indicator P-3500 y Switch and Balance Unit” (figura 3.11) trabajan en conjunto. Los cables que vienen de los extensómetros se conectan a la unidad “Switch” y ésta es conectada a la unidad “Indicator”. En la unidad “Switch” se puede balancear la medida de las micro-deformaciones a cero, para una medición inicial. Esta microdeformación inicial puede ser debida a las deformaciones ocurridas en la colocación y a efectos de temperatura. En la unidad “Switch” se elige el extensómetro del que queremos recibir la señal en la unidad “Indicator” que muestra en una pantalla la deformación unitaria  $\times 10^{-6}$ .



Figura 3.10. Gage instalation Tester 1300



Figura 3.11. Strain Indicator P-3500 y Switch and Balance Unit

Para comenzar, se utilizan los tensores mecánicos de ajuste de longitud de los cables; el modelo físico, al ser elaborado de forma manual tiene pequeñas variaciones de longitud, con estos tensores, se puede dar la correcta longitud de los cables, ya que estas ligeras variaciones afectan las mediciones. Una vez colocados en su posición, estos no se moverán más durante todo el proceso. Después, para aplicar el presfuerzo se utiliza el tensor que está en el puntal, el cual, al dar vueltas aumenta la longitud del puntal traduciéndose esto en una tensión en la membrana, y en los cables de acero. Estos últimos sufren una deformación muy pequeña en comparación con la membrana.

Para comenzar con las mediciones, debe asegurarse que la lona no esté a tensión ni floja antes de balancear la medición del extensómetro del puntal a cero. Se procede por medio de un proceso iterativo de prueba y error, en el cual, se observa la medición de deformaciones unitarias en el puntal. En teoría, cuando la membrana no está experimentando tensión, no hay una resistencia al aumento en la longitud del puntal, por lo que no debería cambiar su medición aunque este aumente. Se busca encontrar ese punto. Todo esto es comparado con la tensión palpable en la membrana. Es necesario hacer este nuevo paso iterativamente, ya que al poner en cero el primer extensómetro, cuando terminamos con el último, el primero ya cambió de medición. Con tres veces que se realice este proceso las mediciones de los extensómetros ya no cambian de manera significativa. Luego, se balancea a cero el resto de los extensómetros.

A medida que aumenta la longitud del puntal se observa una medición que va aumentando en magnitud como valor negativo. Esto es porque se detectan compresiones. Hacemos esto hasta llegar a una micro-deformación de  $-16 (\times 10^{-6})$ .

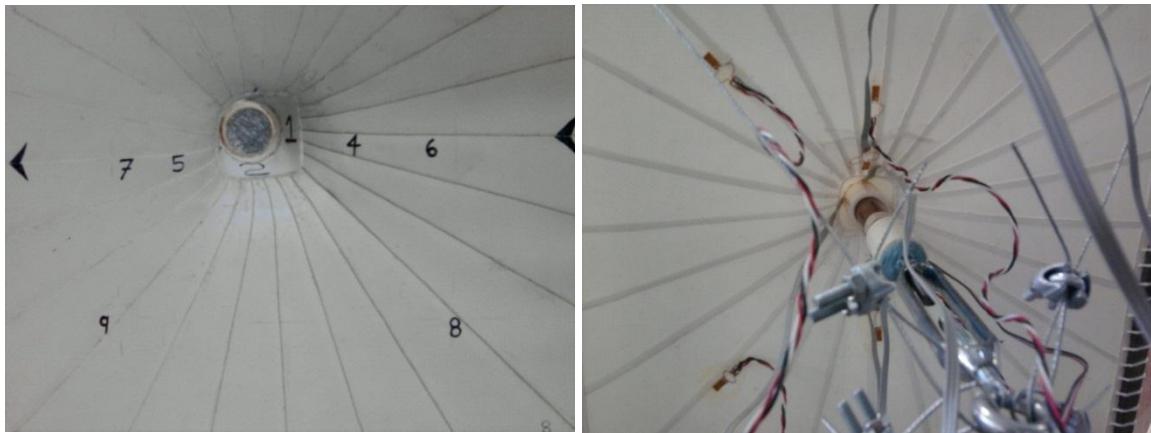


Figura 3.12. Ubicación de los extensómetros

### 3.5.1 Mediciones en el modelo físico a escala reducida

En el modelo físico, hay varios factores que tomar en consideración para la medición. Uno de ellos es el presfuerzo estático, el cual es aplicado por medio de giros en un tensor que aumenta la longitud del puntal. Al estar restringido en su parte inferior por cables de acero, lo que provoca es un desplazamiento igual entre la membrana y el puntal en la periferia donde tienen contacto. Cuando la membrana y los cables de acero producen una resistencia a la deformación se produce una compresión en el tubo de cobre que es medida por medio de un extensómetro (strain gage) pegado al tubo en dirección paralela al eje longitudinal. Existen también otros cuatro tensores que tienen la finalidad de poner a punto la longitud de los cables de acero. Estos tensores no se mueven una vez que empieza el alargamiento del puntal.

Al lograr la deformación necesaria para producir la fuerza requerida, el puntal y los cables no cambian de longitud y se miden las deformaciones en los extensómetros para conocer el nuevo estado de deformación. La lectura de la deformación cambia un poco en el tiempo, pero al cabo de un minuto aproximadamente, ésta reduce sus variaciones, hasta que prácticamente no cambia. Para la parte dinámica, existen en el modelo acoplado a las

columnas de acero paredes de acrílico y cartones que tienen la finalidad de impedir el paso del viento por debajo de la estructura, lo que garantiza el estado de carga de estudio.

Cuando es encendido el túnel de viento, las deformaciones en los extensómetros empiezan a cambiar y no tienden a un valor específico debido a la naturaleza dinámica del viento. La variación de las mediciones depende de la posición del extensómetro pero se puede observar a simple vista que se mantiene dentro de un rango.

### **3.5.2. El túnel de viento**

Se ha elaborado un túnel de viento casero, ubicándolo en el laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería. Sus componentes principales se muestran en la figura 3.13 y son:

- Un ventilador de tipo industrial con 1HP. Este brinda la posibilidad de cambiar de altura para poder ser ajustado a cualquier escritorio disponible.
- El túnel está hecho de acrílico de 4mm. Este es una hoja de acrílico doblada y pegada en su parte inferior por otro acrílico y pegamento especial.
- 3 bases de madera a modo de apoyo al túnel para posicionarlo sobre el escritorio. De la parte superior de cada lado del apoyo sale un hilo nylon que rodea al tubo para evitar que se salga de los apoyos.
- Fabricamos una transición de malla de acero con la finalidad de hacer un cambio paulatino de la sección del tubo a la del ventilador. Esta malla está unida por alambres en sus diferentes piezas y lleva una membrana plástica por la cara interior sujetada por nudos hechos con hilo nylon a poca distancia para mantener la membrana en su sitio.
- Una tela impermeable que en este caso es la misma lona que usamos para el modelo a escala reducida.

La transición de metal y plástico está ligada al túnel por medio de la lona impermeable. Esta está pegada a su vez, en la transición y el túnel por cinta adhesiva. La intención de usar la tela impermeable es que las vibraciones generadas por el ventilador no se transmitan al

modelo a escala ubicado en el túnel. Cuando el túnel está ensamblado (figura 3.14) se puede modificar colocar el modelo a escala y tener acceso a él por la parte abierta del túnel.

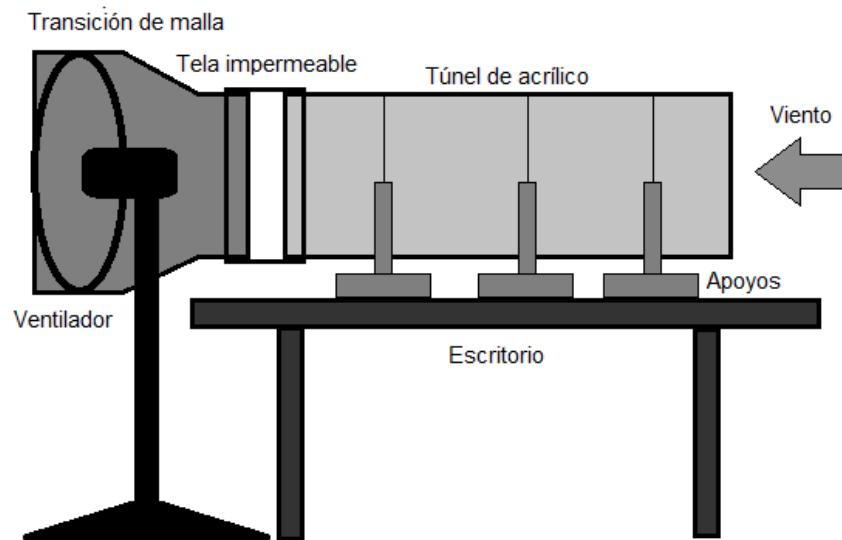


Figura 3.13. Diagrama del túnel de viento



Figura 3.14. El túnel de viento en el laboratorio

# Capítulo 4. Desarrollo

## 4.1. La acción del viento

El efecto de viento sobre una estructura, requiere de investigaciones acerca del comportamiento de la estructura bajo túnel de viento y de instrumentación en prototipos para evaluar sus efectos en cada zona. Las estructuras más comunes se encuentran tipificadas en el Reglamento (Manual CFE). Sin embargo, estructuras especiales como la que nos ocupa, no se proporciona ningún seguimiento que pudiese ser factible de aplicar. Tanto, si se desea recurrir a eventos de carácter estático, como de efectos dinámicos, para lo cual se requerirían diagramas historia-tiempo en muy diversos puntos de la estructura.

El efecto de viento más importante que se analiza en la estructura se ubica sobre la membrana, no sobre la estructura soportante, cuyos efectos serían mínimos. Al inducir efectos sobre la membrana, ésta los transmite a la estructura y de ahí la circunstancia de revisar la estabilidad del conjunto.

La propuesta para abordar este tema, es a través de la aplicación de sus efectos estáticos sobre la membrana, en gran medida por la información que se dispone a este respecto y que se desglosará poco más adelante. Ya que este es el planteamiento, pasaremos a analizar la estructura conforme a las normas vigentes en términos de establecer las presiones a las que estará sujeta la membrana.

La velocidad de diseño por viento se evalúa de conformidad con la ecuación siguiente (NTC-D.F. 2004):

$$V_D = F_{TR} F_\alpha V_R \quad (4.1)$$

Para el caso que nos ocupa:  $V_R = 80$  Km/h (22.2 m/s) - Periodo de retorno de 50 años (Manual de diseño CFE); Asimismo los parámetros,  $F_{TR} = 0.9$  y  $F_\alpha = 1.0$ .

Se han considerado aquí los parámetros R2 y T2.

Por lo tanto, la velocidad de diseño será  $V_D = 72$  Km/h. (20m/s)

La presión de diseño se evalúa mediante la relación:

$$P = 0.048 C V_D^2 \quad (4.2)$$

Estando  $V_D$  en m/s.

Sustituyendo obtenemos:

$$P = 19.2 C \text{ (en } kg/m^2) \quad (4.2.1)$$

El valor del coeficiente C es variable y se tomará de conformidad con los planteamientos de investigadores japoneses correspondientes a una membrana en forma de pseudocatenoide (Yuki Nagai, 2000) como se muestra en la figura 3.4.

#### 4.2. Efectos dinámicos. Factor de magnificación dinámica

Si procediéramos a evaluar con detalle el factor de magnificación dinámica que considera los efectos de turbulencia, de conformidad al reglamento (NTC-DF 2004), el procedimiento consistiría en evaluar dicho factor G a través de la relación siguiente:

$$G = 0.43 + g \sqrt{\frac{R}{C_e} \left( B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1 \quad (4.3)$$

Donde:

$$g = \left( \sqrt{2 \ln (3600 v)} + \frac{0.58}{\sqrt{2 \ln (3600 v)}} \right) \frac{1}{2.3} \geq 1.48 \quad (4.4)$$

Siendo:

$$v = n_o \sqrt{\frac{SF}{SF + \beta B}} \quad (4.5)$$

Para la evaluación de los parámetros involucrados se utilizaran en parte las gráficas de las “Normas Técnicas Complementarias” proporcionadas para este fin.

Altura de la estructura  $H = 1.2 \text{ m (membrana)} + 2.4 \text{ m (columnas)} = 3.6 \text{ m}$

Base de la estructura  $b = 6 \text{ m}$

Para una exposición R2 que hemos considerado, obtenemos de la tabla 5.1 del reglamento los valores:  $R = 0.08$ ;  $a = 10$ ;  $n = 0.28$ ;  $C_e = 0.75$

$$C_e = \left(\frac{z}{a}\right)^n = \left(\frac{3.6}{10}\right)^{0.28} = 0.75 \quad (4.6)$$

$B = b/H = 6/3.6 = 1.666 \approx 1.7$ . En la Fig. 5.1 de las Normas, obtenemos el factor de excitación de fondo  $B = 1.52$

Evaluamos enseguida

$$V_H = V_R \sqrt{R C_e} \quad (4.7)$$

$$V_H = 22.2 \sqrt{0.08 * 0.75} = 5.43 \text{ m/s}$$

Para evaluar el número de ondas/m se requiere conocer primero la frecuencia fundamental de la estructura, análisis que realizamos pero que abundaremos sobre él más adelante. Sea por el momento asentado sólo que la primer frecuencia (y la segunda) de la estructura corresponde a un valor de 11.788Hz (parámetro  $\eta_0$ ).

La relación de energía de ráfaga F está dado por:

$$x_o = (1220 n_o / V_H) \quad (4.8)$$

$$x_o = (1220 * 11.6 / 22.2) = 637$$

$$F = \frac{x_o^2}{(1 + x_o^2)^{4/3}} \quad (4.9)$$

$$F = \frac{637^2}{(1 + 637^2)^2} = 0.0135$$

El factor de reducción por tamaño S está dado por

$$S = \frac{\pi}{3} \left( \frac{1}{1 + \frac{8 n_o H}{3 V_H}} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{10 n_o b}{V_H}} \right) \quad (4.10)$$

$$S = \frac{\pi}{3} \left[ \frac{1}{1 + \frac{8 * 11.6 * 3.6}{3 * 5.43}} \right] \left[ \frac{1}{1 + \frac{10 * 11.6 * 6}{5.43}} \right]$$

$$S = 1.04719 * 0.04649 * 0.00774 = 0.00037$$

Evaluamos la tasa media de fluctuación  $v$  mediante la ecuación (4.5) que arriba se indica, sustituyendo los parámetros obtenidos S, F y para un amortiguamiento  $\beta = 0.01$  que sugieren las NTC, obtenemos:

$$v = 11.788 \sqrt{\frac{0.00037 * 0.0135}{0.00037 * 0.0135 + 0.01 * 1.7}}$$

$$v = 0.202$$

$$g = \left( \sqrt{2 \ln(3600 * 0.202)} + \frac{0.58}{\sqrt{2 \ln(3600 * 0.202)}} \right) \frac{1}{2.3}$$

$$g = 1.64 > 1.48$$

Por lo que el factor de magnificación dinámica será igual a:

$$G = 0.43 + 1.64 \sqrt{\frac{0.08}{0.75} \left( 1.7 + \frac{0.00037 * 0.0135}{0.01} \right)}$$

$$G = 1.128 > 1$$

Por lo tanto nuestra fuerza de diseño será  $19.2 * 1.128 = \mathbf{21.65 \text{ kg/m}^2}$ .

## 4.3. Aplicación de cargas equivalentes en el modelo numérico

### 4.3.1. Presfuerzo

Se aplica un presfuerzo de  $200 \text{ T/m}^2$ . La fuerza equivalente es de  $0.012566 \text{ T}$  en cada uno de los dieciséis nodos de la corona. El desglose de los cálculos a partir del programa se muestra en el anexo 2. En la figura 4.1. podemos apreciar las cargas equivalentes de presfuerzo que se aplican a todos los nodos de la corona de la membrana para aplicar el presfuerzo. Es importante hacer notar que esta magnitud de cargas es debida a la cantidad de nodos en la corona. Si existieran más, o menos nodos de corona, las cargas se verían modificadas pero el presfuerzo final sería el mismo.

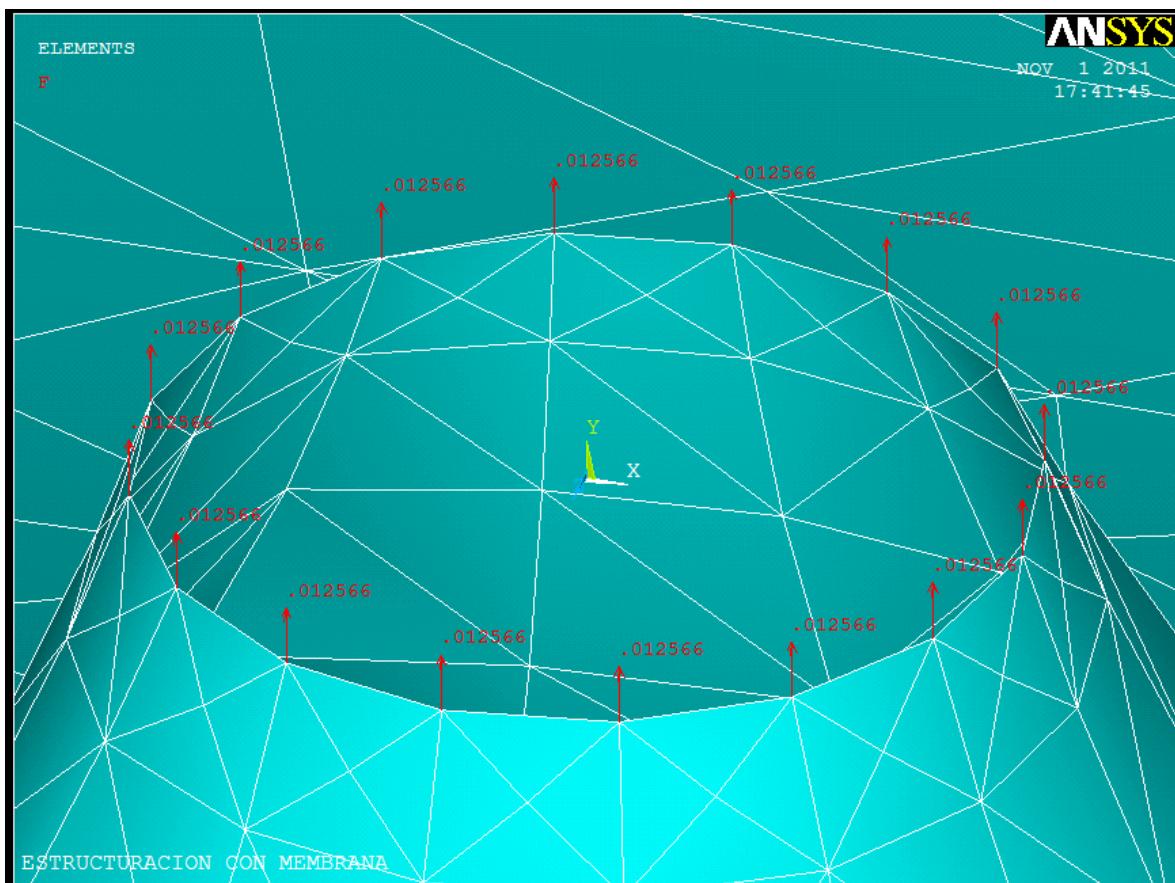


Figura 4.1. Presfuerzo en modelo analítico

#### 4.3.2. Cargas de viento

El objetivo de esta parte del programa es aplicar tres fuerzas a cada nodo (una en cada dirección principal) de modo que la fuerza equivalente sea normal a la superficie en ese punto y afectada por un coeficiente de presión. Este es un proceso iterativo que se maneja por medio del número de nodo desde primero hasta el último, asignando cargas sólo a los nodos que están completamente rodeados por elementos membrana. En la figura 4.2 podemos ver en rojo las fuerzas en las direcciones principales. Las fuerzas de presfuerzo son las que salen de la corona y llevan una dirección completamente vertical. Al mostrarse todas las fuerzas que actúan en la estructura se puede comparar la magnitud de estas. Así, a simple vista podemos ver que las cargas de presfuerzo son de una magnitud mucho mayor que las cargas de viento.

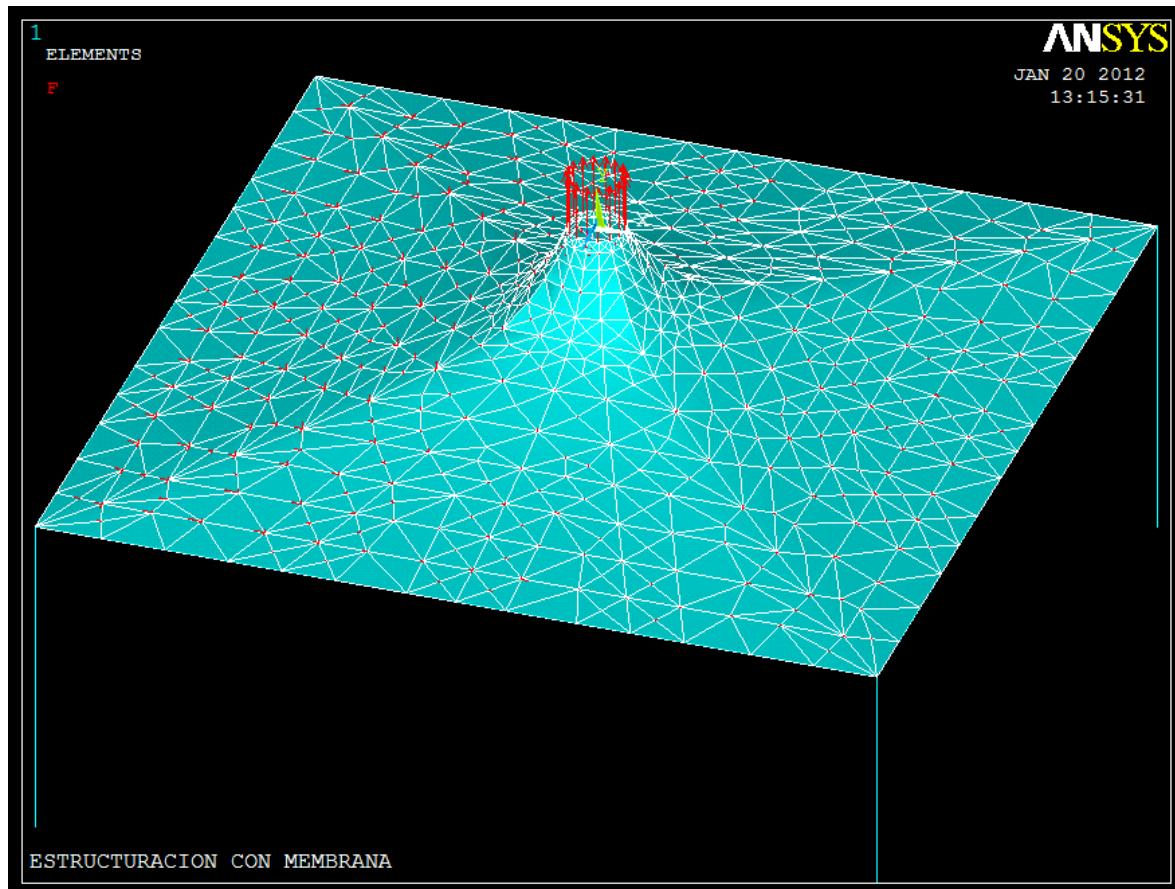


Figura 4.2. Viento en modelo analítico

## 4.4. Aplicación de cargas en el modelo físico

### 4.4.1. Presfuerzo

A medida que giramos el tensor para aumentar la longitud del puntal observamos un valor en el “Strain Indicator P-3500” que va disminuyendo y esto es porque se detectan compresiones. Hacemos esto hasta llegar a una lectura de 16 que es la necesaria para lograr un presfuerzo de  $200\text{ T/m}^2$ .

“Cálculo de deformación unitaria”

La fuerza necesaria para producir  $200\text{ T/m}^2$  en el modelo físico es de:

Área transversal de la lona en la corona:

$$A_l = 0.0008\text{ m} * 0.02\text{ m} * 3.1416$$

$$A_l = 5.026 \times 10^{-5}\text{ m}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.11)$$

$$P = \sigma * A \quad (4.11.1)$$

$$P = 200 \text{ T/m}^2 * 5.026 \times 10^{-5}\text{ m}^2$$

$$P = 0.01005 \text{ T} = 10 \text{ kg}$$

$$\text{Módulo de elasticidad del cobre} = 1.1 \times 10^7 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Área transversal del tubo} = 5.026 \times 10^{-5}\text{ m}^2$$

$$\text{Presfuerzo requerido} = 200 \text{ T/m}^2$$

$$\text{Ancho de la lona} = 0.0008 \text{ m}$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.12)$$

Igualando la ecuación 4.11 y 4.12 en  $\sigma$ :

$$\frac{P}{A} = E\varepsilon$$

Por lo que:

$$\varepsilon = \frac{P}{EA}$$

Y finalmente podemos evaluar la deformación unitaria necesaria para la carga deseada.

$$\varepsilon = \frac{0.01T}{\frac{1.1 \times 10^7 T}{m^2} * 5.6 \times 10^{-5} m^2}$$
$$= 1.6 \times 10^{-5}$$

#### 4.4.2. Fuerzas debidas al viento dentro del túnel

Por medio de las ecuaciones de las NTC-DF 2004 podemos tener una idea de qué presión actúa dentro del túnel de viento a partir de la velocidad del flujo. Se midió una velocidad de 15Km/hr, la cual permaneció una vez que colocamos el modelo a escala dentro del túnel (figura 4.3) por lo tanto, usando la ecuación (4.2) tenemos:

$$15 \text{ Km / hr.} = 4.1666 \text{ m / s}$$

$$P = 0.048C V_D^2$$

$$P = 0.048C (4.1666)^2$$

$$P = 0.83C$$

$$P_{\max} = 0.83 * -1 = -0.83 \text{ kg/m}^2$$



Figura 4.3. Medición de velocidad de viento vía anemómetro

# Capítulo 5. Resultados

## 5.1. Análisis modal

Luego de aplicar el análisis modal a la estructura se obtienen las primeras 10 frecuencias y modos para la estructura, las cuales se muestran en las figuras 5.1. y 5.2. Con este primer valor fue que inicia el análisis de empujes paralelos al viento que marca el reglamento, para obtener el factor de magnificación dinámica. Los dos primeros modos son de tipo traslacional.

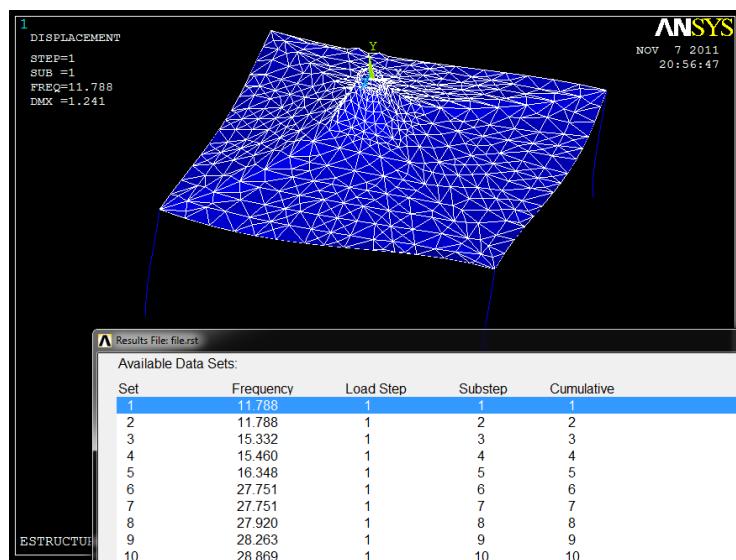


Figura 5.1. Frecuencias en el modelo

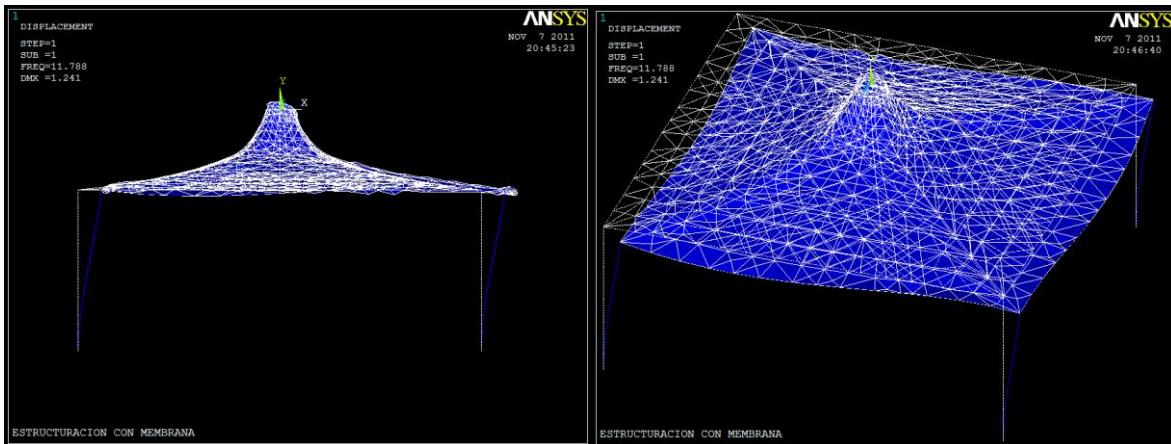


Figura 5.2 Modo fundamental tipo traslacional

## 5.2.Mediciones en el modelo numérico

Aplicando únicamente las cargas de presfuerzo y peso propio al prototipo se obtienen los esfuerzos de Von-Misses mostrados en la figura 5.3. en donde gracias a la vista en planta podemos constatar una distribución simétrica de esfuerzos. También podemos observar una marcada zona de esfuerzos críticos en la corona de la estructura.

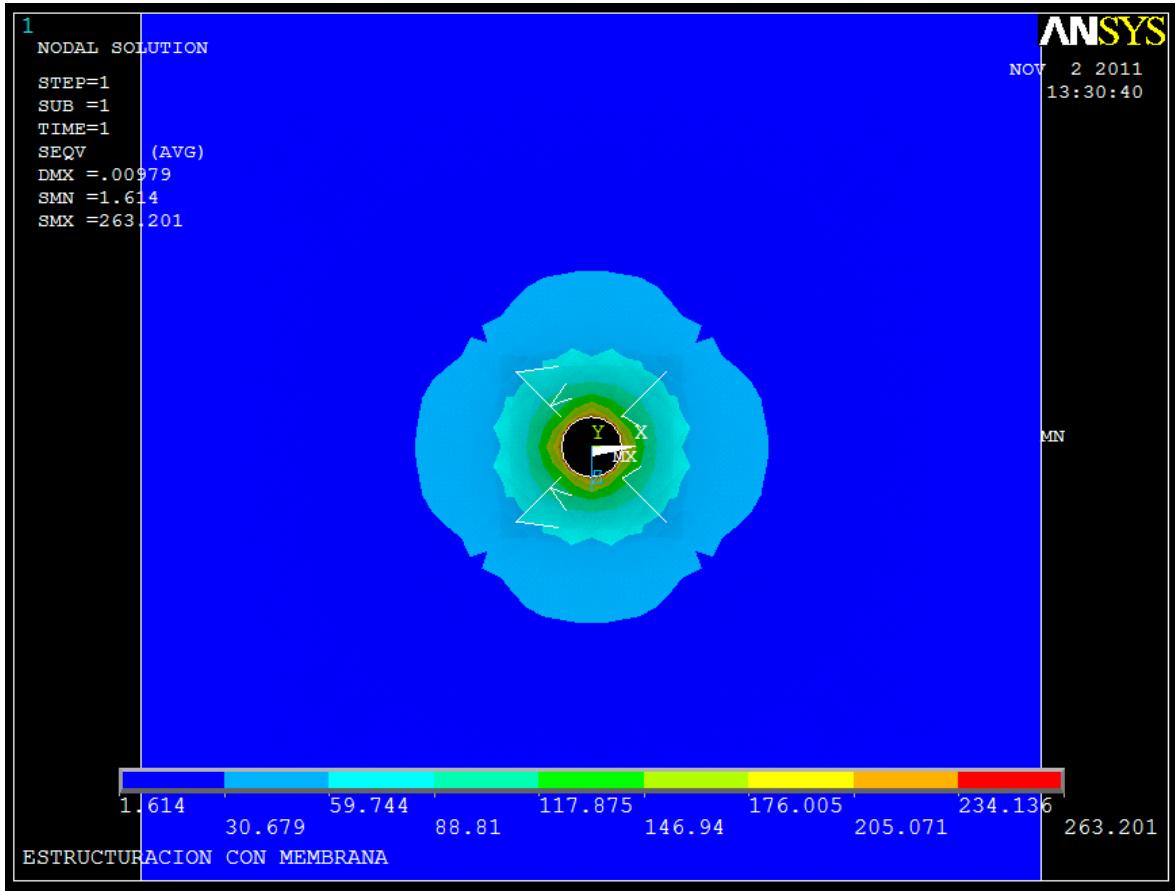


Figura 5.3. Esfuerzos de Von-Misses en prototipo (T/m<sup>2</sup>)

Si quisiéramos observar los esfuerzos en la dirección Y serían como se muestran en la figuras 5.4. en ésta figura podemos ver cómo la distribución de esfuerzos en Y es similar a la distribución de esfuerzos de Von-Misses, ya que los esfuerzos mayores son en esta dirección debido a que los elementos más críticos se orientan hacia el eje Y.

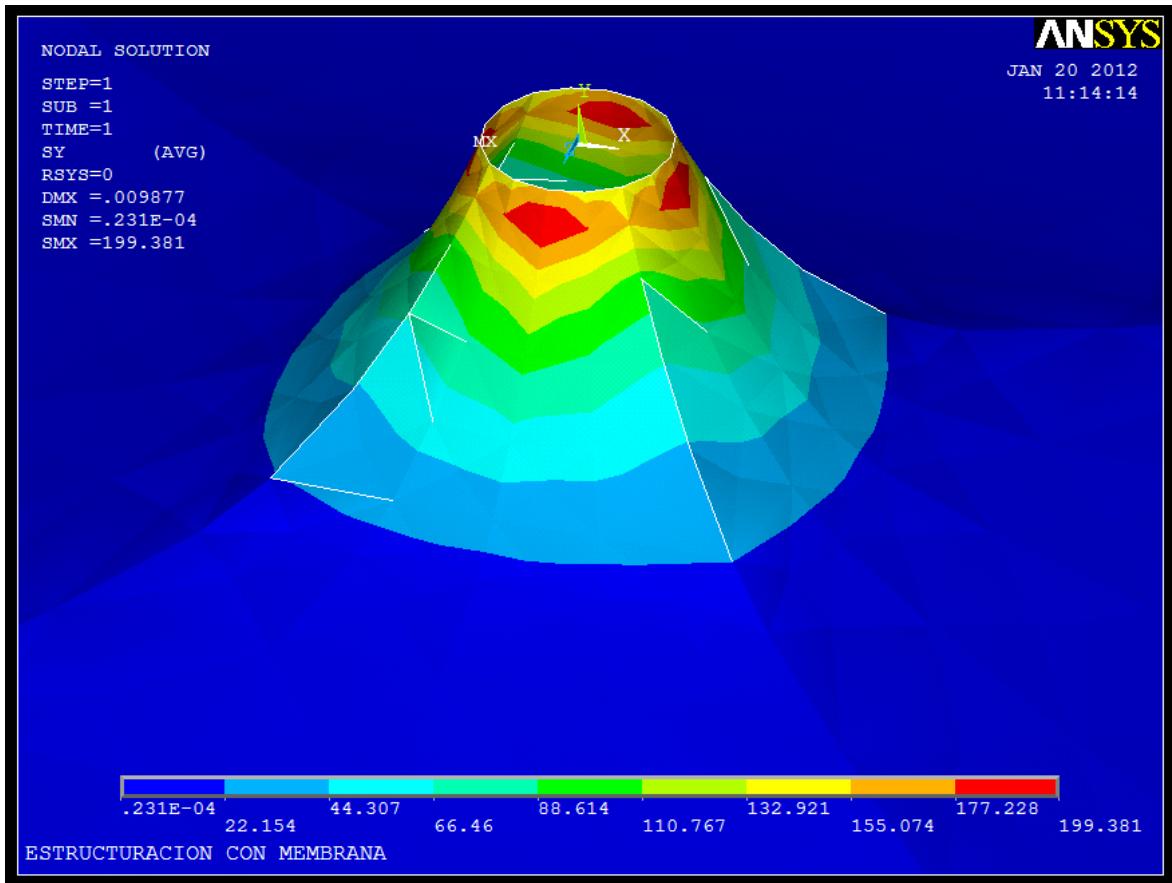


Figura 5.4 Esfuerzos en Y ( $\text{T/m}^2$ )

Al aplicar las cargas de presfuerzo, viento (afectado por el factor de magnificación dinámico) y peso propio a la estructura prototipo propuesta se pueden observar los esfuerzos principales de la figura 5.5. En particular esta imagen sólo sirve como referente para ver dónde están ubicadas las fuerzas de mayor magnitud y el cambio en la distribución de esfuerzos.

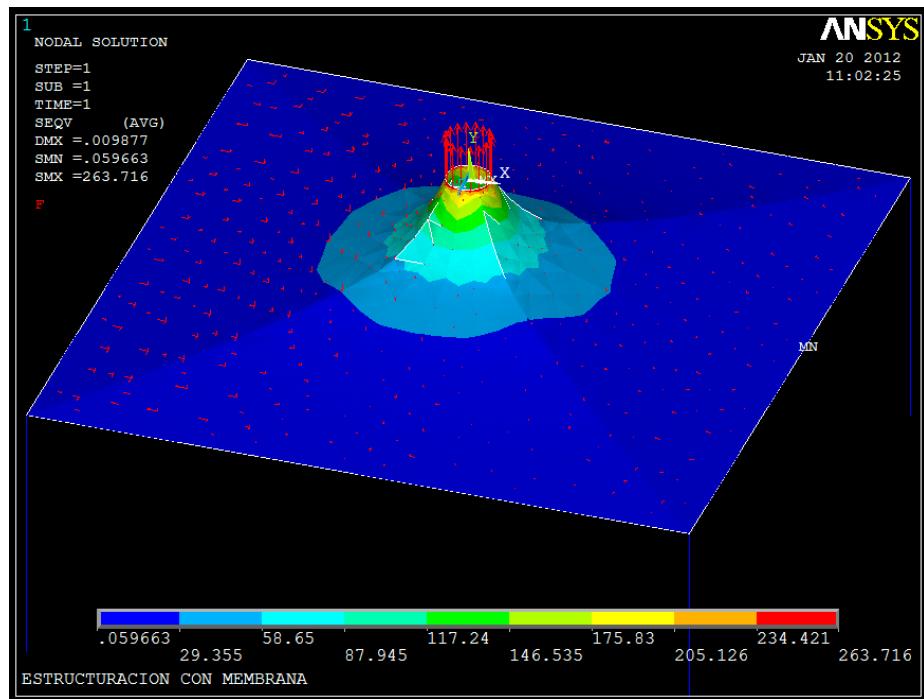


Figura 5.5. Cargas y esfuerzos de Von-Misses en prototipo con acción de viento. Prototipo  
 $(T/m^2)$

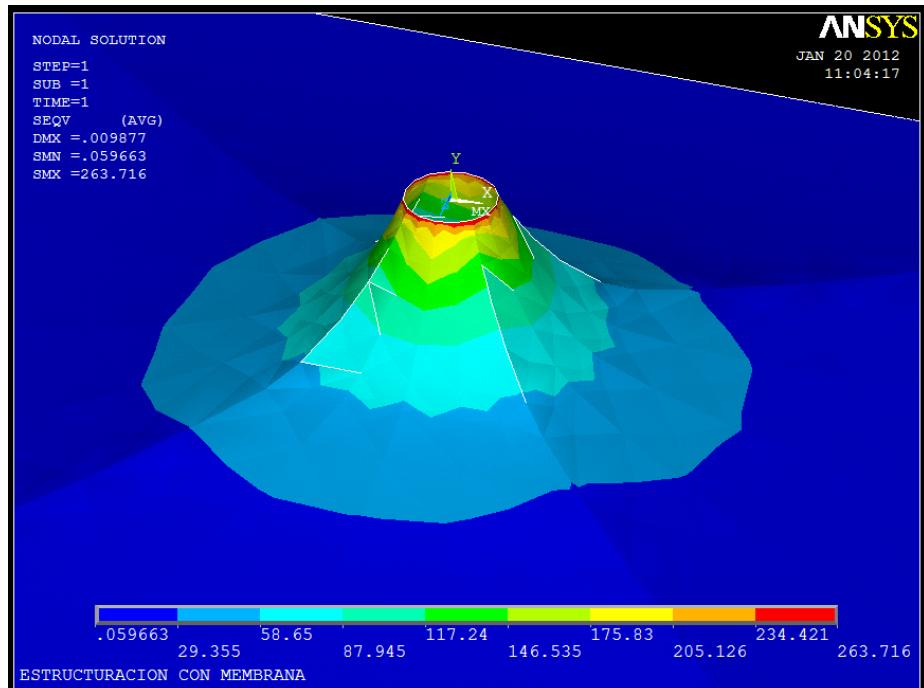


Figura 5.6. Detalle de esfuerzos de Von-Misses en prototipo  $(T/m^2)$

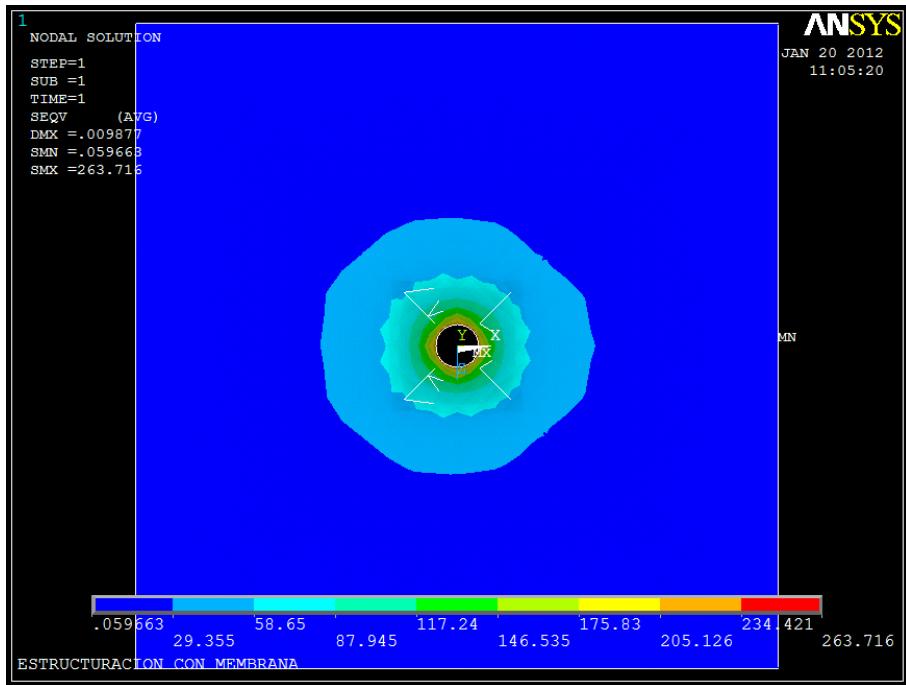


Figura 5.7. Esfuerzos de Von-Misses del prototipo ( $\text{T/m}^2$ ). Vista en planta

En la figura 5.7, podemos apreciar gracias a la vista en planta que existe un cambio en la distribución de esfuerzos. Ahora los esfuerzos que toman valores de entre 29.355 y 58.65 ( $\text{T/m}^2$ ) se acerca más al marco perimetral en dirección  $-X$ . Esto no se alcanza a apreciar en dirección  $+X$  ya que, aunque sí hay un ligero cambio debido a las cargas impuestas, estas son de una magnitud tan pequeña que no repercute de manera importante. También cabe hacer notar que la distribución de esfuerzos es simétrica al eje  $Z$ , ya que es en esa dirección por donde viene el viento y las cargas se han supuesto simétricas.

Cuando se verifican los esfuerzos para la estructura “modelo” (se hace referencia al “modelo” cuando se habla del modelo a escala reducida) se observan los resultados mostrados en las figuras 5.8 y 5.9. Esfuerzos máximos de  $176 \text{ T/m}^2$  que cambian rápidamente a valores de  $98.14 \text{ T/m}^2$  en la zona donde se ubican los extensómetros.

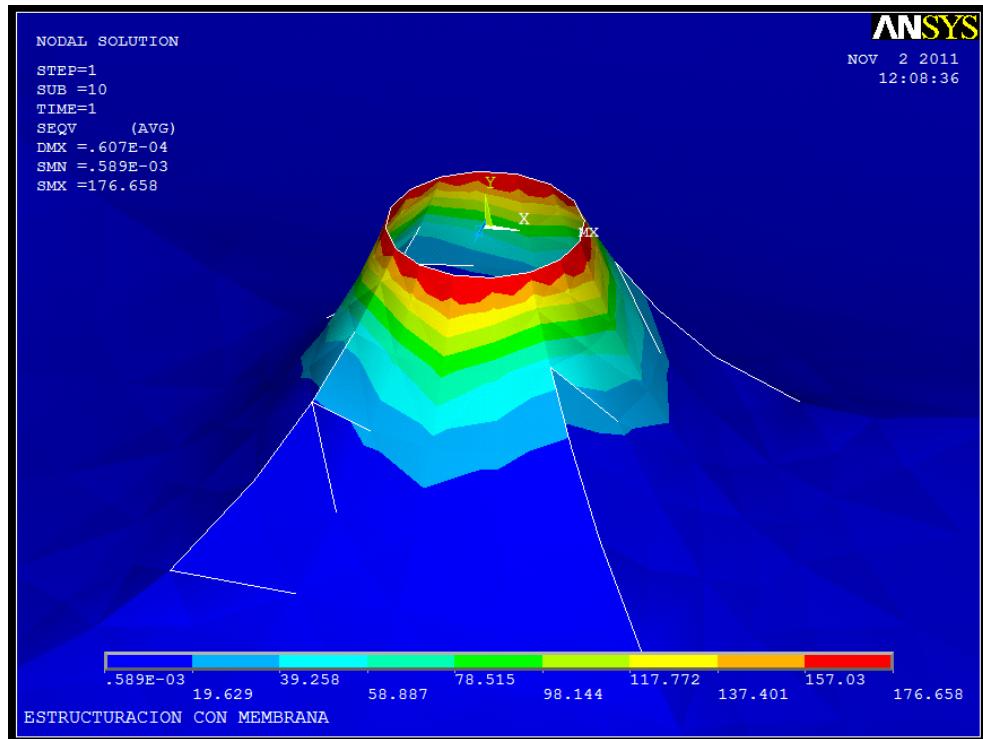


Figura 5.8. Detalle de esfuerzos de Von-Misses en el modelo numérico ( $\text{T/m}^2$ )

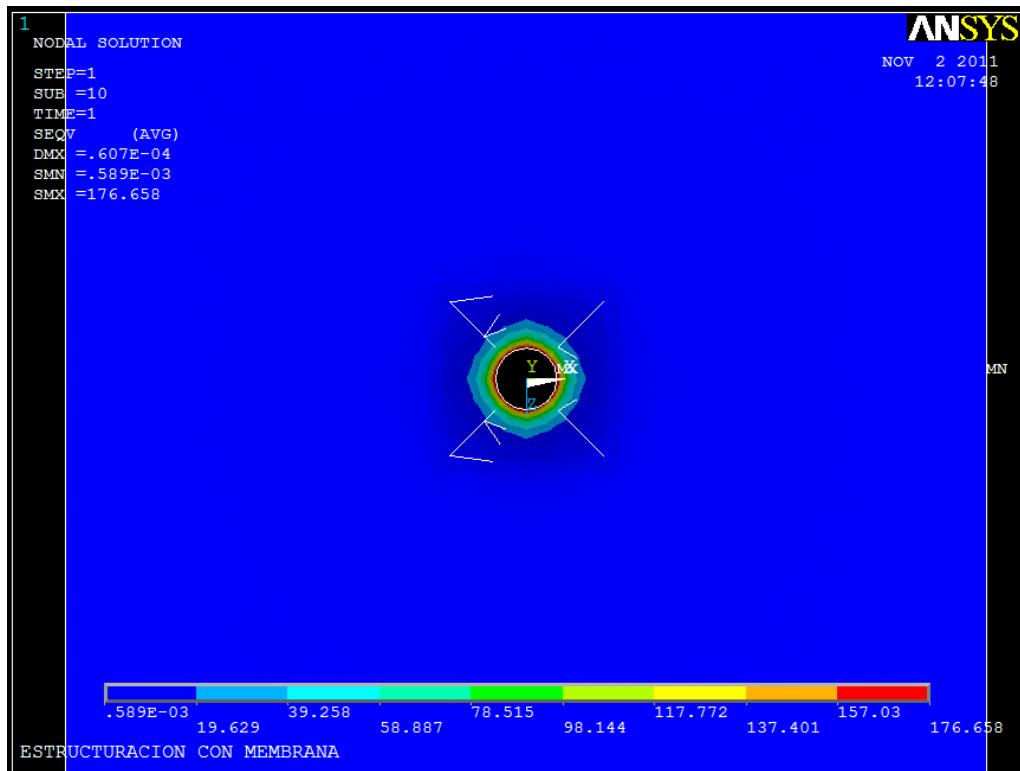


Figura 5.9. Esfuerzos de Von-Misses en el modelo numérico ( $\text{T/m}^2$ ). Vista en planta

### 5.3. Mediciones en el modelo físico a escala reducida

Las deformaciones unitarias registradas en el modelo físico aplicando presfuerzo, luego con la acción del viento y sin viento otra vez (para observar cuánto se recupera la deformación), se muestran en la tabla 5.1. En esta tabla podemos observar los valores de deformación unitaria que marcan los extensómetros al aplicar el presfuerzo calculado (10kg con una deformación unitaria de  $-17 \times 10^{-6}$ ) para una fase denominada “estático 1”. Después, se aplica el viento dentro del túnel y obtenemos los valores para la fase “dinámica”. Finalmente, se deja de aplicar viento y podemos observar una recuperación en la deformación en la fase “estático 2”.

Tabla 5.1. Mediciones de deformación unitaria ( $\times 10^{-6}$ ) en modelo físico

Extensómetro	Estático 1	Dinámico	Diferencia	Estático 2
1	2367	2301	66	2311
2	373	309	64	311
3	1909	1854	55	1909
4	69	6	63	
5	34	-17	51	
6	190	146	44	
7	237	182	55	
8	125	77	48	
9	150	86	64	
10	-18			-14

Con el módulo de elasticidad propuesto a partir de los datos técnicos de la lona se pueden conocer los esfuerzos a los cuales estaría sometida la membrana.

Tabla 5.2. Esfuerzos en el modelo físico ( $T/m^2$ )

Extensómetro	Estático 1	Dinámico	Estático 2
1	73.96875	71.90625	72.21
2	11.65625	9.65625	9.7187
3	59.65625	57.9375	59.6562
4	2.15625	0.1875	
5	1.0625	-0.53125	
6	5.9375	4.5625	
7	7.40625	5.6875	

8	3.90625	2.40625	
9	4.6875	2.6875	

En este caso sólo hacemos referencia a los nueve extensómetros ubicados en la membrana, ya que el décimo que está ubicado en el tubo “puntal” fue el que utilizamos como referencia para saber a qué fuerza de presfuerzo inicial estaba sometida la membrana. De este modo podemos darnos una idea de la relación que existe en magnitud de los esfuerzos con su ubicación en la membrana.

# Capítulo 6. Discusión de resultados

No es tan relevante el factor de magnificación dinámica al ser un valor muy cercano a 1. Esto es debido a que las frecuencias del viento están lejos de los valores que podrían hacer entrar en resonancia a una estructura de estas características. También, la relación entre altura y base de nuestra estructura no es tal que produzca magnificaciones en este sentido, como la de un edificio muy alto con una pequeña base, o una base de forma irregular.

En el modelo numérico, para la escala del prototipo los esfuerzos principales superan los  $200\text{T/m}^2$  y en la escala del modelo reducido son menores a esta cantidad. Esto es debido a que en ambos casos se tiene el mismo espesor de membrana, el cual se vuelve importante cuando trabajamos en el modelo con escala reducida.

Puede aumentarse la precisión con la que se calcula el coeficiente de presión, pero esto no cambiaría de manera importante los resultados, ya que este valor no es mayor que la unidad en succión (y en este caso particular no hay presiones) y por lo tanto no aumentaría las cargas significativamente. Se puede ver claramente que las cargas predominantes para este específico caso de estudio son las de presfuerzo. Una forma gráfica de apreciarlo es con la figura 5.5, donde las cargas se encuentran a escala y puede apreciarse claramente la mayor magnitud que existe en las fuerzas en la corona con dirección vertical. El resto de las fuerzas apenas son perceptibles a simple vista en dicha figura, sobre todo en la parte donde el viento succiona de manera más importante.

Existe una considerable diferencia de deformación unitaria vista en la tabla 5.1, en el extensómetro 2 con respecto al 1 y 3. Es curioso que sea el extensómetro 2 el que tenga menor deformación, ya que como fue mencionado anteriormente, para poder colocar los extensómetros en la parte más cercana a la corona fue necesario hacer un solo gajo y el extensómetro 2, al ser el que está ubicado en medio fue puesto en la misma orientación de las fibras de la lona. Es posible que esta situación tenga influencia en los resultados.

Son muy variables las mediciones en los extensómetros, ya que en ocasiones (sobre todo cuando comienza la aplicación del presfuerzo y al querer regresar la deformación del puntal a cero) aparecen mediciones negativas en extensómetros de membrana. También, las

mediciones dinámicas anotadas en las tablas son las extremas, ya que estas mediciones oscilan cuando se aplicaba el viento.

Es necesario que un modelo de este tipo sea de mayores dimensiones, ya que al ser elaborado de manera casi artesanal, las variaciones en las deformaciones puedan ser importantes por errores en los cortes o uniones. Pero para hacer un modelo más grande sería necesario un equipo de aplicación de cargas también de mayores dimensiones. Ahora podríamos considerar llevar el modelo a un túnel de viento ya calibrado, ya que se tiene mayor conocimiento de las situaciones que pueden darse en las pruebas de un modelo de efectos de viento a escala reducida y sus posibles soluciones. Para mayor riqueza de los resultados también sería bueno contar con medidores de presión.

Existe una buena similitud en los datos obtenidos del modelo físico a escala y el numérico: casi el 70% tomando como referencia los  $74 \text{ T/m}^2$  del modelo físico contra  $107 \text{ T/m}^2$  del analítico, considerando este último valor como el promedio de los límites de la medición que se ubica en la zona verde claro (figura 5.8), ya que en la corona de la membrana, que es donde se encuentran los esfuerzos máximos (sería ahí donde se verificaría si la membrana es capaz de soportar dichos efectos) tiene resultados similares. De inicio, hay una similitud importantísima en el modelo físico y numérico: Los esfuerzos principales máximos son localizados en la parte de la corona donde es aplicado el presfuerzo y disminuyen rápidamente conforme evaluamos una parte más baja de la membrana. Esto es porque la lona en la parte de la corona está dispuesta de manera casi paralela a las cargas y la variación de la forma cambia rápidamente conforme se aleja de la corona. También, existe una menor área transversal en esa zona que en el resto de la membrana, lo que provoca que los esfuerzos vayan disminuyendo conforme nos alejamos de esta zona.

No es posible medir los esfuerzos justamente en la unión de la membrana con el puntal (ahí se encuentran los esfuerzos máximos en el modelo), ya que no se puede colocar un extensómetro en ese sitio ni tampoco inmediatamente debajo, ya que la lona al estirarse tocaría la rejilla de los extensómetros y cambiaría las mediciones. Los esfuerzos calculados en los extensómetros de la corona parecen del orden de la mitad de los calculados numéricamente a simple vista en el sitio donde parece están los extensómetros.

Pero la medida que obtenemos con el modelo físico está comparativamente con el modelo numérico, no muy alejada de donde está ubicado el extensómetro que marca dicho valor.

Existe un resultado contrario en los modelos, ya que en el modelo físico, el viento produce disminuciones de tensión, ya que al succionar aumenta el radio de curvatura, lo que tiende a disminuir esfuerzos, y en el modelo numérico, la parte que tiene una mayor fuerza de viento por tener un CP más grande, aumenta la zona que tiene esfuerzos más altos.

# Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

Es interesante cómo puede completarse la interpretación de los resultados de un modelo numérico-analítico con otro físico a escala reducida. De inicio, se observa que los esfuerzos en la membrana que está cercana al marco perimetral son muy pequeños, pero al compararlos con los resultados numéricos brindan más confianza en los resultados.

Debe haber algún error en la medición de la deformación debido a la colocación de los extensómetros o su pegado ya que estos instrumentos son hechos para colocarse en metal y no en un recubrimiento plástico como lo hemos hecho. Para tener en esta parte una mayor certeza de los resultados habría que realizar otro experimento donde se someta a tensión un marco rígido de acero (por ejemplo) donde esté incluido una probeta de lona estructural. Garantizando la compatibilidad de deformaciones podríamos saber qué tanta diferencia existe entre la deformación que se marca en el metal y en la lona, de tal modo que podríamos calcular un factor correctivo. También, lo que se midió es la deformación en el recubrimiento de la lona y no en los hilos propiamente que son los que llevan la carga. Los extensómetros son tan sensibles que al cambiar un poco la longitud de los cables que sostienen el puntal por debajo se genera una nueva distribución de deformaciones.

Comparar resultados analíticos con experimentales es indispensable para entender mejor el comportamiento del fenómeno estudiado. Los resultados nunca serán iguales debido a la naturaleza de los planteamientos. Por ejemplo, es una gran simplificación aumentar las fuerzas estáticas de viento para tratar de absorber los efectos dinámicos que éste tiene. Por otra parte se caería en un error si se piensa que con datos teóricos como los acumulados de otras investigaciones son suficientes para reproducir numéricamente un estudio, ya que no conocemos exactamente las circunstancias en las que fueron llevados a cabo estos experimentos con los que se obtuvieron dichos datos. Para nuestro caso no hay que perder de vista que la distribución de presiones de viento fue obtenida en un túnel con sus características especiales. Y más importante aún, no hay que perder de vista que fue dentro de un túnel de viento y que, flujo de viento con estas características no puede ser reproducido para una estructura real en circunstancias reales. Lo más que podríamos hacer

en este caso es medir qué tan aproximado estamos de una circunstancia dada, siempre y cuando contemos con los datos para hacer la comparativa.

La elaboración de un modelo físico a escala reducida debe hacerse con materiales elaborados para este fin. Utilizar materiales que no fueron hechos con este objetivo nos lleva a hacer ajustes que producen errores que para solucionarlos hay que volver a hacer otros ajustes y esto nos mete dentro de un círculo vicioso. Es importante tener bien clara la forma de cómo se va a elaborar el modelo para así conseguir los materiales necesarios, hacer las cosas con anticipación y disminuir los ajustes al mínimo.

Es muy laborioso hacer un buen modelo numérico de una lonaria, ya que tiene muchas implicaciones que salen de nuestro alcance: la naturaleza dinámica e impredecible del viento y las características particulares de materiales compuestos como la lona estructural. Lograr resolver estos obstáculos requeriría de un presupuesto adecuado y trabajo de especialistas, todo esto justificado por la importancia de la estructura que se desee construir. Una vez tomados en cuenta las variables más importantes de los experimentos podemos estar seguros que habrá similitud en los resultados.

Existen varios puntos que se pueden mejorar para la elaboración de un túnel de viento “casero”:

- Utilizar marcos rígidos con la forma del túnel (en este caso circulares por su cara interna y cuadrados por fuera, por ejemplo) de modo que se mantenga la forma circular a lo largo de todo el túnel, para garantizar que en la unión con la transición quede casi idéntica en ambas partes, lo que facilitará su ensamblaje.
- Utilizar una transición de un material más rígido que la malla metálica, ya que al momento de ensamblar esta con el tubo, esta se deforma y se necesita usar un elemento más rígido (como la misma lona estructural). Una vez que se garantice que las dos secciones son circulares (en la medida de lo posible) se puede recurrir a un elemento menos rígido (como la membrana que podríamos obtener con un globo). Esto se traduciría en una menor transferencia de vibraciones.

- Experimentar con diferentes elementos que den estabilidad al flujo y que disminuyan lo menos posible la velocidad del flujo. Utilizar una “pared” de popotes comerciales disminuye hasta en dos terceras partes la velocidad del viento.
- Una de las formas más eficientes de mantener un flujo mayor en el túnel (además de con un ventilador de mayores dimensiones o más ventiladores) sería cerrándolo en forma de toroide. Para construir esto de forma práctica tendría que ser hecho de secciones rígidas para evitar el problema del ensamble en las uniones y de forma que se pueda desmontar.

# Bibliografía

Ansys Inc. Software, ver.12, 2010.

Bathe K.J. (1982). Finite element procedures in engineering analysis. Prentice-Hall. EnglewoodCliffs, NJ.

Carreira Valiáño, Leonardo. Sistema para la medición del estado de tensiones en membranas textiles. Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.

Edwin F. Methods of Measuring Electrical Resistance. Northrup. 1912.

Ford, Advanced Mechanics of Materials, Longmans, London, 1963.

Gere James M. y Weaver William, Análisis de estructuras reticulares, Continental, 1965.

Harold C. Martin – Graham F Carey. Introduction to Finite Element Analisys.Theory and Application.USA, McGraw Hill, 1973.

Hill, R. The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford, Clarendon Press, 1950.

Horta Rangel J.; et.all.(2008). “Analysis of a catenoide fabric shell by means of coupled mechanical-optimization model”. Senttothe ASCE Journal.

Ishii Kazuo. “Stress concentration for fabric membrane structures”. Shell Membranes and space frames. Proceedings IASS symposium, Osaka, 1986, vol. 2. Elsevier Science Publisher, Amsterdam.

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.

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. ElsevierScience Publisher, Amsterdam

Jesús Fernando Valdez Vázquez (2008). Análisis dinámico por viento de una estructura minimalista. Tesis de Maestría en ciencias en estructuras. DEPFI, Universidad Autónoma de Querétaro. Mex.

Kolousek V.; Pirner M.; Fisher O.; Naprstek J. Wind effects on Civil engineering structures. Czechoslovak Academy of sciences. Elsevier, 1984.

Langhaar H. Dimensional Analysis and Theory of Models. John Wiley & Sons. London, 1962

Manual de diseño de obras civiles. Comisión Federal de Electricidad. Estructuras. C. 14  
Diseño por viento. Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Manual of Steel Construction.AISC, (2005). Chicago, Ill, USA

Marijke Mollaert, et al. Designing Tensile Architecture. TensiNet Symposium. Vrije Universiteit Brussel. Brussel, Bel.2003.

Marikje Mollaert et al. The Design of membrane and lightweight structures. Proceedings of the symposium at the Vrije Universiteit Brussel. September 15, 2000. Bruselas.

MSc. Carlos Henrique Hernández. Arq. Nelson Rodríguez. Herramienta EASY para el diseño de estructuras textiles. Instituto del Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC)Facultad de Arquitectura y Urbanismo.Universidad Central de Venezuela2009.

Normas Técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el Distrito federal. (NTCRCDF), 2004.

Pascual Lucas. Superficies Minimales. “La Historia de las matemáticas y su aplicación a la docencia de la enseñanza secundaria”. Conferencia impartida el 18 de febrero de 1999

P. D. Gosling and B. N. Bridgens. Material Testing & Computational Mechanics –A New Philosophy For Architectural Fabrics. International Journal of Space Structures Vol. 23 No. 4 2008.

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. DEPFI, Universidad Autónoma de Querétaro. Mex.

Shaeffer R.E. Tensioned Fabric Structures. Task Committee on Tensioned Fabric Structures. American Society of Civil Engineering, E.U.A.,1996.

Sabnis, Harris, White and Mirza. Structural Modeling and Experimental Techniques. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. N. M. Newmark and W. J. Hall, Editors. 1983.

Space Structures 4. Edited by G. A. R. Parke and C. M. Howard, Vol. 1, 1993

Strain Gage Users' Manual, p. 122. Society for Experimental Mechanics. (1992).

Uehara H. (2007). “Propuesta de una estructura osculante con membrana catenoide”. Congreso Internacional de estructuras espaciales. Venecia, Italia.

Wind load of Structures (2001) John D. Holmes. USA.

Yuki Nagai et al. Basic Study on Multi-Bay Horn-Shaped Membrane Roof Evaluation of Wind Load and Influence of Supporting System on Structural Behavior under Winds. International Journal of Space Structures Vol. 25 No. 1 2010 35.

### **Referencias de imágenes en internet**

- (1) <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4113.html>
- (2) <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4234.html>
- (3) <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4003.html>
- (4) <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4142.html>
- (5) <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4154.html>
- (6) <http://www.tensinet.com/database/viewProject/4013.html>
- (7) Kugel, F., Wie von Geisterhand. Deutsche Bauzeitung.
- (8) Estadio olímpico de Munich. Frei Otto

# Anexo 1. Programa Lonaria

```

*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

/COM,TENSIONES SUGERIDAS DE
PRESFUERZO EN MEMBRANAS: 1-4 kN/M
(1-4kG/CM) (AISC)
/COM,UTILIZAREMOS UNA TENSION REAL
DE PRESFUERZO DE 200 T/M2

multipro,'start',1
*CSET,1,3,ESC,'ESCALA',20
MULTIPRO,'END'

/COM,SI SE APLICA AL MODELO ESC=1
/COM,SI SE APLICA A LA ESTRUCTURA
REAL ESC=20

/com,EN CASO DE QUE SE DESEE
CONSIDERAR ADICIONALMENTE EL PESO
WT SOBRE LA MEMBRANA
/COM,DE CARACTER GRAVITACIONAL
POR CONSIDERACIONES
REGLAMENTARIAS, ENTONCES APLICAR
/COM,PESPM=1.0(1+WT/TMEM). ESTA ES
UNA FORMA DE INVOLUCRAR EL PESO
ADICIONAL
/COM,AUMENTANDO ARTIFICIALMENTE
EL PESO ESPECIFICO DE LA MEMBRANA
/COM,POR EJEMPLO PARA WT=0.01,
TMEM=0.8E-03, OBTEMOS PESPM = 13.5

multipro,'start',7
*CSET,1,3,PESPM,'PESO VOLUM
MEMBRANA (T/M3)',1.0
*CSET,4,6,MODULX,'MODULO ELAST
MEMBR X (T/M2) =',31250
*CSET,7,9,MODULZ,'MODULO ELAST
MEMBR Z (T/M2)',31250
*CSET,10,12,TMEM,'ESPESOR MEMBRANA
(M)',0.8E-03
*CSET,13,15,MPOIM,'MODULO DE
POISSON',0.20
*CSET,16,18,PREX,'PRESFUERZO
(TON/M2)',200
*CSET,19,21,WT,'CARGA DE DISEÑO MEMB
(T/M2)',0.02175
MULTIPRO,'END'

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

/COM,DATOS DE LA SECCION
PERIMETRAL

multipro,'start',5
*CSET,1,3,PESPT,'PESO VOLUM SEC.PERIM
(T/M3)',7.8
*CSET,4,6,MODES,'MODULO ELAST SEC
(T/M2) =',2.1E+07
*CSET,7,9,PERS,'PERALTE SECCION
(M)',0.01*ESC
*CSET,10,12,MPOIS,'MODULO DE
POISSON',0.20
*CSET,13,15,ALTC,'ALTURA DE
COLUMNAS'(M),0.12*ESC
MULTIPRO,'END'

DENSIDS=PESPT/9.81

multipro,'start',6
*CSET,1,3,LADO,'LADO DEL CUADRADO
=',0.30*ESC
*CSET,4,6,ALTURA,'ALTURA DE LA
ESTRUCTURA =',0.06*ESC
*CSET,7,9,DIAMC,'DIÁMETRO DEL
CIRCULO =',0.02*ESC
*CSET,10,12,GAJOS,'NUMERO DE GAJOS
POR CADA 45 GRADOS =',2
*CSET,13,15,EXACT,'ITERACIONES
BISECCIÓN SUCESIVA',100
*CSET,16,18,NUMNODO,'NUMERO DE
NODOS PARA CADA LADO DE CADA
GAJO',8
MULTIPRO,'END'

```

```

/TITLE, SUPERFICIE DEL PSEUDO-
CATENOIDE

/COM,TRABAJAREMOS EN EL SISTEMA
COORDENADO GLOBAL CILÍNDRICO QUE
/COM, TIENE POR ALTURA A LA "Y"
CSYS,5

/COM, Y EN GRADOS (EN RADIANES NO)
*AFUN,DEG

/COM, SUM SERÁ EL CONTADOR PARA LOS
NODOS
SUM=1

/COM, Si SERÁN VALORES QUE SE
ACTIVARÁN PARA DISMINUIR EL VALOR
DE C
/COM, Y SE DESACTIVARÁN PARA
DEJARLO SEGUIR AUMENTANDO
/COM, HACIENDO QUE SUS VALORES SEAN
CÍCLICOS
S1=0
S2=0
S3=0
S4=0

/COM, TODOS LOS GAJOS FORMARÁN EL
MISMO ÁNGULO VISTOS EN PLANTA
ANGGAJ=45/GAJOS
RADIO=DIAMC/2

/COM, CALCULAMOS LA LONGITUD VISTA
EN PLANTA DEL CENTRO
/COM, AL PERIMETRO DE LA ESTRUCTURA

*DO,J,0,GAJOS*8-1,1

/COM, HACEMOS UNAS VARIABLES QUE SE
ACTIVAN CUANDO I*ANGGAJ TOMA
VALORES
/COM, QUE LE HACEN DISMINUIR AL
VALOR B

*IF,I*ANGGAJ,GT,45,AND,I*ANGGA
J,LE,90,THEN
    S1=S1+ANGGAJ*2
*ENDIF

*IF,I*ANGGAJ,GT,135,AND,I*ANGG
AJ,LE,180,THEN
    S2=S2+ANGGAJ*2
*ENDIF

```

```

*IF,I*ANGGAJ,GT,225,AND,I*ANGG
AJ,LE,270,THEN
    S3=S3+ANGGAJ*2
*ENDIF

*IF,I*ANGGAJ,GT,315,THEN
    S4=S4+ANGGAJ*2
*ENDIF

/COM, CON UN LADO Y DOS
ANGULOS CONOCEMOS EL OTRO
"CATETO": B
B=(LADO/2)*TAN(I*ANGGAJ-S1-S2-
S3-S4)
/COM, CON TEOREMA DE
PIRÁGORAS LA LONGITUD DEL LADO DEL
GAJO
C=SQRT((LADO/2)**2+B**2)

/COM, "RADIO" ES EL COEFICIENTE
"A" DE LA ECUACION
/COM, ACOSH(Y) DE MODO QUE
"A"(RADIO) HACE QUE CUANDO
/COM, X=0 ---> Y=RADIO

/COM, USAMOS EL MÉTODO DE
BISECCIÓN SUCESIVA
/COM, PARA DETERMINAR EL
VALOR DE "Y" TAL QUE
/COM, ACOSH(Y) = C

/COM, EMPEZAMOS DANDO
MÁRGENES DE EVALUACIÓN
/COM, XINI EN 0 PORQUE A PARTIR
DE PITÁGORAS NUNCA TENDREMOS
NUMEROS NEGATIVOS
/COM, XFIN EN 6 DESPUÉS DE VER
LOS VALORES OBTENIDOS PARA COSH(6)
ES BASTANTE GRANDE

XINI=0
XFIN=6

*DO,J,0,EXACT,1

XMED=(XINI+XFIN)/2

XM=RADIO*COSH(XMED)

*IF,C,GT,XM,THEN
    XINI=XMED
*ELSE
    XFIN=XMED
*ENDIF

```

```

*ENDDO

/COM,AHORA CONTAMOS CON EL VALOR
"Y" QUE AL EVALUARLO EN COSH(Y) ES
IGUAL
/COM,A LA DISTANCIA DEL CENTRO DE
LA ESTRUCTURA VISTA EN PLANTA
HASTA EL
/COM,TUBO PERIMETRAL; "XMED" ES
ESTE VALOR

/COM,CALCULAMOS UN VALOR "M" (LO
LLAMAREMOS "AJUSTA") QUE HAGA
M*XMED=ALTURA

AJUSTA=ALTURA/XMED

/COM,DISNODO = DISTANCIA VISTA EN
PLANTA ENTRE NODOS PARA UNA ILERA
EN ESPECÍFICO

DISNODO=(C-RADIO)/NUMNODO

*DO,KK,0,NUMNODO,1

XINII=0
XFINN=6

*DO,JJ,0,EXACT,1

XMEDD=(XINII+XFINN)/2

XMM=RADIO*COSH(XMEDD)

*IF,RADIO+DISNODO*KK,GT,XMM,
THEN
    XINII=XMEDD
    *ELSE
        XFINN=XMEDD
        *ENDIF
    *ENDDO

    K,SUM,RADIO+DISNODO*KK,ANGG
    AJ*I,-1*AJUSTA*XMEDD
    SUM=SUM+1
    *ENDDO
*ENDDO

*DO,I,1,GAJOS*8,1

KSEL,S,KP,,((NUMNODO+1)*I)-
NUMNODO,(NUMNODO+1)*I
SPLINE,ALL
KSEL,ALL
*ENDDO

*GET,TOTL,LINE,,NUM,MAX
TOTL=NUMNODO*GAJOS*8

*DO,I,1,TOTL-NUMNODO,1
ASKIN,I,I+NUMNODO
*ENDDO

*DO,I,1,NUMNODO,1
ASKIN,TOTL-NUMNODO+I,I
*ENDDO

CSYS,0

NUMMRG,KP

*END

*CREATE,MALLADOM

/COM,MALLADO SECCION PERIMETRAL
(TYPE 2 REAL 2 MAT 2)
/COM,MALLADO MEMBRANA (TYPE 1
REAL 1 MAT 1)

/com,elemento finito para la membrana

!*
ET,1,SHELL41
!*
KEYOPT,1,1,2
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,1
KEYOPT,1,6,0
!*
/COM,SE ADICIONA UN PEQUEÑO soporte
NORMAL PARA ESTABILIZACION
EFSM=-44736839.47*ESC+894736839.5

real 1 para la membrana
R,1,TMEM,,,,,EFSM

/com,material 1 para la membrana
MP,EX,1,modulx
MP,PRXY,1,mpoim
MP,DENS,1,DENSIDM

ASEL,S,AREA,,ALL
SMRT,6

```

```

MSHAPE,1,2D
MSHKEY,0

AMESH,ALL

ASEL,ALL

EPLOT

/COM, DATOS DEL ELEMENTO A USAR
PARA LAS SECCIONES SOPORTANTES
ET,2,BEAM4

/COM,DATOS GEOMETRICOS DE LA
SECCION PERIMETRAL

AS=PERS**2
IYS=PERS**4/12
IXS=2*IYS

R,2,AS,IYS,IYS,PERS,PERS,0
RMORE,,IXS,1.2,1.2

MP,EX,2,MODES
MP,PRXY,2,MPOIS
MP,DENS,2,DENSIDS

LSEL,S,EXT
LSEL,R,LOC,Y,-ALTURA
LPLOT

TYPE,2
REAL,2
MAT,2

LMESH,ALL
LSEL,ALL

*END

*CREATE,MALLADOE

*GET,NUMK,KP,0,NUM,MAX
*GET,NUML,LINE,0,NUM,MAX

PUNTO1=KP(-LADO/2,-ALTURA,LADO/2)
PUNTO2=KP(LADO/2,-ALTURA,LADO/2)
PUNTO3=KP(LADO/2,-ALTURA,-LADO/2)
PUNTO4=KP(-LADO/2,-ALTURA,-LADO/2)

K,NUMK+1,-LADO/2,-ALTURA-
ALTC,LADO/2
K,NUMK+2,LADO/2,-ALTURA-ALTC,LADO/2
K,NUMK+3,LADO/2,-ALTURA-ALTC,-
LADO/2

K,NUMK+4,-LADO/2,-ALTURA-ALTC,-
LADO/2

L,NUMK+1,PUNTO1
L,NUMK+2,PUNTO2
L,NUMK+3,PUNTO3
L,NUMK+4,PUNTO4

LSEL,S,LOC,Y,-ALTURA-ALTC*0.1,-
ALTURA-ALTC
LPLOT
LDIV,ALL,,6
LMESH,ALL
/TITLE,ESTRUCTURACION CON
MEMBRANA
LSEL,ALL
NUMMRG,KP

NSEL,ALL
ESEL,ALL
KSEL,ALL
LSEL,ALL
ASEL,ALL
EPLOT

SAVE,PARTE1

*END

*CREATE,ANALISIS
FINISH
/SOLU
ANTYPE,0

NSEL,S,LOC,Y,-ALTURA-ALTC
D,ALL,ALL,0
NSEL,ALL

NSEL,S,LOC,Y,0
*GET,NUMNOD,NODE,0,COUNT
LDIAMC=3.1416*DIAMC
LTRIB=LDIAMC/NUMNOD
TENOD=PREX*LTRIB*TMEM

F,ALL,FY,TENOD
NSEL,ALL

/COM,ACTIVAMOS PESO PROPIO
ACEL,,9.81

/COM,<<<<<-----INTRODUCCIÓN DE
CARGAS NORMALES----->>>>>>

/COM,NNTS=NUMERO DE NODOS EN TODO
EL SISTEMA
*GET,NNTS,NODE,0,NUM,MAX

```

/COM,ESTE \*DO DEBERÍA TRABAJAR  
 HASTA "NNTS" Y NO HASTA  
 "(NUMNODO+1)\*GAJOS\*8"  
 /COM,PERO CON ESE NÚMERO TAN  
 GRANDE (SUPONGO), AL TERMINAR DE  
 APLICAR LAS  
 /COM,CARGAS ME SACA DEL PROGRAMA,  
 Y CON UN NÚMERO MENOR, COMO EL  
 NÚMERO TOTAL  
 /COM,DE KEY POINTS EN LA MEMBRANA,  
 SI DA LA SOLUCIÓN

/COM,(NUMNODO+1)\*GAJOS\*8=NUMERO  
 DE KEY POINTS EN LA MEMBRANA

\*DO,I,1,NNTS,1

/COM,DISTANCY=DISTANCIA EN Y.  
 SI EL NODO TIENE UNA ALTURA  
 /COM,IGUAL O MENOR QUE LA  
 ALTURA DE LA MEMBRANA, ENTONCES  
 /COM,NO LE VAMOS A ASIGNAR  
 CARGAS

\*GET,DISTANCY,NODE,I,LOC,Y

/COM,SI ES MAYOR, (ENTRA EN EL  
 IF) SIGNIFICA QUE ES UN  
 /COM,NODO DE MEMBRANA Y SÍ  
 LE VAMOS A CALCULAR CARGA

\*IF,DISTANCY,NE,0,THEN  
 \*IF,DISTANCY,GT,-ALTURA,THEN

/COM,SELECCIONAMOS EL  
 NODO EN CUESTION "I"

NSEL,S,NODE,,I

/COM,SELECCIONAMOS UN  
 NUEVO CONJUNTO DE ELEMENTOS QUE  
 TIENEN

/COM,EN COMUN AL NODO  
 EN CUESTION "I"

ESLN,S,0,ACTIVE

/COM,ATRIB= AREA  
 TRIBUTAREA. LA SUMA DEL AREA DE  
 TODOS LOS

/COM,ELEMENTOS QUE  
 RODEAN AL NODO EN CUESTION "I"

ATRIB=0

/COM,PEDIMOS LA  
 CANTIDAD DE ELEMENTOS QUE TIENEN  
 EN COMUN A "I"

/COM,PEDIMOS EL  
 NÚMERO DEL ELEMENTO MÁS BAJO, Y  
 OBTENEMOS SU AREA

/COM,LA METEMOS EN UN  
 ACUMULADOR Y SACAMOS A ESTE  
 ELEMENTO DEL

/COM,CONJUNTO PARA  
 PEDIR EL AREA DEL SIGUIENTE CON EL  
 NÚMERO MÁS BAJO

/COM,Y ASÍ HASTA EL  
 NÚMERO TOTAL DE ELEMENTOS EN EL  
 SISTEMA

\*GET,NUMELEMS,ELEM,,COUNT  
 \*DO,J,1,NUMELEMS,1

\*GET,ELMENOR,ELEM,,NUM,MIN

\*GET,ATI,ELEM,ELMENOR,AREA  
 ATRIB=ATRIB+ATI

ESEL,U,ELEM,,ELMENOR  
 \*ENDDO

ESEL,ALL

/COM,CAMBIAMOS AL  
 SISTEMA COORDENADO CILÍNDRICO  
 PARA MAYOR

/COM,FACILIDAD EN EL  
 CÁLCULO

CSYS,5

/COM,PEDIMOS LAS  
 COORDENADAS DEL NODO "I" EN EL  
 SISTEMA COORDENADO

/COM,CILÍNDRICO 5

NSEL,S,NODE,,I

\*GET,RADIOU,NODE,I,LOC,X

\*GET,ALTURAU,NODE,I,LOC,Z

\*GET,ANGULOU,NODE,I,LOC,Y

/COM,OBTENEMOS UN  
 VALOR (RESTADOR) CON EL QUE  
 REDUCIMOS EL ÁNGULO

/COM,QUE TIENE "I" A UN  
 RANGO ENTRE 0° Y 45°

```

*IF,ANGULOU,GE,0,AND,ANGULOU,
LE,45,THEN
    RESTADOR=0
*ELSEIF,ANGULOU,GT,45,AND,ANG
ULOU,LE,90,THEN
    RESTADOR=45
*ELSEIF,ANGULOU,GT,90,AND,ANG
ULOU,LE,135,THEN
    RESTADOR=90
*ELSEIF,ANGULOU,GT,135,AND,AN
GULOU,LE,180,THEN
    RESTADOR=135
*ELSEIF,ANGULOU,GT,180,AND,AN
GULOU,LE,225,THEN
    RESTADOR=180
*ELSEIF,ANGULOU,GT,225,AND,AN
GULOU,LE,270,THEN
    RESTADOR=225
*ELSEIF,ANGULOU,GT,270,AND,AN
GULOU,LE,315,THEN
    RESTADOR=270
*ELSEIF,ANGULOU,GT,315,AND,AN
GULOU,LT,360,THEN
    RESTADOR=315
*ENDIF

/COM,CALCULAMOS EL
VALOR PARA EL CUAL DEBE SER
EVALUADO "COSH(X)"

B=(LADO/2)*TAN(ANGULOU-
RESTADOR)
    C=SQRT((LADO/2)**2+B**2)
    XINI=0
    XFIN=6
    *DO,ZZ,0,EXACT,1

XMED=(XINI+XFIN)/2

XM=RADIO*COSH(XMED)
    *IF,C,GT,XM,THEN
        XINI=XMED
    *ELSE
        XFIN=XMED
    *ENDIF
*ENDDO

/COM,AJUSTA, OTRA VEZ
ES UNA CONSTANTE QUE VA A AJUSTAR
LA
/COM,ECUACIÓN A QUE
COINCIDA CON NUESTRAS CONDICIONES
DE FRONTERA

AJUSTA=ALTURA/XMED

```

```

/COM,BUSCAMOS LA
DERIVADA INVERSA NEGATIVA, QUE ES
LA DIRECCIÓN
/COM,DE LA NORMAL EN
EL PUNTO DONDE ESTÁ "I"

/COM,PRIMERO QUE NADA,
SI SE TRATA DE UN NODO DE LA
"CORONA", EN SU
/COM,DERIVADA INVERSA
HAY UNA DIVISIÓN ENTRE CERO. PERO
YA CONOCEMOS
/COM,SU DIRECCIÓN:
COMPLETAMENTE HORIZONTAL
/COM,COMPHORZ Y COMPY
SON LA COMPONENTE HORIZONTAL Y
VERTICAL
/COM,RESPECTIVAMENTE

*IF,RADIOU,EQ,RADIO,THEN
    COMPY=0
    COMPHORZ=1

/COM,PENDIENT= EL
VALOR NEGATIVO A LA PENDIENTE
INVERSA EN EL PUNTO
/COM,DADO (EL RADIOU ES
EL VALOR DE X). EVALUAMOS CON
SINH(X), QUE ES
/COM,LA DERIVADA DEL
COSH(X)

*ELSE
    PENDIENT=-
    1/(SINH(RADIOU)*AJUSTA)

    THETA=ATAN(PENDIENT)

    COMPHORZ=COS(THETA)
    COMPY=SIN(THETA)

*ENDIF

/COM,DESGLOSAMOS LA
COMPONENTE HORIZONTAL EN
COMPONENTES EN "X" Y "Z"
/COM,PARA ASI
INTRODUCIRLAS EN LOS NODOS

    COMPX=COMPHORZ*COS(ANGULO
U-RESTADOR)

    COMPZ=COMPHORZ*SIN(ANGULO
U-RESTADOR)

```

```

/COM,SOLICITAMOS LAS
COORDENADAS "X" Y "Z" DEL NODO "I" EN
EL SISTEMA
/COM,CARTESIANO Y
REEMPLAZAMOS LAS COORDENADAS
NEGATIVAS DE Z POR SU
/COM,POSITIVA

CSYS,0

*GET,COORDX,NODE,I,LOC,X

*GET,COORDZ,NODE,I,LOC,Z
COORDZ=ABS(COORDZ)

/COM,CALCULAMOS EL CP
A PARTIR DE UNA COMBINACIÓN DE
ECUACIONES Y
/CON,CONSTATES QUE
APROXIMAN LOS VALORES A SIMPLE
VISTA (ESTO AUN
/COM,SE PUEDE DEPURAR,
PERO LA DIFERENCIA NO DEBE SER
MUCHA)

CTE1=6/3
XPRIMA=COORDX*CTE1
ZPRIMA=-
ABS(COORDZ*CTE1)
CTE2=(-1/3)*ZPRIMA+1
CP=0.3*(TANH(XPRIMA))-0.7+0.5*CTE2*COSH(XPRIMA)**(-1)

/COM,ASIGNAMOS UN
VALOR DE DIRECCIÓN PARA QUE LA
FUERZA EN CUALQUIER
/COM,NODO SE DIRIJA
HACIA AFUERA DE LA ESTRUCTURA

*IF,COORDX,GT,0,THEN
  DIRECX=1
*ELSE
  DIRECX=-1
*ENDIF

/COM,OTRA VEZ PEDIMOS
LA COORDENADA EN Z PORQUE YA
LA MODIFICAMOS A
/COM,SU VALOR
ABSOLUTO

*GET,COORDZ,NODE,I,LOC,Z
*IF,COORDZ,GT,0,THEN
  DIRECZ=1
*ELSE
  DIRECZ=-1
*ENDIF

F,ALL,FX,ABS(FNODE*COMPX)*DIR
ECX
F,ALL,FY,ABS(FNODE*COMPY)
F,ALL,FZ,ABS(FNODE*COMPZ)*DIR
ECZ
*ELSE
/COM,NADA, PARA NO
MODIFICAR LAS CARGAS INICIALES DE
PRESFUERZO
/COM,NO ESTOY SEGURO SI
AL VOLVER A ASIGNARLE CARGAS A UN
NODO QUE
/COM,YA LAS TENIA, SE
BORREN LAS ANTERIORES
*ENDIF
*ELSE
/COM,NADA, PORQUE NO
ES NODO DE MEMBRANA
*ENDIF
*ENDDO

/COM,<<<<<-----TERMINA
INTRODUCCIÓN DE CARGAS NORMALES---
--->>>>>

SOLVE
FINISH
/POST1

SET,LAST
/dscale,1,0.5
PLDISP,1

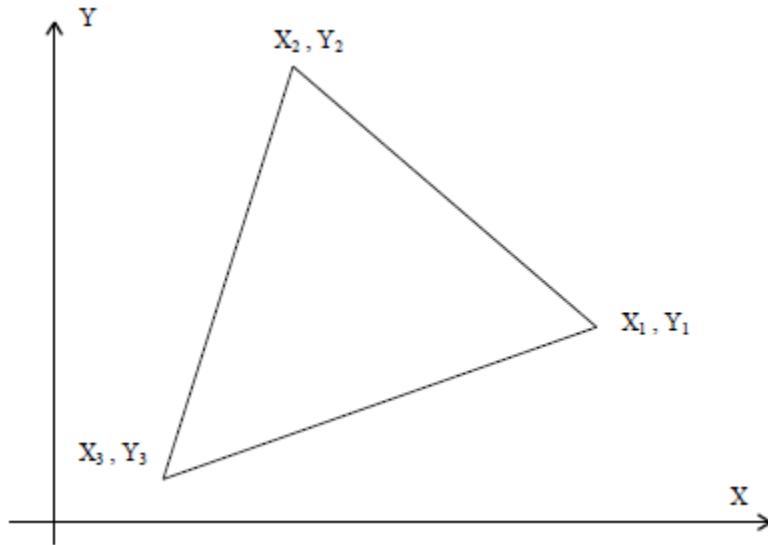
*END

*USE,INICIO
*USE,MALLADOM
*USE,MALLADOE
*USE,ANALISIS

```

## Anexo 2. Modelo discreto del elemento Finito

En primer lugar trataremos de obtener las ecuaciones que rigen el comportamiento de un elemento triangular como el de la figura siguiente.



Las funciones de interpolación de los desplazamientos dentro del elemento se consideran lineales. Es decir

$$u(x, y) = \alpha + \alpha_1 x + \alpha_2 y$$

$$v(x, y) = \beta + \beta_1 x + \beta_2 y$$

donde  $u$  y  $v$  son los desplazamientos horizontal y vertical respectivamente. La ecuación anterior puede ser escrita en forma matricial

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \beta \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{Bmatrix}$$

Particularizando las coordenadas y los desplazamientos para cada nodo obtenemos la expresión matricial

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \beta \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

Esta expresión nos permite obtener los parámetros de las funciones de interpolación en función de los desplazamientos nodales sin más que invertir una matriz. Reordenando los distintos términos podemos escribir

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [A]^{-1} & [0] \\ [0] & [A]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

donde

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}$$

Luego ya conocemos la matriz  $[N]$  que nos relaciona el campo de desplazamientos en el elemento con los desplazamientos en los nodos

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [A]^{-1} & [0] \\ [0] & [A]^{-1} \end{bmatrix}$$

Realizando la inversa de la matriz  $A$ , podemos reescribir la matriz  $N$  en función de las características geométricas del elemento

$$[N] = \frac{1}{|A|} \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix}$$

donde los valores de  $N_i$  vienen dados por

$$\begin{aligned}N_1 &= (x_2y_3 - x_3y_2) + x(y_2 - y_3) + y(x_3 - x_2) \\N_2 &= (x_3y_1 - x_1y_3) + x(y_3 - y_1) + y(x_1 - x_3) \\N_3 &= (x_1y_2 - x_2y_1) + x(y_1 - y_2) + y(x_2 - x_1)\end{aligned}$$

La matriz [D] que relaciona deformaciones y desplazamientos es

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Y podemos construir la matriz [B] que nos relaciona las deformaciones con los desplazamientos en los nodos.

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_x \\ \boldsymbol{\varepsilon}_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [D][N]\{U\} = [B]\{U\}$$

Sustituyendo los valores de las distintas matrices

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix}$$

dado que los valores de las funciones  $N_i$  son conocidos en función de las coordenadas nodales, es posible determinar la matriz [B] a partir de datos puramente geométricos

$$[B] = \frac{1}{2\Omega} \begin{bmatrix} y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 & y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \end{bmatrix}$$

siendo  $\Omega$  el área del triángulo.

La matriz de comportamiento  $[C]$  que relaciona deformaciones y tensiones, para el caso de tensión plana, viene dada por la relación

$$[C] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad y  $\mu$  el coeficiente de Poisson. Con las matrices definidas o calculadas hasta el momento ya es posible determinar las matrices de rigidez y el vector de cargas de cada uno de los dos elementos del modelo que hemos realizado

$$[K] = \int_v [B]^T [C] [B] dv$$

Finalmente llegamos a la ecuación que rige el comportamiento de todo el sistema

$$\left\{ \int_v [B]^T [D] [B] dv + k \int_A [N]^T [N] dA + [K_l] \right\} [U] = \int_A [N]^T \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} dA + \int_v [N]^T \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} dv + \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \quad (A2.2)$$

## Anexo 3. Cálculo de cargas

De la sección 4.3.1 evaluamos el presfuerzo en el modelo analítico. Para lograr un presfuerzo de  $200\text{T/m}^2$ :

Hacemos un nuevo subconjunto de nodos, para lo cual seleccionamos los del círculo en la parte superior de la membrana, los cuales tienen la particularidad de estar ubicados en coordenadas con  $Y=0$ .

NSEL,S,LOC,Y,0

Guardamos en la variable “NUMNOD” el número de nodos existentes en este nuevo subconjunto.

\*GET,NUMNOD,NODE,0,COUNT

Calculamos el perímetro del círculo que se forma con estos nodos (“DIAMC” es el diámetro del círculo):

LDIAMC=3.1416\*DIAMC

Ahora calculamos la longitud de perímetro que le corresponde a cada nodo.

LTRIB=LDIAMC/NUMNOD

Finalmente, la fuerza pretensora en cada nodo “TENOD” es igual al producto del presfuerzo requerido por el área transversal de la lona para cada nodo.

TENOD=PREX\*LTRIB\*TMEM

La fuerza pretensora es aplicada únicamente en dirección ascendente, sin componentes horizontales.

F,ALL,FY,TENOD

Se seleccionan todos los nodos del sistema para volver al estado inicial.

NSEL,ALL

Para el caso que nos ocupa:

$$TENOD = 200T/m^2 * 0.07854m * 0.0008m$$

TENOD = 0.01256 T (En cada nodo)

#### 4.3.2. Cargas por viento

Solicitamos el número de nodos en todo el sistema y lo guardamos en la variable “NNTS” (Número de Nodos en Todo el Sistema).

\*GET,NNTS,NODE,0,NUM,MAX

Hacemos el proceso iterativo desde el nodo 1 hasta el nodo con el número más grande pasando por cada uno.

\*DO,I,1,NNTS,1

Solicitamos la coordenada en Y de cada nodo “DISTANCY”. Si este nodo tiene una altura igual a cero (nodos de la corona) o está a la altura de los nodos de las trabes o por debajo, entonces no les asignamos cargas, pues estos nodos no están rodeados exclusivamente por nodos de membrana.

```
*GET,DISTANCY,NODE,I,LOC,Y  
*IF,DISTANCY,NE,0,THEN  
*IF,DISTANCY,GT,-ALTURA,THEN
```

Seleccionamos el nodo en cuestión "I"

NSEL,S,NODE, ,I

Seleccionamos un nuevo conjunto de elementos que tienen en común al nodo en cuestión "I".

ESLN,S,0,ACTIVE

Hacemos un sumador “ATTRIB” iniciado en cero que absorberá el valor de cada una de las áreas de los elementos membrana que rodean al nodo “I”.

ATRIB=0

Pedimos la cantidad de elementos que tienen en común al nodo “I”

\*GET,NUMELEMS,ELEM,,COUNT

Pedimos el número menor de los elementos existentes y pedimos su área, la metemos en el acumulador y sacamos este elemento del subconjunto para pedir el área del siguiente con el número más bajo y así hasta el número total de elementos en este subsistema.

```
*DO,J,1,NUMELEMS,1
  *GET,ELMENOR,ELEM, ,NUM,MIN
  *GET,ATI,ELEM,ELMENOR,AREA
  ATRIB=ATRIB+ATI
  ESEL,U,ELEM, ,ELMENOR
*ENDDO
```

Seleccionamos todos los elementos para volver al estado inicial

ESEL,ALL

Cambiamos al sistema coordenado cilíndrico para mayor facilidad de los cálculos

CSYS,5

Seleccionamos el nodo “I” y solicitamos sus coordenadas en el sistema coordenado actual.

```
NSEL,S,NODE, ,I
  *GET,RADIOU,NODE,I,LOC,X
  *GET,ALTURAU,NODE,I,LOC,Z
  *GET,ANGULOU,NODE,I,LOC,Y
```

Para mayor facilidad en los cálculos obtenemos un valor “RESTADOR” con el que reducimos el ángulo que forma “I” con respecto al eje X (positivo) para que este sea siempre un valor entre  $0^\circ$  y  $45^\circ$ .

Calculamos el valor para el cual debe ser evaluado  $\cosh(x)$  por medio de la bisección sucesiva:

```

B=(LADO/2)*TAN(ANGULOU-RESTADOR)
C=SQRT((LADO/2)**2+B**2)
XINI=0
XFIN=6
*DO,ZZ,0,EXACT,1
    XMED=(XINI+XFIN)/2
    XM=RADIO*COSH(XMED)
    *IF,C,GT,XM,THEN
        XINI=XMED
    *ELSE
        XFIN=XMED
    *ENDIF
*ENDDO

```

AJUSTA, otra vez es una constante que va a ajustar la ecuación a que coincida con nuestras condiciones de frontera

```
AJUSTA=ALTURA/XMED
```

Buscamos la derivada inversa negativa, que es la dirección de la normal en el punto donde está “I”. COMPHORZ y COMPY son la componente horizontal y vertical respectivamente.

“PENDIENT” es el valor negativo a la pendiente inversa en el punto dado (el “RADIOU” es el valor de X). Evaluamos con  $\sinh(x)$  que es la derivada del  $\cosh(x)$

```

PENDIENT=-1/(SINH(RADIOU)*AJUSTA)
THETA=ATAN(PENDIENT)
COMPHORZ=COS(THETA)
COMPY=SIN(THETA)

```

Desglosamos la componente horizontal en componentes “X” y “Z” para así introducirla en los nodos

```
COMPX=COMPHORZ*COS(ANGULOU-RESTADOR)
```

```
COMPZ=COMPHORZ*SIN(ANGULOU-RESTADOR)
```

Solicitamos las coordenadas “X” y “Z” del nodo “I” en el sistema cartesiano y reemplazamos las coordenadas negativas de Z por su positiva ya que de antemano conocemos que va a estar trabajando completamente en succión, por lo tanto todas las resultantes serán hacia arriba.

```
CSYS,0
*GET,COORDX,NODE,I,LOC,X
*GET,COORDZ,NODE,I,LOC,Z
COORDZ=ABS(COORDZ)
```

Calculamos el coeficiente de presión a partir de una combinación de ecuaciones y constantes que aproximan los valores a simple vista.

```
CTE1=6/3
XPRIMA=COORDX*CTE1
ZPRIMA=-ABS(COORDZ*CTE1)
CTE2=(-1/3)*ZPRIMA+1
CP=0.3*(TANH(XPRIMA))-0.7+0.5*CTE2*COSH(XPRIMA)**(-1)
```

Asignamos un valor de dirección para que la fuerza en cualquier nodo se dirija hacia afuera de la estructura.

```
*IF,COORDX,GT,0,THEN
DIRECX=1
*ELSE
DIRECX=-1
*ENDIF
```

Otra vez solicitamos la coordenada en Z porque ya la modificamos a su valor absoluto

```
*GET,COORDZ,NODE,I,LOC,Z
*IF,COORDZ,GT,0,THEN
DIRECZ=1
```

```
*ELSE
  DIRECZ=-1
*ENDIF
```

La fuerza en cada nodo estará dada por la tercera parte de todas las áreas que coinciden con el nodo “I”, multiplicada por la presión de viento de diseño por un coeficiente de presión.

```
FNODE = (1/3)*ATRIB*WT*CP
  F,ALL,FX,ABS(FNODE*COMPX)*DIRECX
  F,ALL,FY,ABS(FNODE*COMPY)
  F,ALL,FZ,ABS(FNODE*COMPZ)*DIRECZ
*ELSE
*ENDIF
*ELSE
*ENDIF
*ENDDO
```

# Anexo 4. Propiedades de los materiales

## Materiales componentes de la estructura

A continuación, se indican las propiedades de los distintos materiales con los cuales se va a modelar la estructura. De inicio son los materiales con los que se cuenta para elaborar el modelo físico y se utilizan las mismas propiedades geométricas y mecánicas para alimentar nuestro programa numérico.

### Estructura perimetral

Para el ejemplo aquí presente las características del marco perimetral no cambiarán.

Límite de fluencia = 2530 kg/cm<sup>2</sup>

Módulo de elasticidad = 21000000 T/m<sup>2</sup>

Peso específico = 7.8 T/m<sup>3</sup>

Coeficiente de dilatación térmica = 12 x 10<sup>-6</sup>

## Membrana

Existe una gran gama de lonas estructurales con características distintas, como el módulo de elasticidad, módulo de poisson, resistencia a la ruptura y al desgarre, pero específico y acabados, que sería imposible hacer un análisis con todos ellos. Por lo tanto este estudio se enfoca en los datos que ofrece la marca “Naizil” para su lona “Best Cover type 1”, ya que es la lona estructural que se ha podido conseguir la cual se usa actualmente en la construcción de lonarias en Querétaro y es la utilizada en el modelo físico.

Material base	Polyester
Tejido	1100 DTEX*
Peso total	750g/m2
Ancho estándar	250cm
Resistencia a la tensión (Warp) / (Weft)	1998 N / 2131 N
Resistencia al rayado (Warp) / (Weft)	1332 N / 1420 N

Resistencia al desgarro (Warp) / (Weft)

+444 N / +444 N

\*DTEX: unidad de densidad lineal de un filamento continuo o hilo.

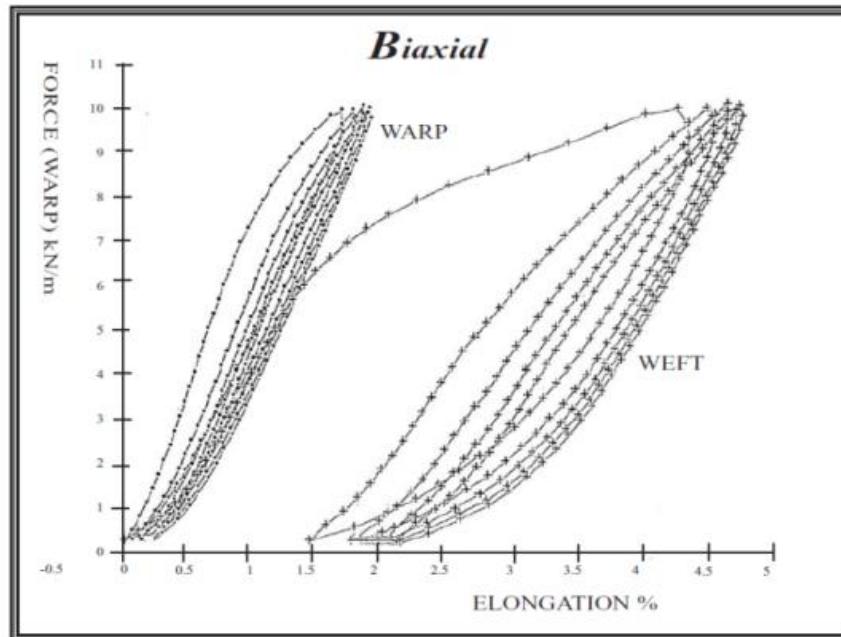


Figura A4.1 Gráfica fuerza vs deformación biaxial

### TENSILE STRENGTH

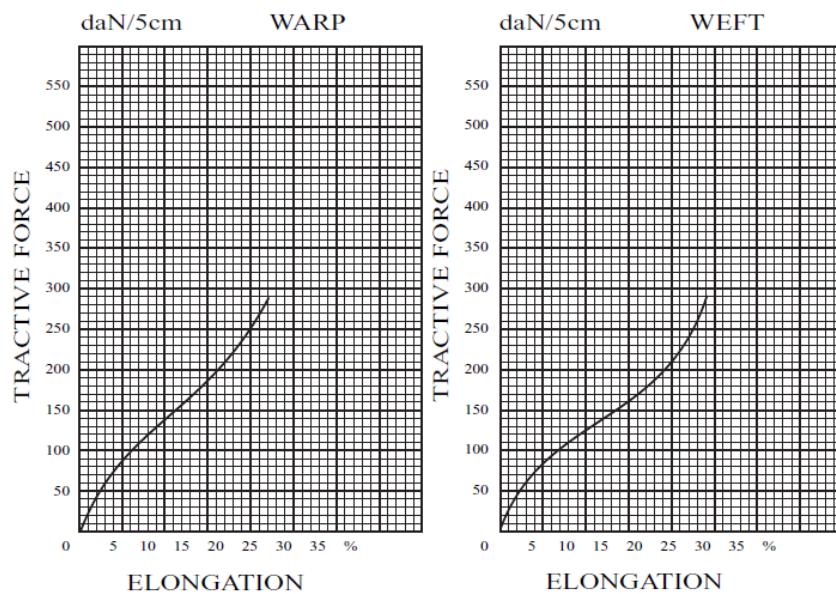


Figura A4.2 Gráficas de esfuerzo-deformación

## TEARING RESISTANCE

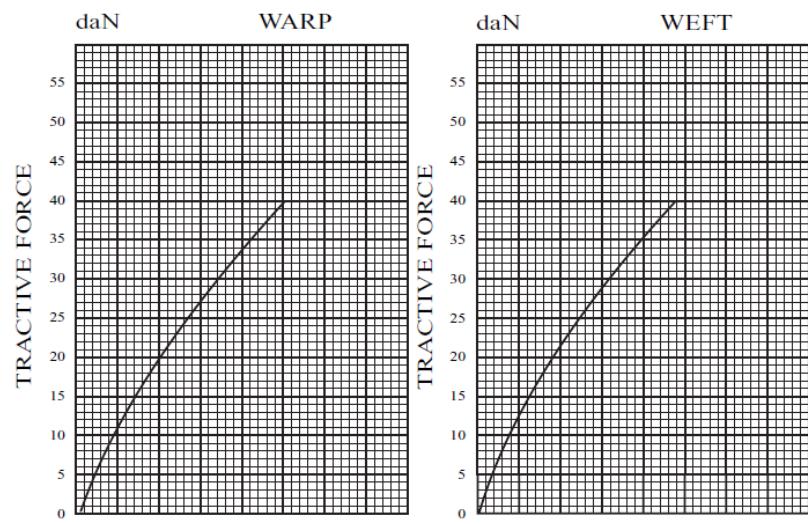


Figura A4.3 Gráficas de resistencia a la ruptura

# 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.

**Caballete 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 puentes, 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 Euclíadiano.

**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 término 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 Paraboloide 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 láminas ETFE son casi Isotrópicas.

**Link / conexión** Término general que se utiliza en Modelización Computacional para hacer referencia a cualquier elemento axial que representa conexiones, puentes, 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 Anticlásicas 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 los 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.

**Tensegridad** 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)