

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANEXO DE DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LAS  
ESTRUCTURAS TEXTILES**

**DISEÑO DE CUBIERTA TEXTIL Y GRADERÍO DE CONCRETO  
ARMADO PARA EL CAMPO DEPORTIVO DE LA PUCP**

Tesis para optar el Título de Ingeniería Civil, que presenta el bachiller:

**Juan García-Lastra Zorrilla**

**ASESOR: Carlos Sosa Cárdenas**

Lima, enero de 2018

## ÍNDICE

<b>1. ANEXO DE DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS TEXTILES .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. COMPORTAMIENTO DE LAS MEMBRANAS TENSADAS.....</b>	<b>6</b>
1.2.1. FORMA SUPERFICIAL .....	6
1.2.2. PRETENSADO .....	8
1.2.3. DEFORMABILIDAD .....	9
<b>1.3. PROPIEDADES .....</b>	<b>10</b>
1.3.1. PROPIEDADES ESTRUCTURALES .....	10
1.3.2. PROPIEDADES DE CONSERVACIÓN .....	11
1.3.3. PROPIEDADES DE MONTAJE .....	12
1.3.4. PROPIEDADES FUNCIONALES.....	12
<b>1.4. ESTRUCTURA: CÁLCULO Y DISEÑO.....</b>	<b>13</b>
1.4.1. GEOMETRÍA DE LA MEMBRANA .....	13
1.4.2. MÉTODOS MATEMÁTICOS DEL PROGRAMA DE CÁLCULO .....	15
1.4.3. ACCIONES A CONSIDERAR EN EL CÁLCULO .....	17
<b>1.5. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>2. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>22</b>

# 1. ANEXO DE DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS TEXTILES

## 1.1. INTRODUCCIÓN

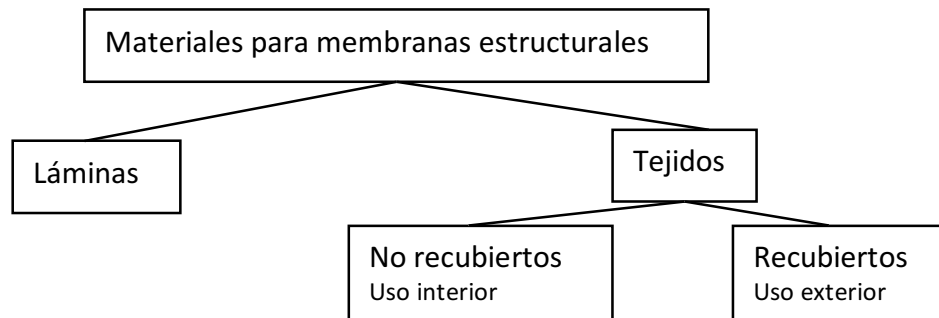
Las estructuras textiles emplean delgadas membranas de espesor constante, en virtud de su forma superficial, su ligereza y su flexibilidad. Son materiales que solo tienen rigidez a tracción, requiriendo solamente un moderado pretensado en la instalación, pudiendo soportar así las cargas exteriores.



Figura 1 Estructura textil consistente en membranas y cables sobre mástiles

Fuente: [arquitectil.net](http://arquitectil.net)

Se pueden diferenciar dos tipos principales de membranas: láminas y tejidos compuestos de fibras. Los tejidos pueden tener recubrimiento o no, dependiendo del uso que se les dará.



Para este proyecto en particular, se usarán membranas con un tejido base compuesto por fibras de poliéster, con un recubrimiento de PVC que le otorga propiedades que alargan su vida útil contra agentes deteriorantes (radiación UVA, hongos, retardantes de combustión, entre otros).

Las fibras están dispuestas en diferentes formas o entramados, que afectan a su capacidad resistente y a la linealidad de su relación tensión-deformación. Los hilados siempre se disponen en forma ortogonal, siendo las dos direcciones principales la trama y la urdimbre. La urdimbre es la dirección del lado mayor de la lámina y la trama la del menor.

Existe una anisotropía en las resistencias máximas a tracción del material dada la naturaleza de su composición. La trama es más resistente dada su mayor longitud de hilado. Siempre se intenta que la trama se disponga de forma que absorba mayores esfuerzos que la urdimbre.

Los entramados (en inglés *weaves*) más comunes son el *Simple* (1/1) o el *Panameño* (2/2). En la Figura 2 se muestran sus características:

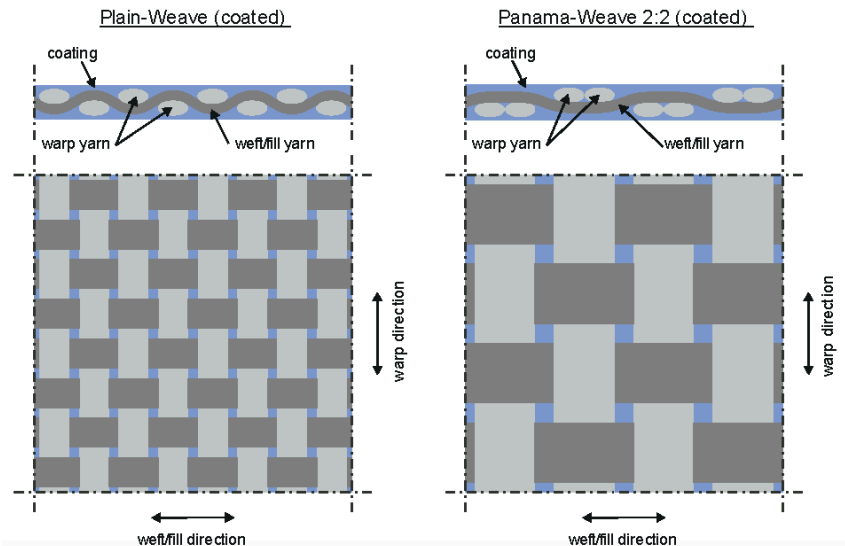


Figura 2 Tipos de entramados textiles más comunes: Simple y Panameño

Fuente bibliográfica 4.5

Se pueden diferenciar varios tipos de fibras en los textiles estructurales, siendo los principales los naturales (lino, cáñamo, algodón), los sintéticos (poliéster, polietileno, poliamida), los metálicos (acero, aluminio, aleaciones de cobre) y los minerales (vidrio, carbón). Todas ellas requieren de recubrimiento para poder tener una vida útil superior y así poder resistir los diferentes agentes externos a los que están expuestos.

Para usos interiores las fibras no requieren ser recubiertas, no estando expuestas a la mayoría de los agentes nocivos del exterior.

Se estima que la vida útil de este material recubierto es de aproximadamente 30 años. El agente que mayor impacto tiene sobre la membrana es la radiación, que va degradando el recubrimiento y cuando alcanza el poliéster, lo cristaliza, haciendo que pierda su flexibilidad y por tanto capacidad de deformación (Figura 3)



Figura 3 Vista de la fibra de poliéster dentro de una lámina de PVC rota

El recubrimiento influye entonces en la elección de material ya que definirá la vida útil de este. Un recubrimiento mayor supone una vida útil mayor del material, teniendo una repercusión económica.

El recubrimiento tiene también la propiedad de distribuir mejor las cargas en la superficie de la membrana, que actúa como otro elemento estructural.

A la hora de diseñar estructuras textiles, hay que tener en cuenta los aspectos estructurales clave que definen a estas membranas. Se deben tener en cuenta: la forma de la superficie en estado de equilibrio deseado, el nivel de pretensado que se aplicará y por último su deformabilidad.

## 1.2. COMPORTAMIENTO DE LAS MEMBRANAS TENSADAS

### 1.2.1. FORMA SUPERFICIAL

El estado de equilibrio de la lámina es lo que se tiene en mente cuando se elabora su diseño. La geometría de esta forma se define por el contorno al que se restringirá, sus conexiones con éste y su nivel de pretensado.

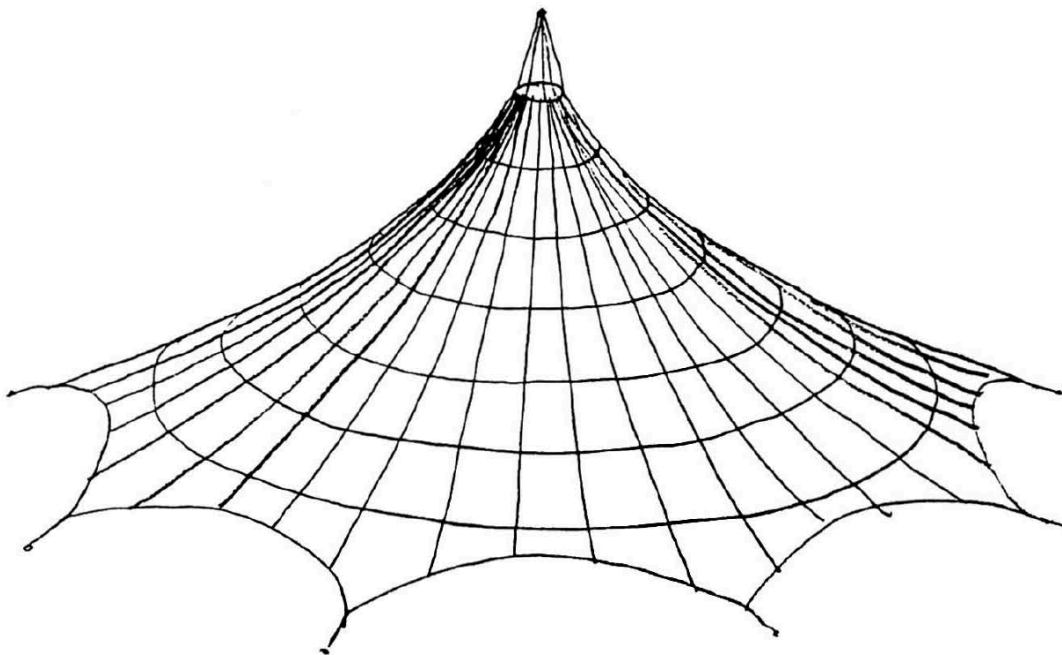


Figura 4 Form Find de cubierta cónica arriostrada con cables radiales y perimetrales

Fuente bibliográfica 4.11

El proceso por el cual la membrana encuentra su forma condicionada por estos parámetros se denomina *Form Finding*. En él, la forma de la membrana es definida por el camino de las fuerzas de modo que la superficie es mínima, sin estados residuales.

Se puede utilizar el símil de la burbuja, que utilizaba Frei Otto para los primeros diseños de estas estructuras en los años 60.

A cada contorno que se le imponga a una burbuja ésta se adaptará de forma diferente, con un espesor mínimo garantizando que se encuentra a tracción el 100% de la superficie.

Es por eso que se dice que estas estructuras son *naturales*, resultando atractivas desde el punto de vista estético y eficientes desde el punto de vista estructural. Implica entonces un esfuerzo tanto ingenieril como arquitectónico.

En las membranas estructurales, las fuerzas tendrán un carácter biaxial en las direcciones principales de curvatura de cualquier punto.

La mayoría de estas estructuras funcionan como superficies anticlásticas, lo que quiere decir que tienen curvaturas opuestas en las direcciones principales. Como particularidad de estas superficies, la suma de las curvaturas en cualquier punto resulta 0 (Figura 5).

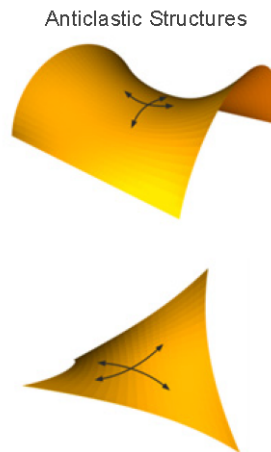


Figura 5 Formas típicas de tensoestructuras anticlásticas

Fuente bibliográfica 4.5

Ambas curvaturas trabajan de forma funicular, siendo ésta la forma que definen las cuerdas al estar sometidas solo a tracción.

La curvatura negativa (cóncava) trabajará cuando exista una carga vertical descendente (nieve, agua, viento), y la positiva (convexa) cuando la carga sea ascendente (succión del viento).

En concreto para este proyecto, la forma adoptada por la membrana será la anticlástica más clásica, denominada “Silla de montar”.

La membrana deberá adaptarse a la estructura primaria que actúa de contorno (arcos metálicos) y al nivel de pretensado acordado. Así conseguirá radios de curvatura mayores cuanto mayor sea el pretensado. Aumentará entonces la rigidez del material y disminuirán sus deflexiones y libertad de movimientos, a coste de un mayor estado tensional que reducirá el umbral de resistencia a rotura.



### 1.2.2. PRETENSADO

Como ya se mencionó antes, el pretensado influirá en la forma final de la superficie de equilibrio de la membrana, en colaboración con las condiciones de contorno geométrico. El contorno es el que define por donde irán las fuerzas, pero es el pretensado el que dicta las intensidades de los esfuerzos y la geometría final.

El nivel de pretensado influye en la rigidez del material. Al estar solidarizadas las fibras por el entramado, las líneas de fuerzas en las dos direcciones se restringen las unas a las otras. Cuanto más fuerte sea el pretensado, menos libertad de movimientos tendrá el material. Es el principio funcional de un tambor, por ejemplo.

Algunos aspectos importantes a tener en cuenta al decidir el nivel de pretensado son:

- Flexibilidad de la membrana

Cuando actúen cargas superficiales sobre la membrana, ésta solo podrá responder deformándose y traccionando el contorno al que está adherida. Si no tiene margen de deformación, las tensiones serán demasiado altas pudiendo llevarla a la rotura. El nivel de pretensado debe permitir un cierto margen de deformación a la membrana para responder a las cargas.

- Fatiga del material

Con el paso del tiempo la membrana va reduciendo sus capacidades resistentes ya sea por deterioro por agentes externos (radiación, agentes climáticos, vandalismo, suciedad) o por fluencia de las fibras al estar sometidas a cargas elevadas prolongadamente. No se puede ser muy exigente con el pretensado ya que este proceso de fatiga podría acelerarse.

- Facilidad de instalación

Debe tenerse en cuenta la dificultad del proceso de instalación en el diseño, ya que las condiciones de montaje pueden no ser idóneas para aplicar el pretensado deseado.

- Estética y forma final de la membrana

Al traducir fuerzas a formas en las membranas, la cantidad de pretensado influirá en la forma del estado de equilibrio de la membrana. Debe buscarse una forma atractiva y funcional para la estructura.

### 1.2.3. DEFORMABILIDAD

Al estar compuesta solamente por material fibrado y su recubrimiento flexible, la inercia de este material es despreciable. Es por ello que cualquier carga que se le aplique a la membrana se traducirá en deformación. Esta es una de las grandes ventajas del material, pudiendo adoptar una gran variedad de formas que la rigidez de otros materiales no les permitiría.

En los casos pretensados, la carga supone un cambio del estado tensional con un cambio en la geometría por las deflexiones.

Puede darse el caso de que los esfuerzos se den de forma que en la membrana ocurran compresiones. Dejaría entonces de trabajar y se producirían arrugas o flacidez en esa dirección de compresión. En el peor de los casos esto provocaría un desequilibrio tensional que alcanzaría la rotura del material por tracción en otra dirección.

En los lugares con nevadas o lluvias graves, debe tenerse en cuenta la curvatura de la membrana y su inclinación, ya que una acumulación de nieve mantenida produce el fenómeno denominado *estancamiento* o *ponding*: Poco a poco la forma deformada de la membrana se vuelve más y más honda, aumentando entonces la cantidad de nieve o agua en un proceso de retroalimentación que puede llegar a la rotura.

Se debe, por tanto, diseñar una superficie suficientemente inclinada que deje caer a la nieve o la lluvia sin que éstas se acumulen.

### 1.3. PROPIEDADES

Las propiedades tanto físicas como funcionales que interesan conocer del material se obtienen de los catálogos de los fabricantes y proveedores. Cabe diferenciar 4 tipos de propiedades de estos materiales: Estructurales, funcionales, de conservación y de montaje.

#### 1.3.1. PROPIEDADES ESTRUCTURALES

- Resistencia a tracción

Es el aspecto más importante en el diseño estructural. Puede ser resistencia a tracción uniaxial o biaxial. Según la dirección de la membrana, tiene una resistencia a tracción diferente. Se suele expresar en daN/5cm o en KN/m. Se muestran los ensayos de tracción axial y biaxial en la Figura 6 y Figura 7:

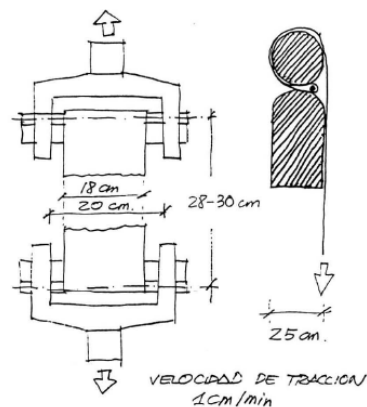


Figura 6 Ensayo a tracción de textil

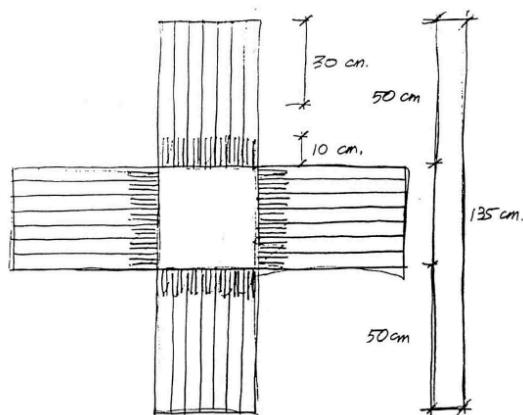


Figura 7 Ensayo a tracción biaxial de textil

Fuente bibliográfica 4.12

En ellos se tracciona hasta la rotura del material.

- Resistencia al desgarro

Es la resistencia de la membrana a la propagación de grietas

Se mide en una cinta de 10 cm de longitud con un corte de 2.5 cm en la mitad. Se mide en N.

- Adherencia

Se pegan entre sí dos telas con un solape de 5 cm y se traccionan para averiguar cuanto aguanta la unión. Se mide en kp/5cm.

### 1.3.2. PROPIEDADES DE CONSERVACIÓN

- Resistencia a la intemperie

Las características del material varían según la degradación que le hayan provocado la radiación, la temperatura o la humedad. Conviene saber cuánto aguantan los materiales a estos agentes para tener una idea de su durabilidad.

- Resistencia de la capa protectora

Determina la capacidad que tiene el recubrimiento para mantener su protección en el tiempo.

- Permeabilidad de la superficie

La resistencia a la humedad y su calidad como cerramiento vienen relacionadas con la impermeabilidad. Puede afectar también a la aparición de microorganismos.

- Resistencia al fuego

Si se da un incendio, el material puede desprender material ardiente y humos. Esto es lo que se mide en los ensayos de combustión. También indica la temperatura de combustión. El comportamiento del poliéster recubierto de PVC es óptimo en este caso, no dejando caer ninguna gota de material derretido y provocando poca cantidad de humo, no siendo peligroso en ambientes cerrados. Se derrite a 200°C.

### 1.3.3. PROPIEDADES DE MONTAJE

- Soldabilidad de las piezas  
Puesto que las membranas están compuestas de varios paños soldados unos con otros mediante diferentes técnicas (costura, pegado con adhesivo, soldadura), conviene saber la facilidad de un material a ser soldado.
- Resistencia al doblado  
Siendo un material prefabricado, es sometido a un proceso de transporte y manufactura, de forma que se somete a doblado constantemente. Esto puede afectar a la resistencia de la membrana en la dirección del eje de doblado.

### 1.3.4. PROPIEDADES FUNCIONALES

- Coloración  
El aspecto del material puede cambiarse al añadir colorantes a la composición del recubrimiento. Las fibras son transparentes pero el grado de color se le da a la capa cobertora.
- Transparencia  
Una propiedad importante a la hora de seleccionar un material de cerramiento. Podrá dejar pasar la luz en mayor o menor grado según su transparencia. Con el PVC se consigue un foco de luz difusa que permite crear ambientes agradables y un nivel decente de luz diurna, pudiendo llevar a cabo actividades de precisión.
- Aislamiento  
Los materiales textiles tienen poca capacidad de aislamiento tanto térmico como acústico dado su delgado espesor. No obstante, se puede disponer el material en capas de forma que se crean espacios de aire entre ellos aumentando entonces el aislamiento.

Se adjunta en el apartado de materiales de la memoria las propiedades del material seleccionado para el proyecto (PVC Ferrari 1302 gr/m<sup>2</sup>).

## 1.4. ESTRUCTURA: CÁLCULO Y DISEÑO

### 1.4.1. GEOMETRÍA DE LA MEMBRANA

El primer paso a dar en el proceso del análisis estructural de las membranas es definir la geometría de su superficie de equilibrio o *Form Find*. El equilibrio de ésta viene dado por las condiciones de contorno y por el nivel de pretensado. Se ajustará a un estado tensional óptimo conociendo solo una serie de puntos de la membrana, definiendo en el contorno.

Este estado tensional puede llamarse *de superficie mínima* y significa que hay tensión en todas las direcciones y analíticamente viene dada por la Ecuación 1:

Ecuación 1 Expresión analítica de la superficie tensada en todas direcciones

$$\frac{d^2z}{dx^2} + \frac{d^2z}{dy^2} + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 \cdot \frac{d^2z}{dy^2} + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2 \cdot \frac{d^2z}{dx^2} - 2 \frac{dz}{dx} \cdot \frac{dz}{dy} \cdot \frac{d^2z}{dx dy} = 0$$

Integrando esta expresión en el contorno geométrico definido en el proyecto nos dará la superficie de equilibrio (Figura 8).

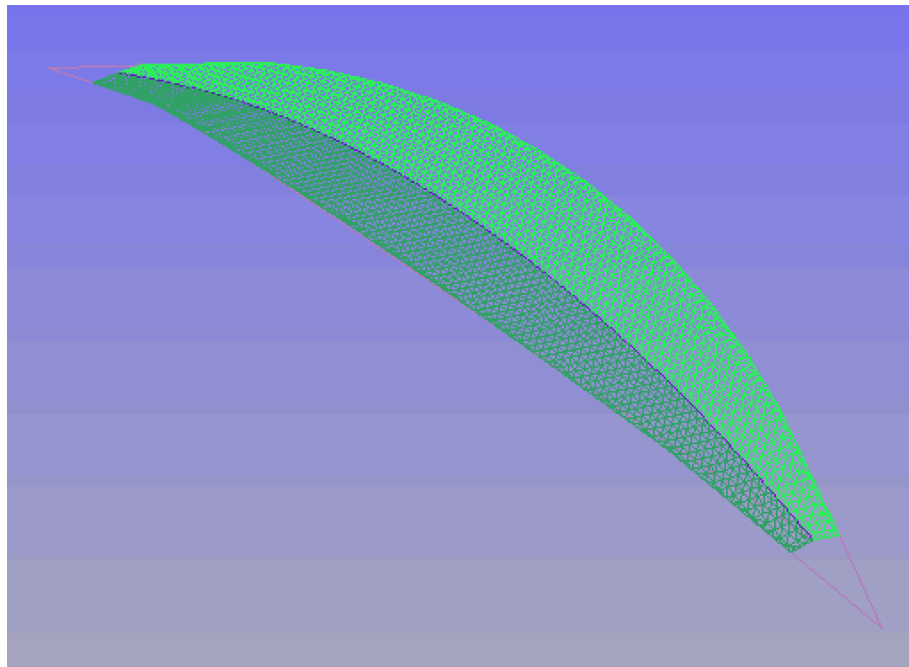


Figura 8 Estado de equilibrio de una membrana en el software ixForten4000

Esta forma podría obtenerse mediante experimentos físicos, como se hacía antes de que apareciesen los programas matemáticos de los ordenadores. Estos métodos son prácticos para membranas de pequeña superficie, pero inadecuados para superficies mayores o complejas.

Se recurriría a la medición sobre un modelo reducido por medios fotogramétricos automáticos o manuales (Figura 9). Con la geometría medida podría pasarse al cálculo.

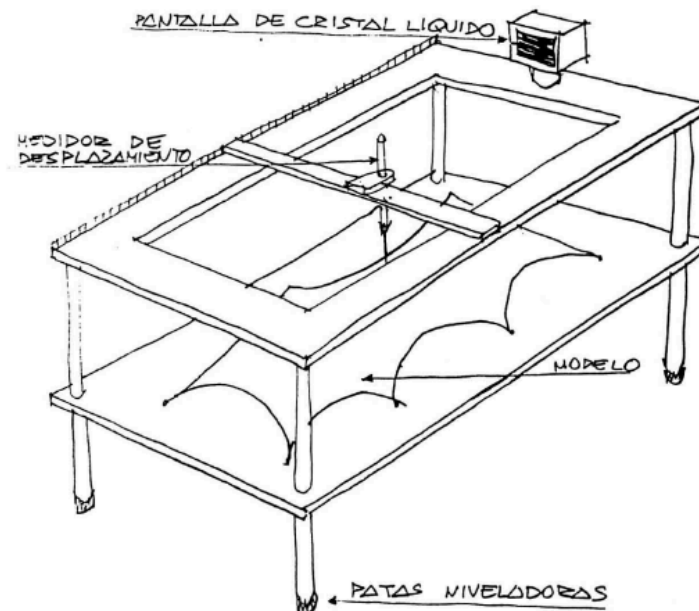


Figura 9 Mesa medidora de coordenadas 3D

Fuente bibliográfica 4.11

Algunos factores a tener en cuenta en el cálculo de la geometría de estas membranas son:

- La geometría de las estructuras tensadas es variable con las cargas y no pueden asumirse pequeños desplazamientos dada su alta flexibilidad, por lo que los esfuerzos y las coordenadas de los nudos van estrechamente relacionados.
- Las ecuaciones de equilibrio forman un sistema no lineal que tiene una solución compleja y requiere procesos especiales de linealización numérica.
- Se puede suponer la malla como una red de planos triangulares de forma que se puede aplicar el Método de Elementos Finitos.
- Una vez discretizada la estructura en un conjunto de elementos con propiedades definidas, unidos entre sí mediante nudos y con condiciones de contorno fijadas, se plantean las ecuaciones de equilibrio y posteriormente se resuelven las ecuaciones no lineales resultantes del planteamiento con un programa especializado.

- Si tras el análisis surgen elementos en la malla sometidos a compresión, debe procederse de nuevo con el análisis y otorgarles rigidez nula a esos elementos comprimidos anteriormente, ya que no pueden comprimirse por ser textil. Este es el procedimiento iterativo a seguir en caso de que ocurran compresiones.

#### 1.4.2. MÉTODOS MATEMÁTICOS DEL PROGRAMA DE CÁLCULO

Para el cálculo estructural de la membrana, se utilizará el software 'ixForten4000'. Éste utiliza los siguientes métodos matemáticos como base de cálculo:

- Método de la Fuerza Densidad (FDM, *Force Density Method*)
- Método de Newton-Raphson de análisis no lineal

Como ya se mencionó, el primer paso para el cálculo estructural de la membrana es el *Form Find*, partiendo de las condiciones de contorno y el pretensado definido por el diseñador.

El método matemático para esta parte consiste en el FDM. En él, se define el parámetro C de pretensado (en kN/m), funcionando como un factor de densidad fuerza/longitud, que dicta el estado tensional de cada elemento lineal (barra) que compone la malla que dibuja la superficie del contorno.

De esta forma las ecuaciones de partida en el cálculo de la geometría de la malla que al principio no eran lineales ahora lo son gracias a esta condición C.

Para una estructura de n nodos, las ecuaciones de equilibrio a lo largo de la dirección del eje X en un nodo i-ésimo conectado a los nodos j-ésimos, siendo una condición de j:  $1 \leq j \leq n$

Ecuación 2 Equilibrio de los nodos en la dirección X

$$\sum_{j=1}^n \frac{t_{ij}}{l_{ij}} (\bar{X}_i - \bar{X}_j) = \bar{F}_i$$

Siendo:

$\bar{X}_i$  el vector de posición del nodo i-ésimo

$\bar{F}_i$  su vector de fuerzas

$t_{ij}$  la tracción en el tramo ij

$l_{ij}$  la distancia entre los nodos i-ésimo y j-ésimo, siendo a su vez:

Ecuación 3 Distancia entre nodos

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$



Estas ecuaciones en principio no son lineales, pero al introducir un valor dado a  $C = \frac{t_{ij}}{l_{ij}}$  (kN/m) queda de la siguiente forma:

Ecuación 4 Forma simplificada de la ecuación 2

$$\sum_{j=1}^n C (\bar{X}_i - \bar{X}_j) = \bar{F}_i$$

Se puede ver que entonces queda como una ecuación de rigidez  $F = K \cdot D$ .

Una vez hallada la forma final de la membrana en equilibrio con el pretensado, la siguiente sollicitación que interesa conocer es la de las cargas externas.

Ante cargas externas las membranas estructurales reaccionan con desplazamientos demasiado grandes para suponer la teoría elástica que se basa en la ley de Hooke. Es por esto que se requiere un análisis geométrico no lineal, en este caso el de Newton-Raphson.

A diferencia del análisis estático en el que el equilibrio se encuentra con la estructura fija, el geométrico no lineal encuentra el equilibrio en la forma deformada final.

Después del *Form Find* la membrana se encuentra en una geometría de equilibrio  $G_0$  y un estado tensional (pretensado)  $S_0$ . En este estado, la geometría y el pretensado dictarán la rigidez y la capacidad de la estructura para soportar cargas.

Cuando se aplica una carga  $P$ , debe definirse para el método matemático un número de incrementos  $n$  e iteraciones  $t$ , con una precisión de  $x$ . El cálculo parte de una geometría  $G_0$  hallada previamente en el *Form Find*.

Se aplica un incremento de carga  $P_1 = P/n$ . Con este  $P_1$  se obtiene una geometría resultante  $G_1$  y un nuevo estado tensional  $S_1$ .

Si el incremento de carga es pequeño en comparación con  $S_0$ , las variaciones de tensiones  $\Delta S = S_1 - S_0$  y de geometría  $\Delta G = G_1 - G_0$  serán pequeñas por lo que podrá linealizarse la solución en  $t$  iteraciones.

Pueden no llegarse a calcular  $t$  iteraciones si se llega a la tolerancia  $x$  antes.

El resultado de este proceso es un estado definido por  $S_1$  y  $G_1$  tras la carga  $P_1$ .

Una carga nueva  $P_2 = P_1 + P/n$  es aplicada, resultando  $S_2$  y  $G_2$ . Una vez que se aplican las  $n$  iteraciones, se alcanza la carga  $P$  y el estado final  $S_n$  y  $G_n$  deseado.

Debe prestarse especial atención al número de incrementos e iteraciones que se aplican, ya que son una fuente común de error del proceso cuando son demasiado grandes (al ser  $n$  y  $t$  muy pequeños).

Otra fuente clásica de error es un pretensado equivocado para la geometría inicial de la membrana, no pudiendo ejecutarse bien el análisis.

### 1.4.3. ACCIONES A CONSIDERAR EN EL CÁLCULO

Las acciones a considerar habitualmente en el cálculo de membranas estructurales serán:

- El pretensado, del que ya se habló con anterioridad.
- Cargas de nieve: El mayor problema que surge con esta carga es el acumulamiento de nieve y aumento sustancial de la carga. Para esto se diseña de forma que ésta se caerá, por la inclinación.
- Cargas de viento: Pueden ser de succión o de presión. Suelen ser las cargas más importantes en estas estructuras en los lugares donde no suele nevar, al tener gran superficie sobre la que puede actuar el viento. Se dimensionan según los códigos de cada país.
- Acciones térmicas: Incrementos de temperatura provocan destensamientos de la misma manera que descensos provocan tensamientos.
- Acciones reológicas: Relajación del material a lo largo del tiempo (fluencia), pérdida de capacidad resistente por falta de recubrimiento u otras circunstancias.
- Acciones dinámicas: En ocasiones las cargas de viento pueden ser objeto de análisis dinámico dada su variabilidad.

Estas acciones suelen traducirse como cargas puntuales en los nudos de la malla discretizada.

## 1.5. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El campo de la arquitectura textil todavía es relativamente reciente, tanto para arquitectos como para ingenieros. Principalmente se debe a que en el pasado su presencia en el mundo de la construcción era casi anecdótico.

A medida que las herramientas informáticas avanzaban, el diseño y fabricación de este tipo de estructuras se hacía más presente en el mundo de la construcción. Ello se debe a su ambiguo carácter arquitectónico e ingenieril, su complejo cálculo y dimensionamiento y a la escasa presencia de fabricantes de los materiales membranales que las componen.

Debido a los programas de modelado 3D, de cálculo de elementos finitos y avances en el desarrollo de nuevos materiales su difusión es cada vez mayor.

Cada vez se ven en el mercado más programas de cálculo y modelado de estructuras tensadas. De la misma forma que su proceso de diseño, todos estos programas parten de una plataforma de modelado 3D en el que se definen los contornos y estructuras primarias (mástiles, perfiles o vigas de sujeción...) que servirán para que la estructura secundaria (membranas y cables) adquieran su forma y se fijen.

Gracias a la posibilidad de modelar prácticamente cualquier geometría que el diseñador quiera y el desarrollo de las diferentes técnicas de modelado por elementos finitos, se pueden llegar a proyectar una amplia variedad de estructuras que utilizan las membranas como medio material.

Entre ellos se pueden contar los *Tensairity* (en inglés: tension + air + integrity), también llamados estructuras neumáticas (Figura 10 y Figura 11), o las estructuras tensegríticas (Figura 12), como las más habituales hoy día, que en el pasado eran más complicadas de proyectar.



Figura 10 Pabellón hinchable. Estructura neumática



Figura 11 Vista desde el interior de la figura anterior

Fuente bibliográfica 4.4



Figura 12 Sistema de tensegrity que soporta una cubierta de colchones hinchados de ETFE

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura textil consistente en membranas y cables sobre mástiles.....	2
Figura 2 Tipos de entramados textiles más comunes: Simple y Panameño.....	4
Figura 3 Vista de la fibra de poliéster dentro de una lámina de PVC rota .....	5
Figura 4 Form Find de cubierta cónica arriostrada con cables radiales y perimetrales.....	6
Figura 5 Formas típicas de tensoestructuras anticlásticas .....	7
Figura 6 Ensayo a tracción de textil.....	10
Figura 7 Ensayo a tracción biaxial de textil .....	10
Figura 8 Estado de equilibrio de una membrana en el software ixForten4000 ..	13
Figura 9 Mesa medidora de coordenadas 3D .....	14
Figura 10 Pabellón hinchable. Estructura neumática.....	18
Figura 11 Vista desde el interior de la figura anterior .....	19
Figura 12 Sistema de tensegrity que soporta una cubierta de colchones hinchados de ETFE.....	19





## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Expresión analítica de la superficie tensada en todas direcciones	13
Ecuación 2 Equilibrio de los nodos en la dirección X.....	15
Ecuación 3 Distancia entre nodos .....	15
Ecuación 4 Forma simplificada de la ecuación 2.....	16

## 2. BIBLIOGRAFÍA

### 2.1.

GERAINT, John

1988

“Los deportes, dimensiones de los pisos deportivos y su equipamiento”. En BARBIERI, Aldo (autor y editor). *Arquitectura deportiva*. Edición 1988. Buenos Aires: CP67 Editorial, pp. 6-7.

### 2.2.

BARBIERI, Aldo

1988

*Arquitectura deportiva*. Edición 1988. Buenos Aires: CP67 Editorial.

Enseña las proporciones y otros aspectos importantes sobre la arquitectura deportiva, como son las gradas de los campos de fútbol y las cubiertas.

### 2.3.

DREW, Phillip

1979

*Fabric Investigations*. Edición 2013. University of Oregon.

### 2.4.

OTTO, Frei

1962

*Design, Structure and Calculation of Buildings of Cables, Nets and Membranes Volume II*. Edición 1973. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, EEUU. MIT Press.

### 2.5.

STRANGHÖNER, Natalie y UHLEMANN, Jörg

Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures. EUROCÓDIGO 2016.

Normativa europea en lo referente a las estructuras textiles. Tanto para el cálculo, como para el diseño y la puesta en obra.

### 2.6.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO DE PERÚ

NTE E.060 Concreto Armado.

2009

Normativa para el diseño de estructuras de concreto armado en Perú

### 2.7.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO DE PERÚ

NTE E.020 Cargas.

1985

Normativa para la definición de cargas en el cálculo estructural en Perú.

2.8.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO DE PERÚ  
NTE E.030 Diseño Sismorresistente.

2015

Normativa para el diseño y cálculo sismorresistente de estructuras en Perú.

2.9.

MINISTERIO DE FOMENTO DE ESPAÑA  
INSTRUCCIÓN DE ACERO ESTRUCTURAL (EAE)

2011

Normativa para el diseño y cálculo de estructuras metálicas en España.

2.10.

ESCRIG PALLARES, Félix y PÉREZ VALCÁRCEL, Juan

*Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas (I).*

Revista de Edificación N° 6. Junio de 1989. Universidad de Navarra.

2.11.

ESCRIG PALLARES, Félix y PÉREZ VALCÁRCEL, Juan

*Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas (II).*

Revista de Edificación N° 8. Diciembre de 1990. Universidad de Navarra.

2.12.

ESCRIG PALLARES, Félix y PÉREZ VALCÁRCEL, Juan

*Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas (III).*

Revista de Edificación N° 11. Mayo de 1992. Universidad de Navarra.

2.13.

McCORMAC, Jack C.

2008

*Structural Steel Design*. Edición 2008. Upper Saddle River, New Jersey, EEUU; Pearson  
Prentice Hall