

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA - FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO		
DNC GE	Cátedra: ESTRUCTURAS - NIVEL 3	
	Taller: VERTICAL III - DELALOYE - NICO - CLIVIO	
	Guía de Estudio: Estructuras Neumáticas	
Curso 2020	Elaboró: JTP Ing. Angel Maydana - Arq. Hugo Larotonda	Fecha: mar 2020

ESTRUCTURAS NEUMÁTICAS



Figura Nº 1. El Pontiac Silverdome, Detroit, Michigan, EEUU (1975)- 80.325 espectadores. Una de las estructuras más grandes soportadas por aire.

Las estructuras neumáticas son aquellas conformadas por membranas, ya sean sustentadas o infladas por aire, con formas de curvaturas del tipo sinclásticas. Son estructuras livianas, flexibles y alcanzan su equilibrio mediante tracción pura. Se diferencian de las clasificadas como estructuras de tracción en la incorporación al sistema estructural de una acción sobre el sistema de cargas, provocada por la presión a la que se somete el aire confinado dentro de los elementos estructurales.

Desde el punto de vista estructural, Salvatori y Heller en "Estructuras para Arquitectos", definen a la membrana como una hoja de material tan delgada que a los fines prácticos no puede resistir compresión, flexión ni corte, sino sólo tracción. En su forma más simple las estructuras neumáticas son membranas que pueden inflarse mediante una pequeña sobrepresión interior que les confiere una forma cupular.

Esa reducida sobrepresión basta para sostener estas estructuras que delimitan un espacio habitable. Las pérdidas de presión por puertas exteriores o por algún otro punto de conflicto, son despreciables frente al gran volumen que por lo general suelen encerrar.



Figura Nº 2 - Vista interior del Estadio de Silverdome en Pontiac

Principales características: Se destacan por ser extramadamente livianas (del orden de 1 a 2 kg/m²) y su campo de aplicación puede llegar hasta los 100 m de luz sin apoyos intermedio. La referencia citada en la página anterior, el Pontiac Silverdome de Detroit, tiene dimensiones de 105 m por 68m..

Otra característica importante es que no requieren fundaciones importantes.

Hay que tener presente que por lo general son estructuras especialmente aptas para construcciones temporarias como por ejemplo: salas para exposiciones, locales deportivos, mega eventos, etc., en los que se requiere una cobertura por un breve y determinado período de tiempo, pero que a su vez estarán sometidas a todos los tipos de cargas posibles. Casualmente, los mayores inconvenientes que presentan estas estructuras derivan de su liviandad: son estructuras inestables a la acción del viento y de la nieve.

Clasificación

Si a una membrana flexible, capaz de resistir solo tracciones, se la tesa mediante presiones diferenciales de un gas (generalmente aire), surge una forma neumática. La membrana se deforma en el sentido del medio menos denso (el que ofrece menor resistencia) hasta que su superficie se estabiliza tanto en su posición como en su forma (en definitiva llega a un estado de equilibrio entre las fuerzas exteriores -presiones diferenciales- y las interiores de la membrana). Estas membranas tensadas neumáticamente pueden resistir fuerzas exteriores.

Estructuras cerradas o abiertas: A su vez, las primeras se dividen en simples o dobles de acuerdo a la cantidad de membranas existentes entre el espacio utilizable y el exterior.

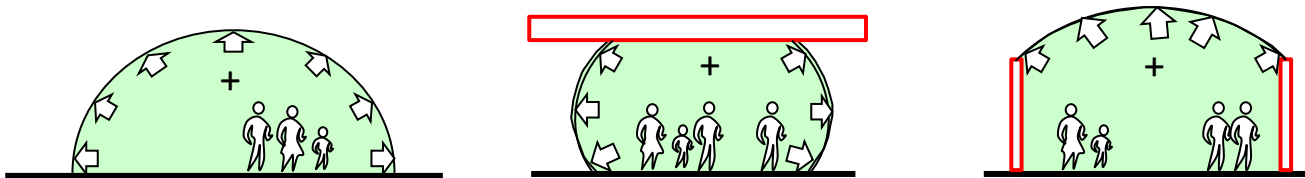


Figura Nº 3 a, b y c. Estructuras neumáticas cerradas simples, sustentadas por aire

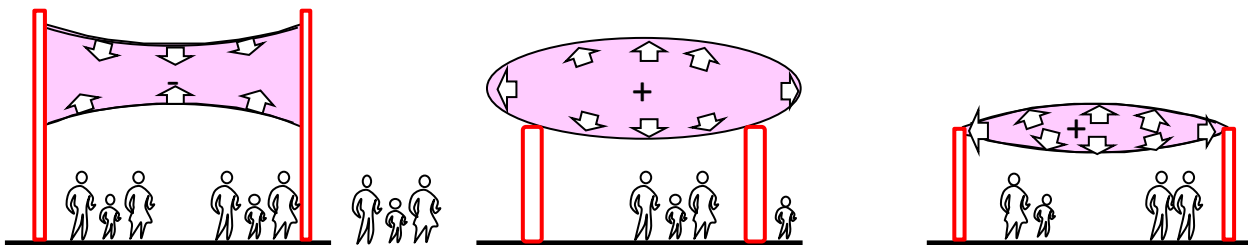


Figura Nº 4 a, b y c. Estructuras neumáticas cerradas dobles, infladas por aire

En los ejemplos de la figura 3, el medio sustentable puede ser aire elevado a presiones fisiológicamente inocuas. En los ejemplos de la figura 4, por tratarse de membranas dobles que encierran un volumen aislado del espacio habitable, puede utilizarse aire a elevada compresión o un gas distinto.

En la mayoría de los casos es necesario lograr que el área presurizada resulte lo más hermética posible, con lo que se originan las denominadas **estructuras cerradas**, que son las que definen propiamente este sistema estructural.

Cabe el caso de que la membrana forme parte de la estructura para aprovechar la energía del aire aplicado a presión, entonces resultan **estructuras abiertas** como los ejemplos de la figura 5.

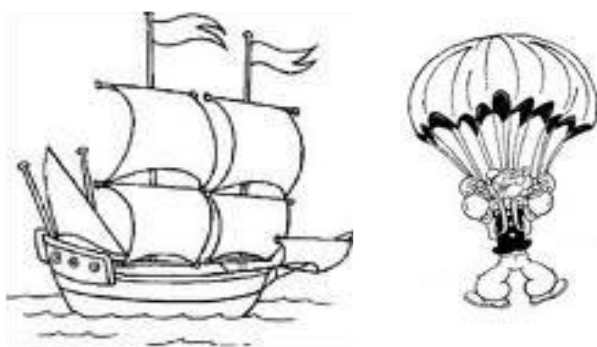


Figura Nº 5 a, y b. Estructuras neumáticas abiertas.

Principios básicos de funcionamiento

Este tipo de estructuras, las neumáticas, trabajan por diferencia de presión con la membrana siempre traccionada. Para lograr esto, debemos tener una presión interna suficiente para que logre inflar la membrana y así impedir que se manifiesten fuerzas de compresión que la "arruguen" o formen pliegues, es decir que el pleno funcionamiento y la estabilidad completa se logra cuando todas las partes de la membrana están bajo tracción.

Otro punto importante es que estas tensiones de tracción deben ser resistidas por la membrana, por lo que deben llegar a valores menores que las tensiones admisibles del material.

La magnitud de la presión diferencial existente entre los medios interno y externo separado por la membrana, permite su clasificación en **sistemas de alta y baja presión**. En los sistemas de baja presión las membranas se encuentra tesada por una presión normal de 10 a 100 kg/m² (0,001 a 0,01 kg/cm²) y son utilizados para cubrir un espacio habitable por resultar dicha presión diferencial fisiológicamente inocua.

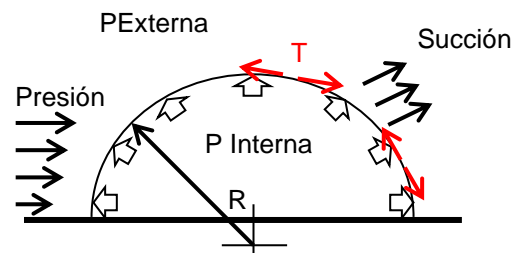


Figura Nº 6. Estado de solicitaciones

En los sistemas de alta presión, la presión diferencial asciende a valores comprendidos entre 2.000 y 70.000 kg/m² (0.2 a 7 kg/cm²). Estos sistemas están constituidos generalmente mediante elementos tubulares (de ahí su nombre de estructuras tubo) que solo o convenientemente combinados pueden cumplir las funciones portantes de una viga, arco, una grilla, etc.



Figura Nº 7 a, b y c. Estructuras neumáticas de alta presión.

Como las membranas solo pueden resistir esfuerzos de tracción, los esfuerzos de compresión que originarían las cargas externas deberán ser compensados mediante un tesado inicial sobre las mismas que se logra con una sobre presión. Esta posibilidad hace que resulten estructuras particularmente aptas para soportar cargas externas.



Figura Nº 8. Pabellón FUJI en la Expo Osaka 1970. Se utilizaron en su construcción 16 tubos cerrados de 3,60 metros de diámetro cada uno. La altura total de la estructura fue de unos 23 metros y su forma intentaba asemejar la cubierta de una carreta del viejo oeste norteamericano.

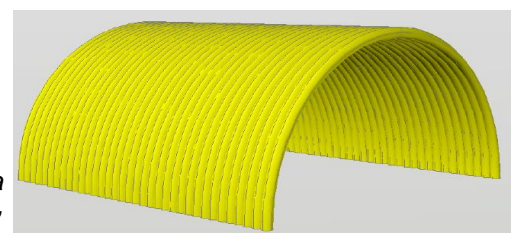


Figura Nº 9. Los tubos se utilizan en la actualidad para construir estructuras temporarias con diferentes fines, entre los que pueden citarse los militares.

MEMBRANAS

Las membranas que se utilizan en la actualidad se construyen a partir de fibras sintéticas tales como nylon, poliéster, vidrio y aramidas (aramida es una abreviación del término "*aromatic polyamide*" y designa una categoría de fibra sintética).

Su estructura varía sensiblemente según las fibras se tejan o se dispongan en direcciones más o menos paralelas. Asimismo las fibras, que son naturalmente bastante cortas, pueden torsionarse de modo de constituir elementos de mayor longitud y extensibilidad. La trama de tejido más común es de dos familias perpendiculares de fibras entretrejidas entre sí (pasaje alternado de una fibra sobre otra). Si las membranas están expuestas a la intemperie se las recubre con diferentes materiales para darle impermeabilidad, durabilidad y capacidad de auto limpieza.

Cuando las membranas forman parte activa de la estructura portante (estructuras tipo tienda y estructuras neumáticas), las tensiones a que están sometidas bajo cargas de servicio contemplan un coeficiente de seguridad del orden de 3 a 7 veces con respecto a las tensiones de rotura.

Fibras: en la actualidad las fibras más utilizadas son las de vidrio y poliéster. El poliéster tiene una baja resistencia a los rayos ultravioletas pero puede protegerse en forma muy efectiva contra ellos. Las fibras de vidrio por su parte, presentan un más alto módulo de elasticidad (son más rígidas) y una muy alta resistencia a la tracción. Su principal desventaja es su fragilidad para lo cual se las fabrica con diámetros muy pequeños y se las emplea en estructuras más permanentes (no resisten el armado y desarmado que implica un alto manipuleo de la membrana).

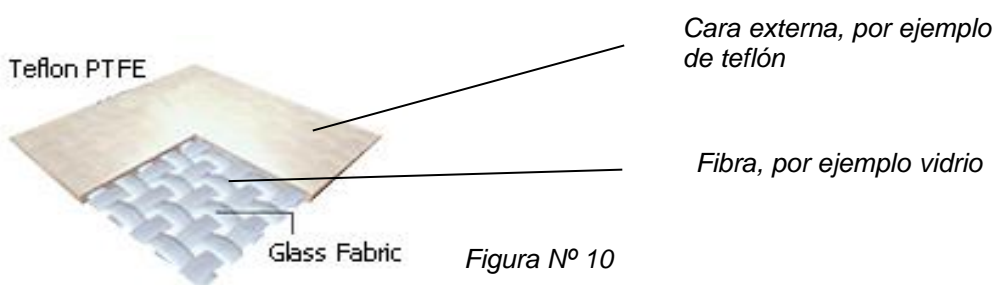
Las fibras de nylon y aramidas (Kevlar) son menos utilizadas. Las primeras presentan un bajo módulo de elasticidad y sensibilidad a la humedad, mientras que las segundas presentan excelentes características mecánicas, baja resistencia a los rayos ultravioletas y alto costo.

Recubrimientos: Los materiales más utilizados para "embeber" a las fibras son:

PVC (policloruro de vinilo): es dúctil y tenaz, presenta estabilidad dimensional y resistencia ambiental, es un material que permite que las membranas resulten fácilmente adaptables a las geometrías requeridas, es resistente a las radiaciones ultravioletas y puede producirse en cualquier color. Es utilizado para cubrir fibras de nylon y poliéster.

PTFE (Politetrafluoroetileno, Teflón): es químicamente inerte y otra característica es su impermeabilidad por lo que resulta resistente a la humedad y a los micro-organismos y tiene buena resistencia al envejecimiento. Es gran aislante eléctrico y sumamente flexible, no se altera por la acción de la luz y puede resistir temperaturas desde -260 °C a 260°C. Su cualidad más conocida es la antiadherencia. En la actualidad se lo produce solamente en color blanco. Se lo utiliza especialmente en la protección de fibras de vidrio. Es más caro que el poliéster recubierto con PVC. Tiene buena resistencia a las llamas y altos módulos de elasticidad y resistencia a la tracción.

Siliconas: Se utilizan para proteger fibras de vidrio. Tienen buena resistencia a los rayos ultravioletas, buena flexibilidad a largo plazo, resistencia a las llamas, altos módulos de elasticidad y resistencia a la tracción. También dejan pasar bastante luz a través de la membrana. Sus características son similares a las membranas en las que se utilizan teflón.



Terminaciones superficiales: La presencia de suciedad y productos de la polución ambiental, además de tener un efecto negativo sobre el aspecto estético de las estructuras, pueden afectar a los materiales componentes de las membranas. Por ese motivo suele aplicarse una capa de materiales que mejore la resistencia a los rayos ultravioletas y las características auto limpiantes de la membrana. Uno de los materiales utilizados es el Tedlar (PVF) (polivinilo fluoruro) que se aplica tanto sobre Teflón como sobre PVC, y que por sus características de resistencia a la climatología puede asegurar duraciones de más de 25 años de protección. En membranas de poliéster también suele utilizarse Uretano, que es un derivado del ácido carbámico. Posee buena adhesión, buena resistencia al escurrimiento, buena elasticidad.

Reglas de diseño y cálculo de la tensión de la membrana

El método más apropiado para determinar las formas de la estructura neumática es utilizar modelos hechos con películas de jabón, cuyos espesores varían entre 0,1 a 1 μm .

(1 micrómetro (μm) = 10^{-6} metros)

Todos los modelos producidos con pompas de jabón pueden considerarse desde el punto de vista de su superficie como formas ideales. Debido a la fluidez de la película, cada forma se genera produciendo iguales tensiones de membrana en todos los puntos de la superficie, conformando siempre el área más pequeña y el volumen más grande dentro de las condiciones de borde determinadas.

En el caso de una superficie esférica de radio r , la tensión de la membrana valdrá:

$$\sigma = \frac{p \times r}{2} \quad \text{donde } p = \text{sobrepresión interior:}$$

Para superficies de doble curvatura sinclásticas, la tensión en un punto cualquiera de la membrana valdrá:

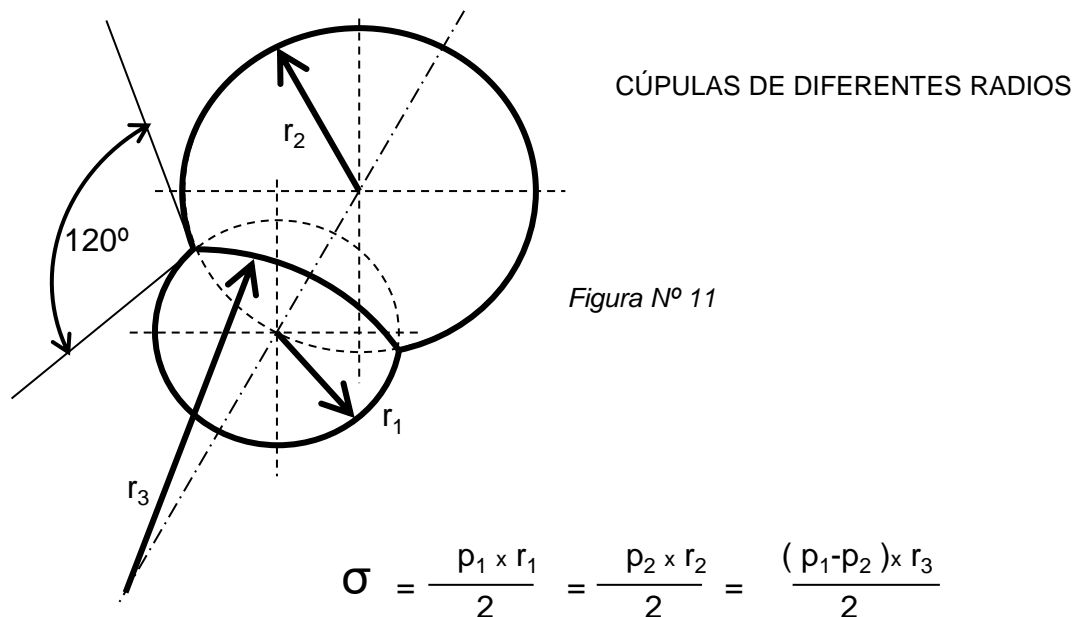
$$\sigma = \frac{p}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \quad \text{donde } r_1 \text{ y } r_2 \text{ son los radios correspondientes a las curvaturas principales (máxima y mínima) en el punto de análisis.}$$

Para superficies cilíndricas:

$$\sigma = p \times r$$

Tratándose no ya de una estructura neumática en forma de cúpula aislada sino de un sistema de cúpulas múltiples, el análisis de modelos de películas jabonosas permite resolver el problema.

Partiendo de la hipótesis de que la tensión de la membrana resulta invariable, es posible establecer las relaciones existentes entre presión interna y radios de curvatura de las diferentes cúpulas:



CÚPULA DOBLE DE IGUAL RADIO

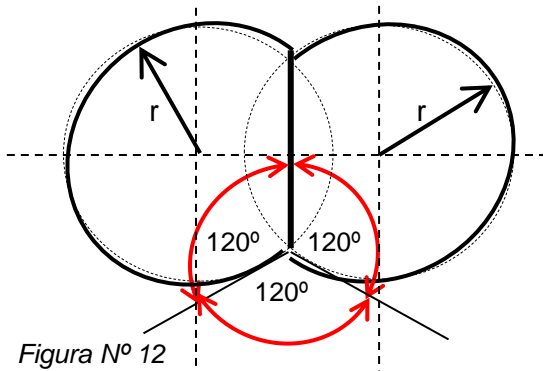


Figura Nº 12

CÚPULA TRIPLE DE IGUAL RADIO

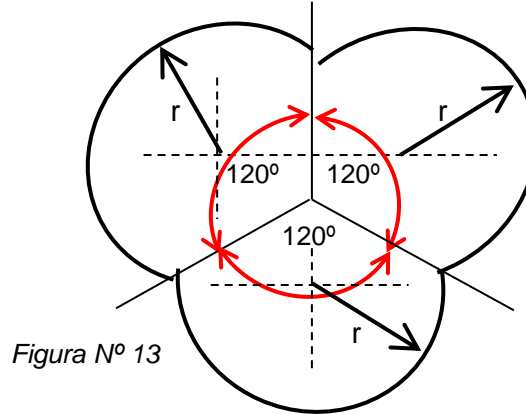


Figura Nº 13

Análisis estructural de los sistemas de baja presión

Los sistemas de baja presión son de mayor utilización práctica. Pueden ser de presión positiva o negativa. Los primeros están constituidos por membranas curvadas hacia fuera (convexas) ya que la presión interna es mayor que la externa (Fig. Nº 14 a, b, c y d) mientras que los segundos, las membranas están curvadas hacia adentro (cóncavas). Estos últimos tienen muy poca aplicación porque facilitan la formación de bolsones de agua, nieve, etc. (Fig. Nº 15 a, b, c y d)

Figura Nº 14 a, b, c y d

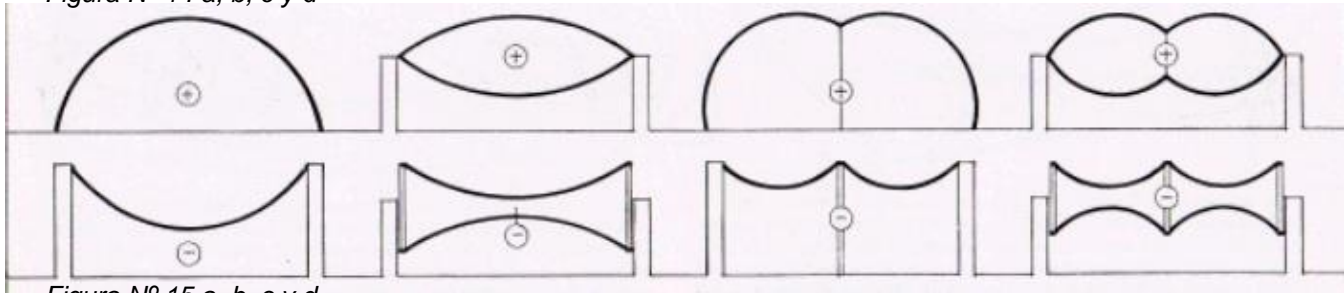


Figura Nº 15 a, b, c y d

Soportes adicionales

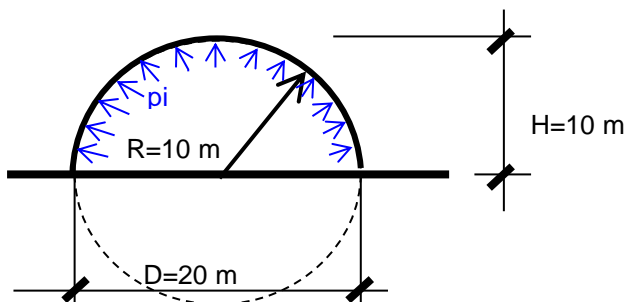
Vimos que la tensión en las membranas es directamente proporcional a su radio de curvatura :

$$\sigma = \frac{p \times r}{2}$$

donde p= sobrepresión interior:

Una forma de disminuir dicha tensión para que no supere los límites admisibles del material, consiste en reducir los radios de curvatura. Esto se logra mediante la introducción -en el interior de la estructura- de soportes adicionales que pueden ser puntuales, lineales o una combinación de ambos.

Analicemos el siguiente ejemplo:



Supongamos que tenemos una estructura neumática de sección semicircular de radio R= 10 m (la planta sería un círculo de 20 m de diámetro) sometida a una sobrepresión pi.

Figura Nº 16

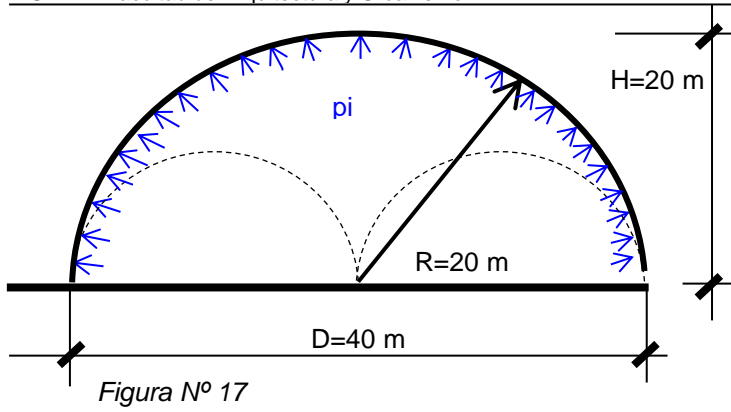


Figura Nº 17

Si duplicamos el radio ($R= 20\text{ m}$) para aumentar la superficie cubierta llevando el diámetro a $D=40\text{ m}$ (la superficie aumenta 4 veces), manteniendo la sobrepresión interior p_i , la tensión σ en la membrana se duplica, pero como además, la altura de la cúpula pasa a ser el doble, la acción del viento ejerce una mayor presión, siendo necesario aumentar la presión interior p_i para mantener la misma estabilidad del caso anterior, por lo que la tensión σ en la membrana se incrementa mucho más que el doble.

Además, hay que considerar que el volumen encerrado en la estructura neumática es mucho mayor, por consiguiente es mucho mayor los consumos para presurizar y calefaccionar.

Una solución para evitar estos inconvenientes consistiría en reducir la altura de la estructura, en la que manteniendo la altura de la primer estructura, se ha duplicado la luz. Sin embargo, como consecuencia del aumento del radio de la cúpula, la tensión en la membrana se ha incrementado 2,5 veces. ($R= 25\text{ m}$)

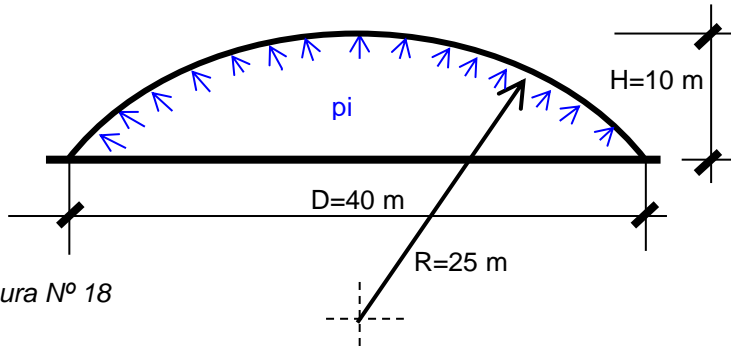


Figura Nº 18

Figura Nº 20

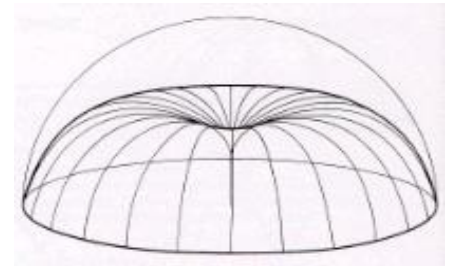
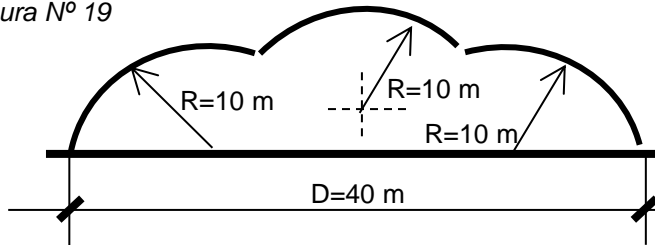


Figura Nº 19



Finalmente se plantea la mejor solución que permite aumentar la luz de la cubierta conservando la altura inicial y el radio de curvatura de la membrana, mediante el empleo de soportes adicionales.

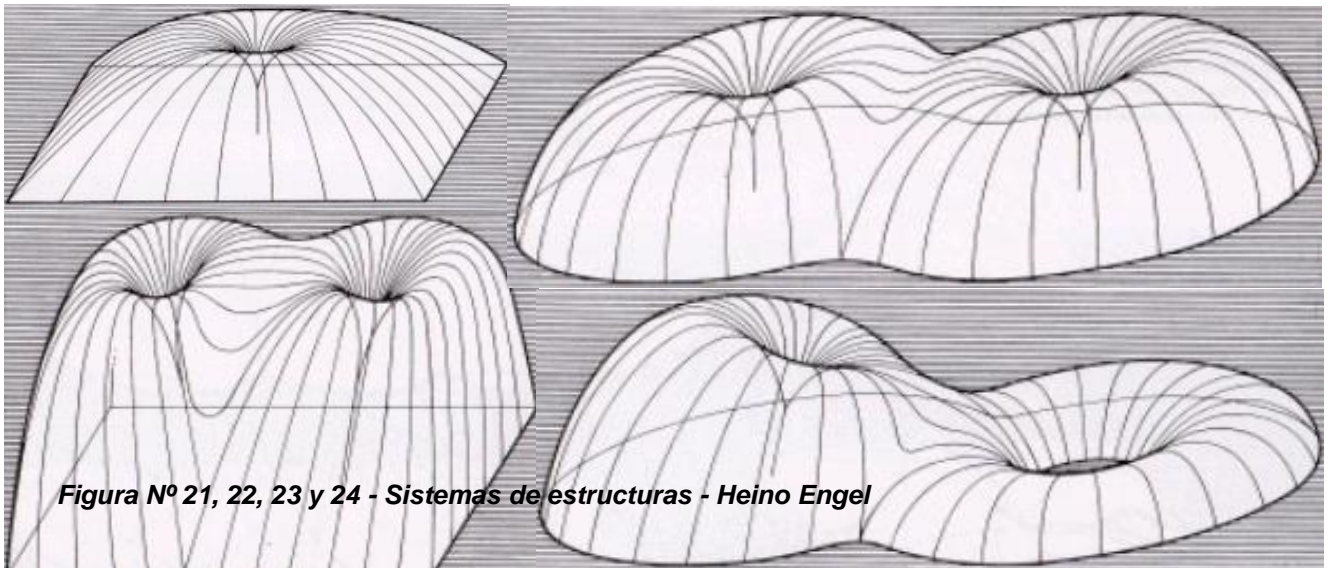


Figura Nº 21, 22, 23 y 24 - Sistemas de estructuras - Heino Engel

Anclajes

Las fuerzas que ejerce la presión interna en la superficie hace que las membranas que componen la estructura tienda a elevarse. También actúan fuerzas externas (viento) en cualquier dirección, por lo que es necesario contrarrestar estos esfuerzos y equilibrar el sistema a través de anclajes.

Los anclajes tienen por objeto derivar hacia las fundaciones las fuerzas (interiores, exteriores, verticales, horizontales) soportadas por la membrana.

Cualquiera sea el método empleado para anclar la estructura, las fuerzas generadas por los anclajes debe tendre a ser uniforme con el fin de evitar las concentraciones de tensiones en la membrana (a menos que ésta esté reforzada por cables o redes, en cuyo caso el anclaje deberá efectuarse en determinados puntos).

Dos son los métodos empleados para contrarrestar esas fuerzas ascensionales: *el lastre y el anclaje positivo en el suelo*.

Mecanismo de lastre

El anclaje a base de lastre se usa principalmente en estructuras del tipo nómade, es decir que se van montando en distintos lugares. Como las condiciones del lugar pueden variar considerablemente, deben elegirse en cada caso los métodos de lastre más apropiados.

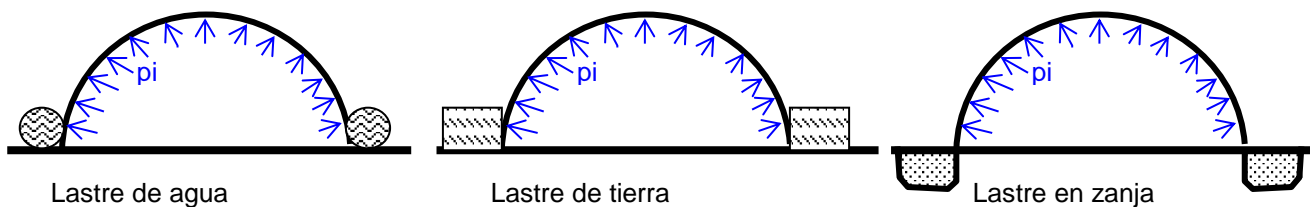
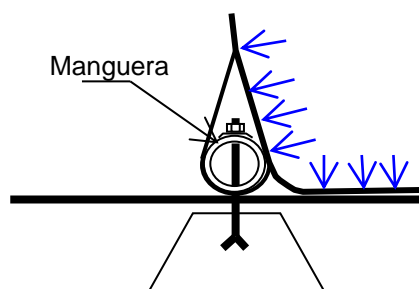
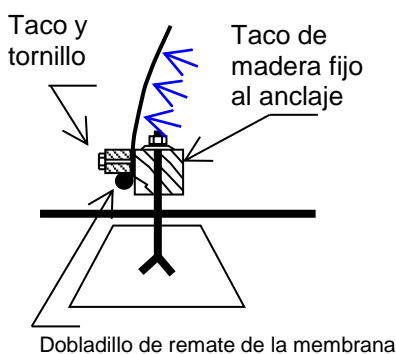


Figura N° 25 a, b y c

Sistema de anclaje en suelo

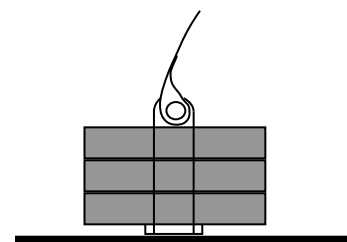
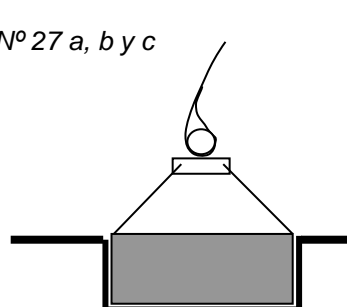
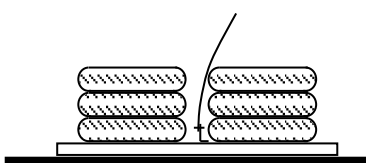
En este tipo de sistema la membrana está positivamente atada al suelo en frecuentes intervalos. Las fuerzas de anclaje deben distribuirse uniformemente en la membrana y a lo largo del perímetro de la estructura, lo que puede lograrse de varias maneras. Los anclajes de suelo pueden clasificarse en dos grupos generales: *anclajes profundos* y *anclajes de superficie*.

ANCLAJES PROFUNDOS *Figura N° 26 a y b*



Manguera en dobladillo
Consiste en un dobladillo abierto cosido en el extremo inferior de la membrana, con aberturas dispuestas a intervalos de 1 m aprox., por donde se coloca una manguera que se fija a los anclajes en las aberturas mencionadas.

ANCLAJES DE SUPERFICIE *Figura N° 27 a, b y c*



Patrones de corte (Patronaje)

La forma de materializar la superficie proyectada, tanto en las estructuras neumáticas como en las estructuras tensadas, es todo un capítulo que merece una sustantiva importancia, no solo para que el producto final se aproxime lo más posible al proyectado, llevando las zonas de conflicto a su mínima expresión, sino fundamentalmente por el aspecto económico en cuanto a la mejor utilización de las membranas.

En las estructuras proyectadas cuyas superficies poseen doble curvatura, éstas no son desarrollables y además, el ancho de la membrana que se fabrica va desde 1,50 a 1,60 m llegando en algunos casos a 4,70 m. Esto hace que las mencionadas superficies de doble curvatura se deban conformar con una sucesión de polígonos (fundamentalmente triángulos, cuadrados, rectángulos, trapecios) dispuestos de forma tal que espacialmente conformen la superficie proyectada, cosidos unos a otros y completamente tensados, a efectos de eliminar completamente la desagradable vista de sectores arrugados o encuentros "fruncidos" o semiplegados que distorsiones la imagen de una superficie continua y envolvente que se busca con este tipo de diseño. A su vez, estos polígonos se deben cortar de un rollo de ancho definido (por ejemplo 1575 mm) con la imperiosa necesidad de mínimo desperdicio (por razones de costo). Con estas premisas debe estudiarse el patronaje.

Actualmente existen satisfactorios software que permiten optimizar este trabajo.

Ficha técnica de una membrana

ESP	Tipo IV	B 18059
Tejido base		Fibra de vidrio EC 3/4
Revestimiento		PTFE – Politetrafluoretileno
Peso total (g/m ²)	DIN EN ISO 2286-2	1550
Ancho (cm)	DIN EN ISO 2286-1	470
Resistencia a la rotura (N/5 cm)	DIN 53354	urdimbre/trama 8000/7000
Resistencia al desgarro (N)	DIN 53363	urdimbre/trama 500/500
Adherencia (N/5 cm)	DIN 53357	100
Translucidez en 550 nm (%)	DIN 5036	11
Ignifugación	DIN 4102	B1*

Nota: El producto no debe ser cosido, sino soldado con barra caliente. *Otros certificados obtenibles previa petición. Reservado el derecho a realizar modificaciones destinadas al avance técnico. Los valores sin datos de tolerancias obedecen a valores nominales con una tolerancia de $\pm 5\%$. Los datos se corresponden con nuestro estado actual de conocimiento y su finalidad es informar sin vinculación legal. La translucidez hace referencia a la versión blanqueada.



Vemos a continuación una serie de ejemplos de patronajes

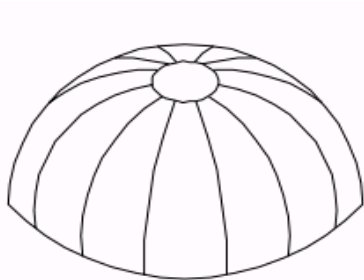


Figura N° 28 a, y b

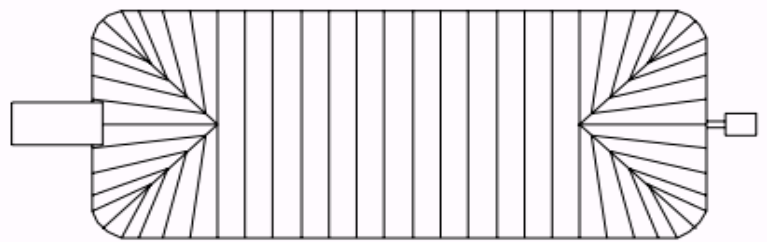
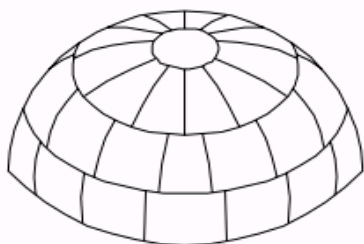
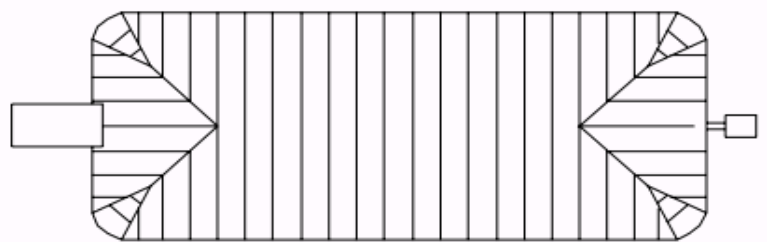


Figura N° 29 a, y b



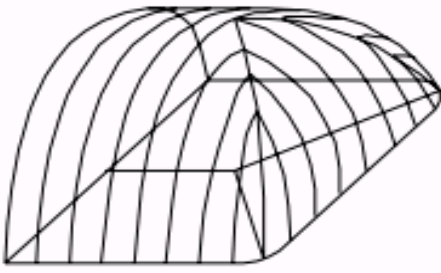
Patrones de corte para una hemiesfera



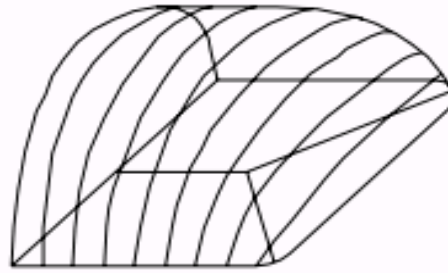
Patrones de corte para una planta rectangular

Observese el desperdicio importante (en % de la superficie) que surge de optar por una solución del tipo de la Fig. N° 28 a. Esa pérdida se reduce en la solución b.

Figura N° 30 a y b



Patrón de corte tipo caballete



Patrón de corte tipo armadillo (lima tesa)

Patrón de corte de membrana para el tipo caballete (lima tesa)

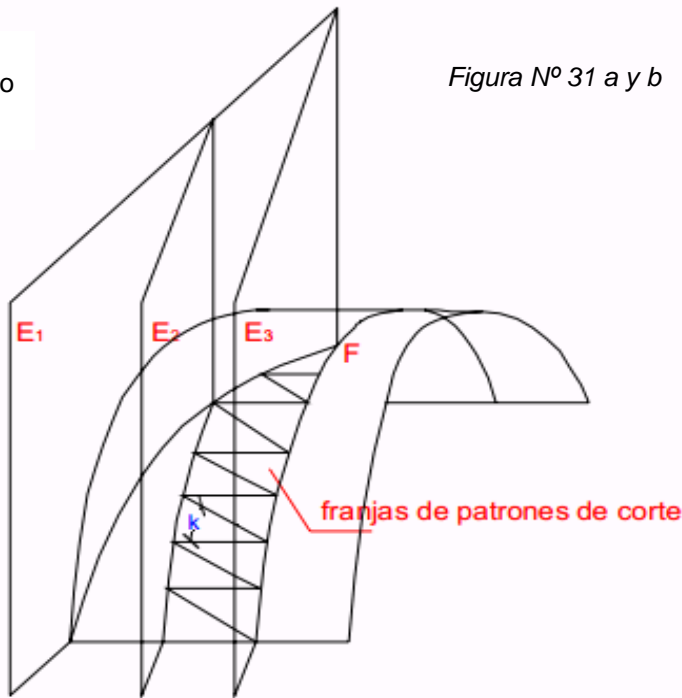
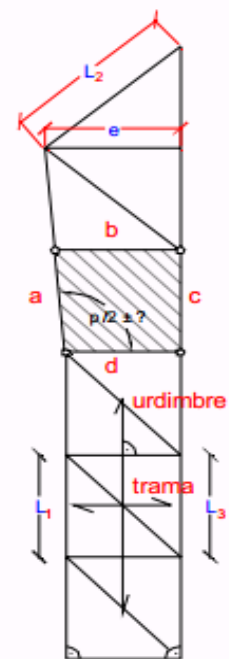


Figura N° 31 a y b



Ref.: Estructuras Neumáticas-Ing. Rodolfo Gerardi
<http://departamentos.etsa.udc.es>

Uniones de membranas

Distintos tipos de uniones de membranas

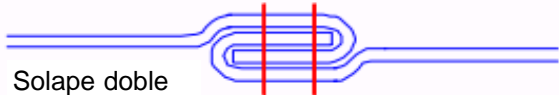
UNIONES COSIDAS



Solape simple



Solape mixto

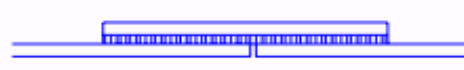


Solape doble

UNIONES PEGADAS



Solape simple



Solape mixto



Solape doble