

Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Arquitectura  
División de Estudios de Posgrado  
Programa de Especializaciones en Arquitectura y Urbanismo



# Estructura para Aviario de Cóndor

Trabajo Terminal para obtener el grado de Especialista en Cubiertas Ligeras

Presenta:

Martha Cecilia Godina Rodríguez

Tutor

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

Mexico, D.F. febrero, 2013

## **ESTRUCTURA PARA AVIARIO DE CÓNDR**

TRABAJO TERMINAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
ESPECIALISTA EN CUBIERTAS LIGERAS

MARTHA CECILIA GODINA RODRÍGUEZ

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE ARQUITECTURA DE LA UNAM

2013

DIRECTOR DE TRABAJO TERMINAL:  
DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS

SINODALES:  
DR. AGUSTÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ  
ARQ.ECL. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ  
ARQ. JUAN ANTONIO TONDA MAGALLÓN  
ARQ. JOSÉ LUIS RINCÓN MEDINA

## Dedicatoria

A Dios,  
Por darme salud, fuerzas, y entusiasmo para seguir adelante con mis estudios y permitirme concluir la especialización.

A mis padres Martha y Ramón,  
Porque siempre me han apoyado a cumplir mis sueños y han creído fielmente en mí. Y gracias a su ejemplo de fortaleza e inspiración para cuestionarme las cosas y querer hacer algo, me interesó seguir estudiando.

A mi hermano Ramón,  
Porque siempre aunque sea en la distancia estuvo a mi lado apoyándome. Y por ser el ejemplo de una persona emprendedora, trabajadora y honesta.

Muy especialmente a mi esposo Mau,  
Porque pacientemente siempre me apoyo, me ayudo y me guió con el trabajo, alentándome y confiando en mí en todo momento.

A mis maestros,  
A todos mis sinodales por darme su tiempo y opinión sobre el trabajo, en especial a mi tutor el Dr. Gerardo Oliva, por guiarme en el proyecto.

Al Prof. Ramon Sastre por proporcionarme el software WinTess3.

Al Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Arquitectura, UNAM, porque participando de becaria me permitió conocer más sobre las estructuras ligeras.

Al Departamento de Estructuras de la Facultad de Ingeniería, UNAM, por ayudarme a realizar las pruebas de laboratorio.



	Presentación	
		<b>Introducción 7</b>
	<b>Planteamiento del Problema</b>	<b>8</b>
		<b>Objetivo y Justificación 9</b>

---

	I.	Análisis Preliminar	
			<b>Análisis de Sitio 11</b>
	<b>Programa de Requerimientos de Proyecto</b>		<b>16</b>
			<b>Antecedentes 17</b>

		II.	Proyecto	
	<b>Descripción General del Proyecto</b>			<b>25</b>
			<b>Análisis de Materiales</b>	<b>31</b>
				<b>Análisis Estructural 34</b>
			<b>Detalles Constructivos</b>	<b>51</b>

---

	Conclusiones	<b>59</b>
	Referencias	<b>60</b>
	Anexos	<b>61</b>



## Introducción

Este trabajo es un proyecto que parte a raíz del interés en resolver espacialmente un aviario para cóndor con características particulares y presenta una solución con base a un sistema estructural ligero. El aviario, es un proyecto situado en la Sierra de San Pedro Mártir, en Baja California, y necesario para llevar a cabo el Proyecto Cóndor, el cual es un programa binacional entre México y Estados Unidos creado en 2002 por biólogos, trabajadores de campo, entidades gubernamentales y organizaciones dedicadas a la conservación del medio ambiente (Sociedad Zoológica de San Diego, INE, Conabio, CONAP, Semarnat, CISESE, SAGARPA). Tiene como objetivo principal reintegrar al cóndor en Baja California, ya que es una especie endémica que se encuentra en peligro de extinción.

El trabajo está desarrollado en dos partes. La primera constituye el análisis preliminar en donde se estudian las condiciones críticas del sitio, se establece el programa de requerimientos del proyecto y se analiza el estado del arte de los distintos aspectos que influyen en él. La segunda parte corresponde al desarrollo de la propuesta, el análisis de los materiales, en donde se estudió el comportamiento mecánico del material de la superficie y se sometió a pruebas de laboratorio para obtener datos específicos, y por último se realizó una aproximación del cálculo de las reacciones por método estático para la comprensión del comportamiento estructural de los sistemas estructurales ligeros. Así mismo, se realizó la comparativa de los resultados obtenidos con el software WinTess3, programa dedicado a la búsqueda de la forma, cálculo y patronaje de las tenso estructuras, desarrollado por el Prof. Ramon Sastre de la Universidad Politécnica de Cataluña.

De esta manera la propuesta pretende resolver la problemática planteando una solución eficiente estructuralmente, y viable en el aspecto económico y constructivo, factores necesarios para llevarse a cabo considerando los requerimientos de sustentabilidad actuales en la arquitectura.

Generalmente, este tipo de proyectos se desarrollan en tres partes: búsqueda de la forma, cálculo de la estructura y detalles constructivos (cimentaciones, anclajes, patronaje, etc.). El alcance de este trabajo será proponer la geometría de la superficie que envolverá el espacio de las aves mediante la búsqueda de la forma en el programa MPanel, estudiar el material de malla de nylon y probarlo a tracción para obtener los datos necesarios, y posteriormente, mediante el programa WinTess3 y cálculos manuales aproximados de un eje en específico, calcular el pretensado y determinar las reacciones en cada punto de anclaje. Este trabajo no abarcará el diseño de los elementos de anclaje, únicamente se enfocará a encontrar las fuerzas que actúan en la estructura para obtener las reacciones en cada punto de anclaje. El diseño de cimentaciones y anclajes a tracción se podrán realizar a futuro utilizando las reacciones obtenidas en este trabajo.

## Planteamiento del Problema

Se requieren 3 tipos de aviarios para llevar a cabo el proyecto cóndor de inicio a fin. El “aviario para reproducción”, el “aviario de climatización” y el “aviario de manejo”. Las necesidades de reproducción en cautiverio se llevan a cabo en Estados Unidos, contando actualmente con las instalaciones necesarias para ello. El “aviario de climatización” se localiza en la Sierra de San Pedro Mártir y su fin es entrenar al cóndor para que sea capaz de sobrevivir al momento de la liberación. Y el “aviario de manejo” servirá para poder albergar a todos los cóndores jóvenes que han sido liberados, en épocas de nevadas, durante incendios, así como, servir de refugio cuando se encuentren lesionados. Cada aviario tiene sus requerimientos específicos, y este proyecto se enfocará al “aviario de manejo”.

La propuesta de proyecto deberá basarse en una estructura ligera en cuanto a su masa; debe ser una solución factible económica y constructivamente; y eficaz estructuralmente, por lo tanto será necesario estudiar precisamente el comportamiento mecánico de los materiales a utilizar para poder encontrar la forma y sistema estructural adecuado.

## Objetivo y Justificación

El objetivo principal será diseñar la envolvente del aviario para albergar cóndores mediante la morfología geométrica en función del concepto de resistencia por forma y no por masa, dando respuesta a la necesidad de espacio que requieren los biólogos encargados de las aves para poder albergar a éstas cuando se requiera.

La importancia de dar respuesta a este tipo de proyectos con estructuras ligeras es esencial para diseñar y construir proyectos que se comprometan con el medio ambiente y traten de utilizar el mínimo de material para conseguir un ahorro considerable, y ello se logra con la lógica estructural en cada proyecto. Es necesario impulsar este tipo de estructuras ligeras, las cuales poseen todas las cualidades para generar arquitectura y estructuras de vanguardia, pues además de permitir que las fuerzas fluyan naturalmente, es posible mediante la forma, crear espacios arquitectónicos interesantes, en armonía, abiertos, ligeros y luminosos, sin la necesidad de disfrazar o sobreponer un ornamento para ocultar la estructura.

# Análisis Preliminar

## Análisis de Sitio

Para obtener un programa de requerimientos de proyecto, se tendrán que estudiar las condicionantes de diseño, aspectos que influyen para lograr un programa arquitectónico delimitado, que teóricamente resuelva todas las necesidades y restricciones del proyecto, como lo son: las dimensiones, el sitio, las condiciones climáticas, los materiales y el proceso constructivo.

### Dimensiones

El dimensionamiento del aviario, será de acuerdo a los requerimientos del personal de Proyecto Cóndor. Se manejarán claros de gran tamaño y alturas considerables para permitir el libre desplazamiento del cóndor dentro de la estructura para su comodidad, más no estará contemplando el espacio necesario para que planee dentro de él, pues el ave para poder planear grandes distancias como lo hace en la vida salvaje necesita de termas, que son corrientes de aire cálido ascendente. Sin embargo, es importante delimitar el espacio, puesto que las aves necesitan ser monitoreadas y no se debe rebasar el espacio óptimo sobre el cual se pueda tener control.

A la par se elaboró un estudio con base a las dimensiones del ave, el cuál con las alas abiertas llega a medir más de tres metros en un ejemplar adulto. Con este dato, se cuidará que no queden espacios muy pequeños donde pudieran atorarse las aves.

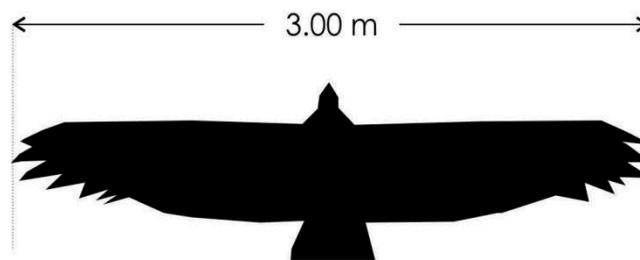


Fig. 1 Dimensiones de cóndor adulto con alas abiertas.

Se estudiaron las dimensiones de los aviarios que son utilizados en California, EUA, para el manejo de cóndor americano.

## Dimensiones de los aviarios que utilizan en California.

(Información tomada de un estudio acerca del comportamiento de los cóndores y proporcionada por Catalina Porras, Bióloga del Proyecto Cóndor).

### San Diego, Wild Animal Park

Tres corrales para cóndor, independientes pero en un mismo lugar, equipados con una alberca y zona para posarse. Cada uno de los tres corrales de madera son de 6.1 m x 12.2 m, con un máximo de altura de 6 m. Los corrales se encontraban en un terreno con pendiente.

Cuentan con otros dos corrales de las siguientes dimensiones:

24.4 m x 12.2 m x 6.1 m

3.0 m x 3.0 m x 3.0 m

### Ventana Wilderness Area

Ubicado en Monterey County, el corral para vuelo cuenta con las siguientes dimensiones:

12.2 m x 7.6 m con una altura máxima de 9.1 m

### Pinnacles National Monument

Ubicado en San Benito County, el corral para vuelo cuenta con las siguientes dimensiones:

15.8 m x 10.1 m, y una altura máxima de 6.1 m

### Hopper Mountain Wildlife Refuge Complex

Corral para vuelo de 9.1 m x 14.6 m x 6.1 m

Con respecto a las dimensiones del aviario en cuestión, los biólogos encargados del proyecto cóndor definieron el sitio de conveniencia y delimitaron el espacio en planta a partir de seis pinos que serán considerados dentro del espacio, para procurar que las aves interactúen con ellos y se familiaricen en un futuro cuando sean liberados.

El espacio considerado cubre un área de aproximadamente 800 m<sup>2</sup>, y analizando las alturas de los aviarios en California, se considerarán espacios con alturas libres de 7 m a 9 m, pues no es necesario que el aviario cubra la totalidad del pino de 25 m de alto.

## Sitio

El Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir es parte del municipio de Ensenada, y se encuentra ubicado en Baja California, México. La zona está situada en un área considerada con la mayor elevación en la península de Baja California, muy cerca del Observatorio Astronómico Nacional – UNAM. La región alberga gran cantidad de reservas botánicas y forestales, y cuenta con una fauna muy particular, como el cóndor de California. El sitio se encuentra dentro de una zona no turística, destinada únicamente a la rehabilitación del cóndor a su hábitat.

La vegetación en la zona está compuesta principalmente por: Manzanita (*Arctostaphylos pungens* y/o *Arctostaphylos glauca*), Abetos (*Abies concolor*), y Pinos (*Pinus Jeffreyi*). También cuenta con rocas de granito grandes con una altura de hasta 9 m aproximadamente.

Adicional a la información obtenida por los responsables del Proyecto Cóndor, se realizó una visita al sitio en la Sierra de San Pedro Mártir el 23 de julio de 2011, para realizar un levantamiento de la vegetación existente, las piedras de granito gigantes, y el terreno en general. Con ayuda de un GPS se tomaron las coordenadas de los seis pinos que delimitan el espacio para obtener la ubicación específica de cada uno y realizar la geometría de la estructura con medidas reales.



Imagen 1 Vista al centro de la zona destinada para el aviario, rodeada por piedras y pinos.



Imagen 3 Zona aviario proyecto: vista al pino del nodo C (ver fig. 2)

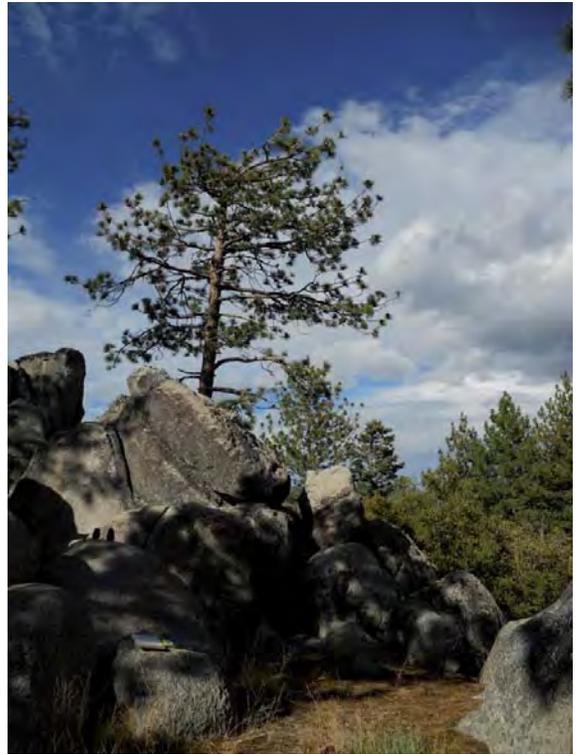


Imagen 2 Zona aviario proyecto: vista al pino del nodo B (ver fig. 2)



Imagen 5 Zona aviario actual: detalle de cables y parches en malla.

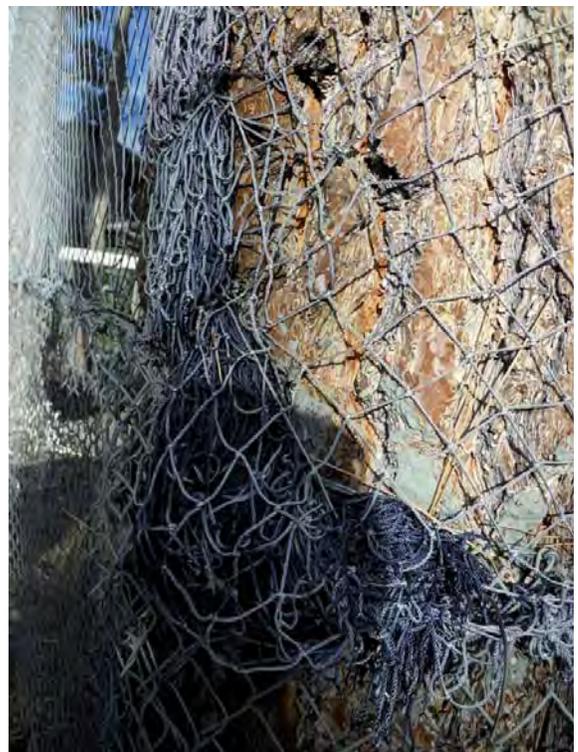


Imagen 4 Zona aviario actual: detalle de malla adosada a pino.

## Condiciones Climáticas

En el invierno en las partes altas de San Pedro Mártir las temperaturas son muy bajas, la temperatura media anual es de 7.3 °C; el mes más frío es marzo y promedia una temperatura de -1.5 °C y el mes más caliente es julio con un promedio de 16.3 °C (PCMPNSSPM, 2006).

Se realizó una investigación para obtener la acumulación de nieve, no se encontraron datos estadísticos, sin embargo, el Jefe del Observatorio Astronómico Nacional de la Sierra de San Pedro Mártir nos proporcionó la siguiente información: *Las nevadas pesadas típicas depositan 30-40 cm de nieve, a veces bastante mojada. Un invierno típico puede traer varias de estas tormentas. Las acumulaciones de tormentas muy fuertes pueden llegar a 1.5 m, pero son menos frecuentes, del orden de una cada varios años.*

## Materiales

La elección de los materiales de construcción juega un papel muy importante, pues es necesario que el aviario cuente con materiales que no perturben la estadía del cóndor y que al mismo tiempo cumplan con los requerimientos económicos y de durabilidad, evitando en lo posible el acero y el concreto, dejando estos materiales solo para el uso de conexiones, accesorios y cimentaciones.

Los materiales que se propone utilizar son: malla de nylon para la envolvente, conexiones de acero, cables de acero, y malla de acero para los primeros 2 m de altura, para evitar que los depredadores escarben y entren al aviario.

Para la superficie envolvente de doble curvatura se propone utilizar malla de nylon, pues debido a su ligereza no transmitirá cargas a los pinos por peso propio, sino únicamente por el pretensado que sea aplicado a la malla para estabilizarla. La capacidad de deformación le permitirá ser más flexible a los impactos que pueda recibir por factores externos.

## Proceso Constructivo

Debido a que la zona, es un lugar de difícil acceso y muestra un suelo irregular, lo ideal será elaborar todos los elementos prefabricados, para únicamente transportar y montar en sitio. Solamente la cimentación será planeada para trazar y colar en sitio, para verificar que los niveles queden exactamente como estén proyectados.

La estructura del aviario tendrá que considerar una larga vida útil y de mantenimiento bajo o casi nulo, para evitar posteriormente la interrupción del uso del aviario por periodos de construcción o mantenimiento. Así como, evitar el traslado de maquinaria, equipo de mantenimiento y/o materiales de construcción, ya que la ubicación de la zona del proyecto se encuentra en una área poco accesible y de terreno montañoso, siendo de gran dificultad el acceso a ella, por lo cual lo ideal sería tener esa necesidad solo una vez, al momento de la construcción del mismo.

## Programa de Requerimientos de Proyecto

Se tomarán en cuenta dentro del programa de requerimientos únicamente los relacionados con la tenso estructura, pues existen espacios como almacén, área de monitoreo y estanque para aves que son necesarios pero no se incluirán en este trabajo, sin embargo, como son independientes de la estructura envolvente podrán ser considerados en un futuro, como una segunda etapa del proyecto real.

Considerando las dimensiones de los aviarios analizados, es importante establecer los límites dentro del área en la que se desplazarán las aves para facilitar el monitoreo, sin embargo, es importante permitir que el ave no se sienta atrapada en un espacio pequeño.

### Dimensiones

El área, así como, el sitio en específico, fue estudiada y elegida por los biólogos del proyecto. Dentro del sitio se ubican 6 pinos para que las aves puedan estar en contacto con la vegetación del sitio y descansar en sus ramas. Este espacio fue elegido debido a que se encuentra en pendiente hacia una zona donde se producen corrientes de viento (oriente), las cuales les permitirá a las aves desplazarse más fácilmente aprovechando el aire.

**-Área en planta:** 785.00 m<sup>2</sup>

**-Altura libre:** 9.1 m

**-Cercos perimetral de Multimalla Galvanizada** (para protección contra depredadores).

**Altura:** 2 m a partir de nivel de terreno

**Profundidad:** 1.5 m a partir de nivel de terreno

### Condicionantes

Ningún elemento estructural deberá quedar dentro del espacio útil del aviario (para evitar que las aves se familiaricen con elementos artificiales, como el acero).

## Antecedentes

Para el análisis de casos análogos en esta investigación se consideraron tres proyectos de estructuras ligeras de aviarios: aviario de Munich, aviario Wilhelma y aviario de Youde en Hong Kong. Adicional a éstos, se consideró agregar el proyecto del Aeropuerto Internacional de Denver, por su similitud en cuanto a la morfología estructural del proyecto. Así mismo, al final de esta sección se mencionarán algunos softwares que se utilizan actualmente para resolver este tipo de estructuras, y de los cuales algunos de ellos fueron utilizados posteriormente en este trabajo.

### Aviario de Munich

El proyecto es una estructura ligera, con superficie de doble curvatura inversa de malla de acero y soportada en puntos altos mediante mástiles de acero. El Arq. Jorg Gribl encargado del proyecto, junto con el Arq. Frei Otto responsable de la búsqueda de la forma, y Buro Happold de la ingeniería de diseño, fueron los que dieron vida a esta tenso estructura en 1980, la cual cuenta con una superficie de 4500 m<sup>2</sup> en planta.

El proyecto inicial se basaba en el concepto de una malla colgante sobre una red de cables descansando sobre mástiles. Sin embargo, debido a las grandes nevadas que se presentan en Alemania, se optó por diseñar una estructura con superficie de doble curvatura inversa, a base de malla de acero ondulado. Para ello se realizó en el taller de Frei Otto una maqueta a escala 1:100, para estudiar las posiciones de los mástiles, la inclinación de los muros y la superficie curva.

El análisis de pretensado lo llevó a cabo el Dr. Michael Barnes y arrojó una carga máxima en el mástil central de 76 ton, y sobre este valor se determinaron las dimensiones del mástil y las fuerzas en los anclajes. Debido a que las deformaciones por carga de nieve eran bastante altas, se requería que los puntos altos de la malla tuvieran flexibilidad para dar de sí y permitir que se deforme toda la estructura sin colapsar. Frei Otto sugirió el uso de un sistema pantógrafo, denominado así por su geometría, para los miembros de soporte de malla.



Imagen 7 Detalle superior de m6stil y sistema pant6grafo.

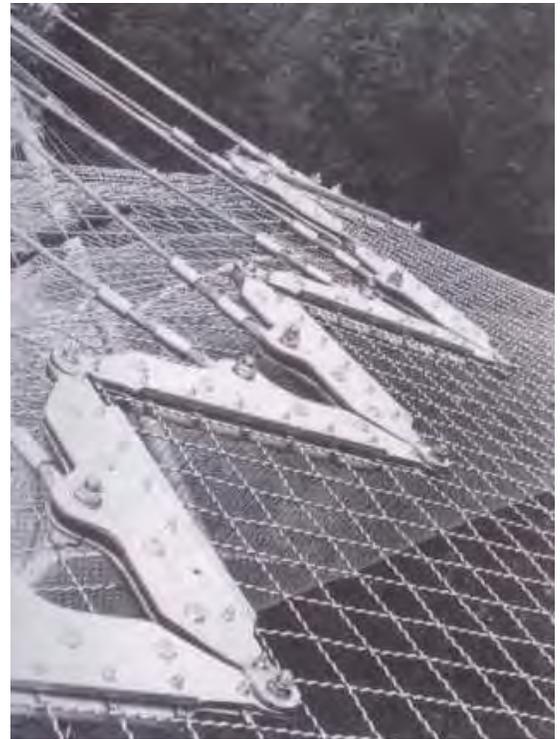


Imagen 6 Detalle de sistema pant6grafo

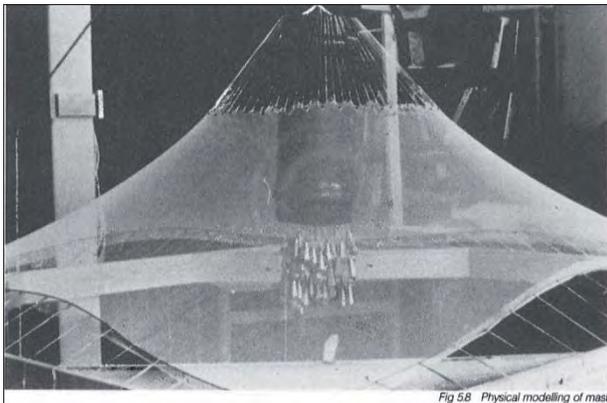


Imagen 8 Detalle de maqueta a escala de Frei Otto.

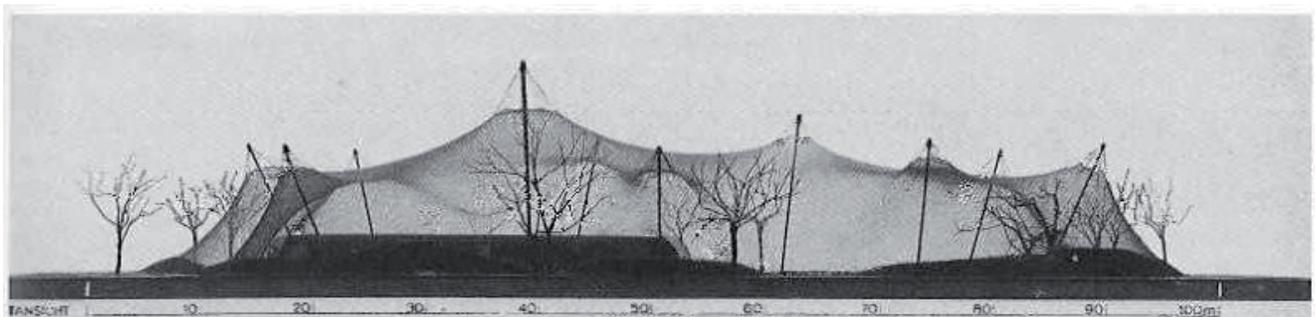


Imagen 9 Detalle de maqueta a escala 1:100.

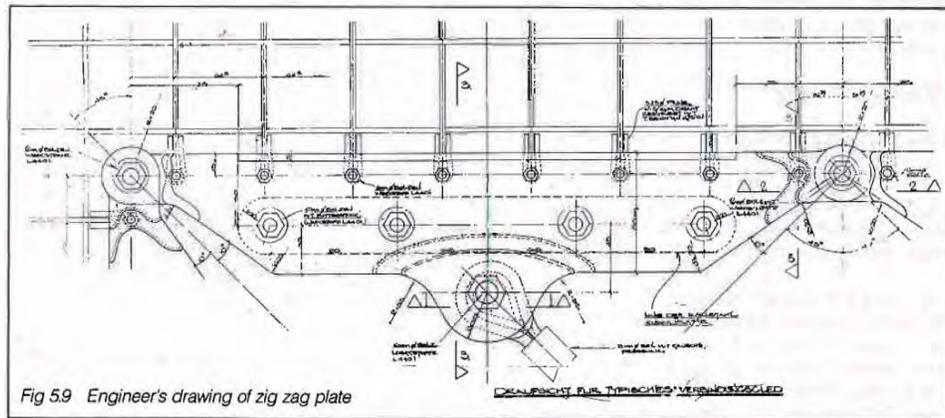


Imagen 10 Detalle de sistema pantógrafo.



Imagen 11 Aviarío en tormenta de nevada.



Imagen 12 Vista de aviario mostrando superficie de doble curvatura inversa.

## Aviario Wilhelma

Como parte de la "International Garden Exhibition" en 1993 los arquitectos Auer + Weber, junto a la firma estructural Mayr + Ludescher, ambos de Alemania, diseñaron un aviario para el zoológico de Stuttgart reduciendo al mínimo los elementos de construcción y permitiendo a los visitantes el contemplar a las aves en su ambiente natural, respetando al mismo tiempo los árboles existentes en la zona. Varias especies de aves están albergados en doce espacios individuales, cada una adjunta al edificio. La envolvente del aviario que cubre 3,500 pies cuadrados, es a base de una malla metálica de cable, la cual está cubierta con una malla aún más fina.



Imagen 16 Detalle de punta de anclaje.



Imagen 13 Detalle de poste y cables.



Imagen 14 Detalle de poste cable

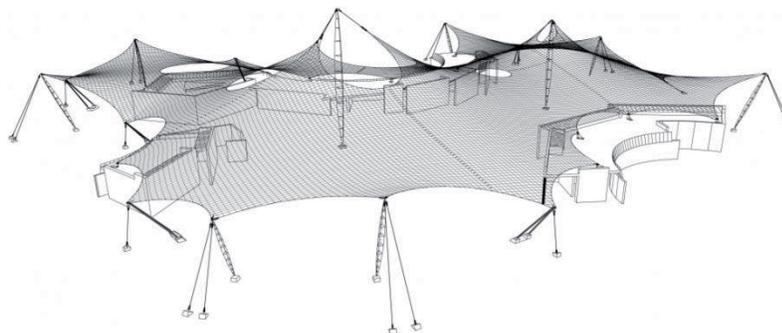


Imagen 15 Isométrico de la estructura

## Aviario Youde en Hong Kong

Diseñado por Wong Tung and Partners y el despacho de ingenieros Arup, en 1991. El concepto de la envolvente se basó en respetar a los árboles existentes. Para poder librar los grandes claros y la altura, se fabricaron arcos huecos de sección circular de acero laminado. El claro mayor, de 62 m de longitud y 19 m de altura, cuenta con una sección de 560 mm de diámetro. Los arcos están estabilizados por la doble curvatura de la malla de acero galvanizado de 12 mm, la cual cubre un área de 4,100 m<sup>2</sup> para envolver completamente el aviario.



Imagen 18 Vista aérea de aviario.

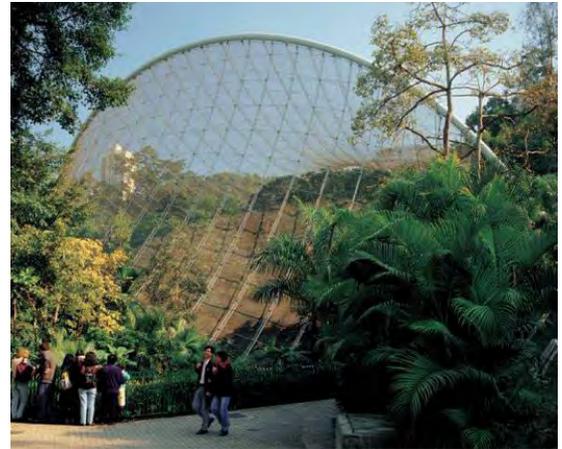


Imagen 17 Vista en perspectiva de un extremo



Imagen 19 Vista aérea de arco de acero.

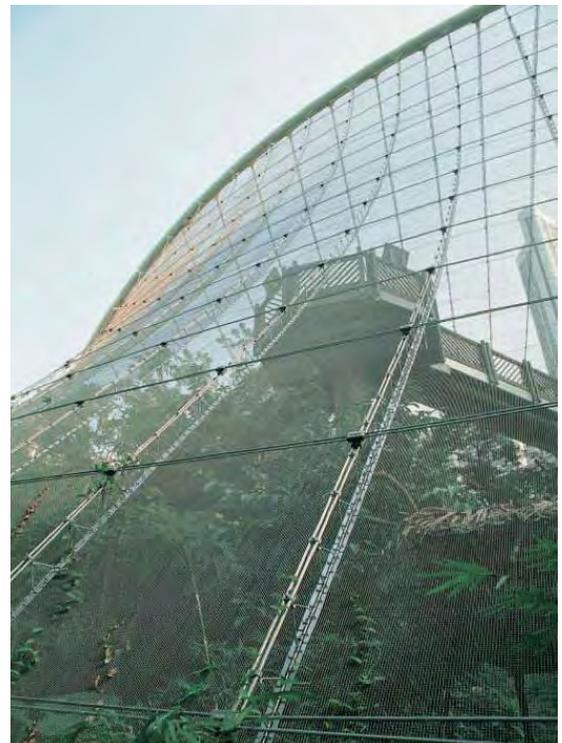


Imagen 20 Detalle de malla en uno de los extremos.

## Aeropuerto Internacional de Denver

Este proyecto de arquitectura textil proyectado por Horst Berger, fue terminado en 2004. Cubre un 6rea de 370 m x 73 m aproximadamente y fue construido por la empresa Birdair. Es una estructura de valles y crestas a base de un sistema de cables, doble capa de membrana PTFE para asegurar el confort interior debido a las condiciones clim6ticas de Denver y 34 columnas interiores.



Imagen 21 Vista exterior de la cubierta.

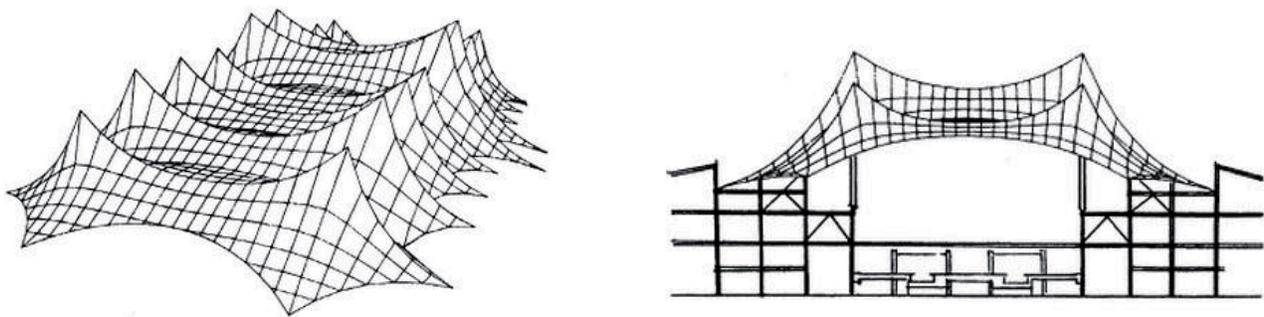


Imagen 22 Esquemas de membrana en isom6trico y corte.

## Software especializado para estructuras ligeras

Actualmente existe una gran variedad de software para búsqueda de la forma, cálculo y patronaje. Algunos programas son más sofisticados que otros, unos abarcan únicamente la parte de búsqueda de la forma y otros el paquete completo. Esta es una lista de algunos de ellos:

Easy – Búsqueda de la forma, cálculo y patronaje

MPanel – Búsqueda de la forma, cálculo y patronaje

WinTess3 – Búsqueda de la forma, cálculo y patronaje

Formfinder – Programa de diseño fácil de operar

Sofistik – Búsqueda de la forma, cálculo y patronaje

ixForten – Búsqueda de la forma, cálculo y patronaje

Membrane 24 – Búsqueda de la forma

FerrariSketch – Búsqueda de la forma, Sketchup plugin

Soap Skin Bubble – Búsqueda de la forma, Sketchup plugin

Proyecto

---

## Descripción General del Proyecto

En relación al estudio preliminar del sitio, el análisis de los antecedentes, y los requerimientos particulares del proyecto, la solución que se plantea, está basada en un sistema estructural ligero. Al analizar el sitio y la necesidad de envolver dentro del espacio a los pinos de la zona hasta un determinado nivel, se llegó a la conclusión de que la búsqueda de la forma se tendrá que realizar en torno a ellos.

El concepto de la propuesta radica en generar una estructura basada en una red de cables, configurada de tal manera para dar forma a seis conos irregulares unidos entre sí, donde el tronco de cada pino pasará a través del anillo de cúspide de cada cono. La continuidad que se genera al unir la geometría de cada uno de los conos por medio de los cables, permite que toda la estructura trabaje en conjunto como un diafragma, donde los esfuerzos pueden fluir libremente. La superficie del espacio se delimitará con malla de nylon traccionada a través de los cables que generan la geometría, la cual por su condición de cono, permitirá fácilmente crear la doble curvatura.

Los elementos de soporte en la parte superior de cada cono, serán los pinos. Se colocarán unos sistemas de sujeción para recibir la malla de nylon correspondiente al anillo de cúspide de cada cono, este sistema se adosará al pino por medio de una abrazadera de placa de acero y neopreno. Como sistema alterno, se colocarán dos cintas de polímero desde cada sistema de sujeción hasta la parte superior del pino, para que en caso de falla de alguno de ellos, la estructura no colapse y el sistema de sujeción quede suspendido hasta que se le repare. Los sistemas de anclajes en la parte inferior se ubicarán en cada uno de los vértices de los conos, donde se recibirán todos los esfuerzos a tracción generados por la estructura.

La superficie fue generada en el programa MPanel, se creó cada uno de los conos por separado, en relación a la ubicación de cada pino y después se unieron todas las mallas generadas para dar continuidad a la superficie y permitir que las tracciones en todos los sentidos no se vean truncadas por un cambio de geometría.

Para evitar que en la parte superior entre la unión de cuatro conos cualquiera se generarán superficies planas, se colocaron cables de acero en forma de catenaria entre cada dos pinos para ayudar a generar la doble curvatura inversa y llevar las fuerzas hasta la cimentación.

En la parte inferior de la superficie se colocarán las relingas de cable de acero para recibir las fuerzas en todo el perímetro y mandarlas hacia todos los puntos de anclaje en el terreno.

Y finalmente, los cables secundarios son los que generan la superficie de los conos desde la cúspide del cono hasta cada uno de los vértices en la parte inferior, así como, los 3 arcos de catenaria que fueron geometrizados en la malla para generar la forma de cono a cono. Estos cables, además de facilitar el control de la superficie durante el montaje, ayudarán a distribuir equilibradamente los esfuerzos hasta cada punto de anclaje.

En general, la propuesta cumple con todos los requerimientos y condicionantes del proyecto: una estructura ligera, económica y viable, en donde las fuerzas fluyen de manera natural y la cantidad de recursos materiales se ve reducida al mínimo.

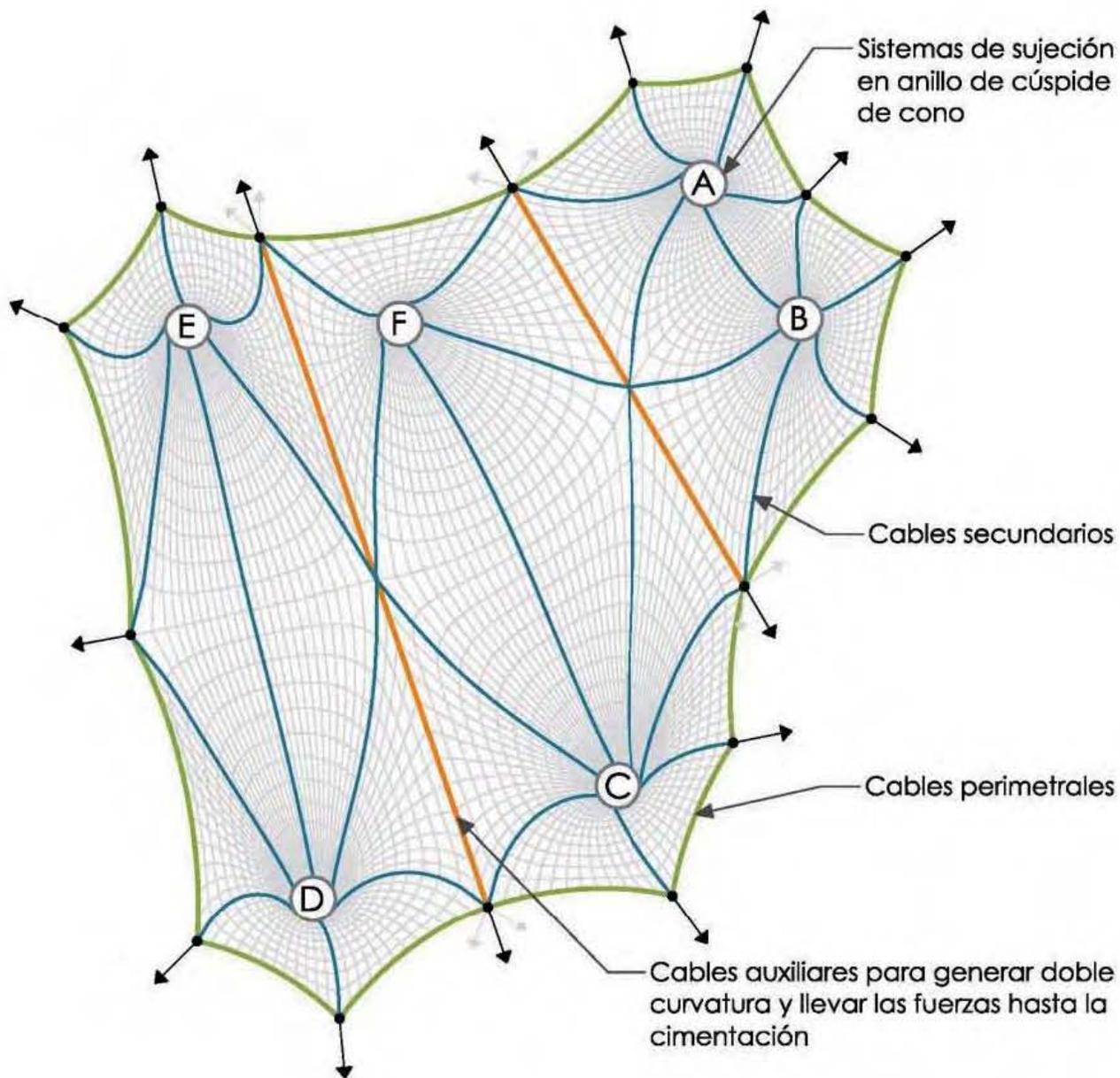


Fig. 2 Diagrama de red de cables para formar superficie, y dirección de reacciones en anclajes inferiores.

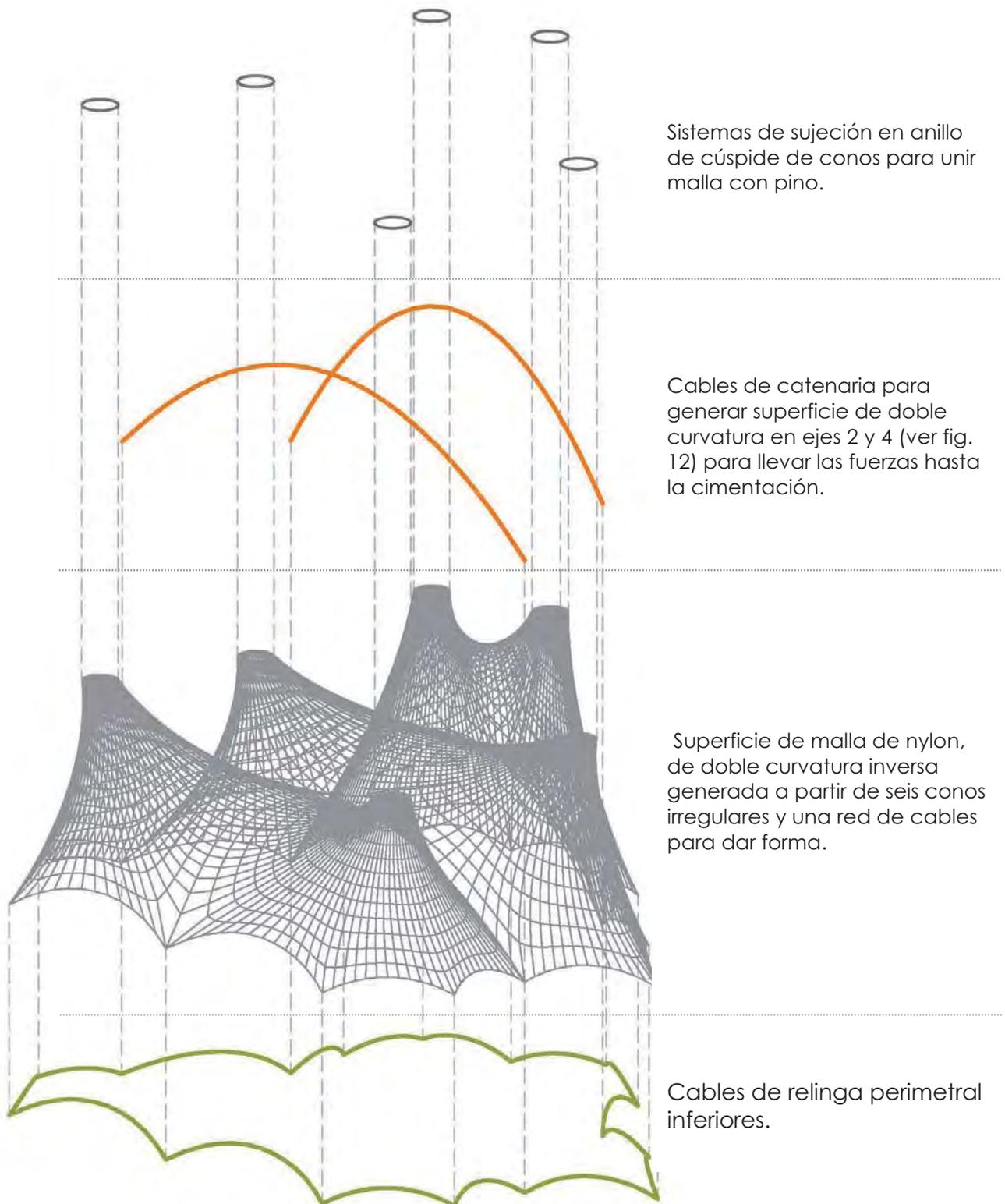
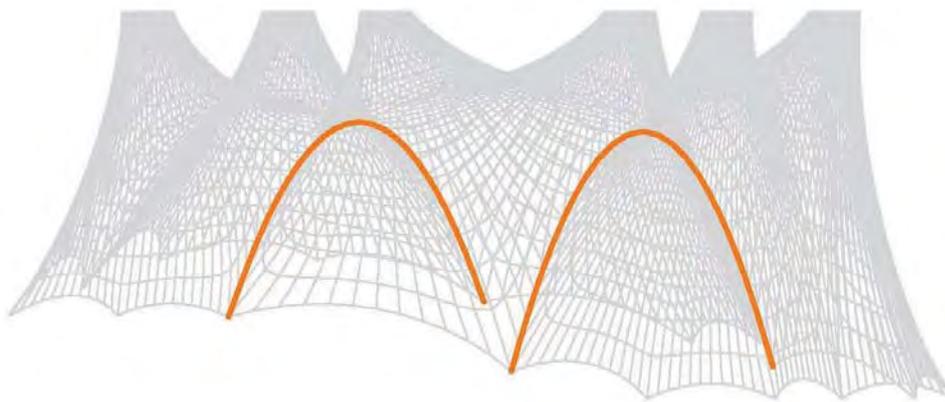
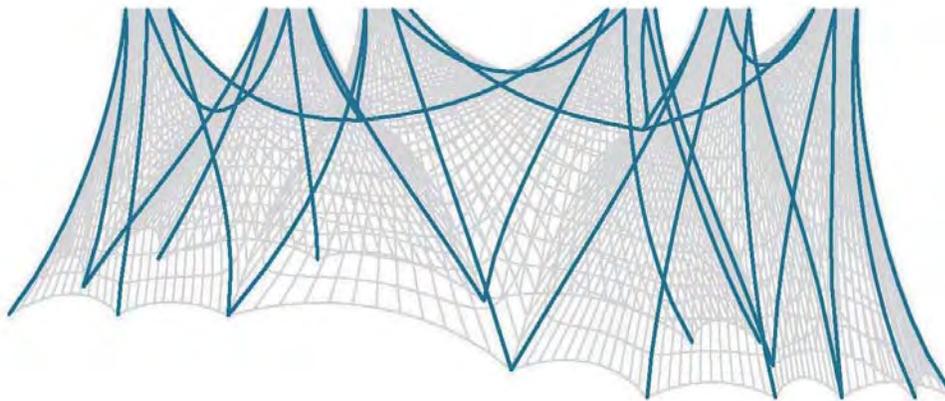


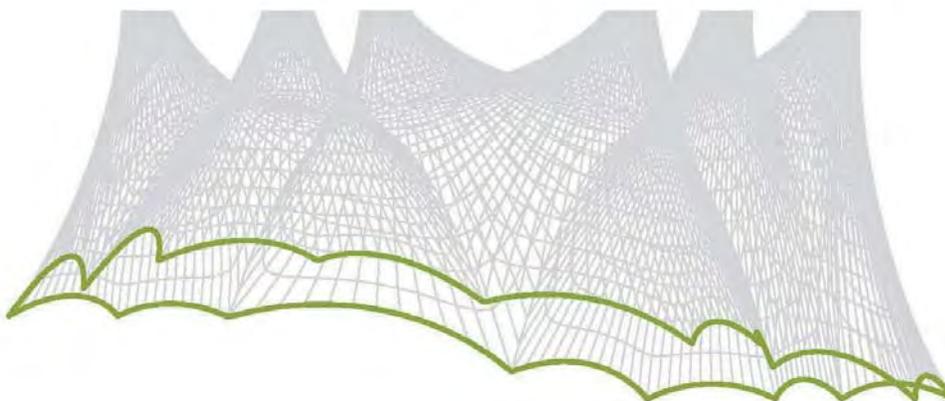
Fig. 3 Elementos principales que constituyen el sistema estructural.



Cables a tracci3n de catenaria invertida para favorecer pretensado y distribuir las cargas.



Red de cables auxiliares, para generar forma. Los cables de cono a cono tambi6n fueron trazados con curva catenaria.



Cambios de nivel en per6metro inferior debido a topograf6a de terreno.

Fig. 4 Elevaciones de malla con sus diferentes componentes de cables

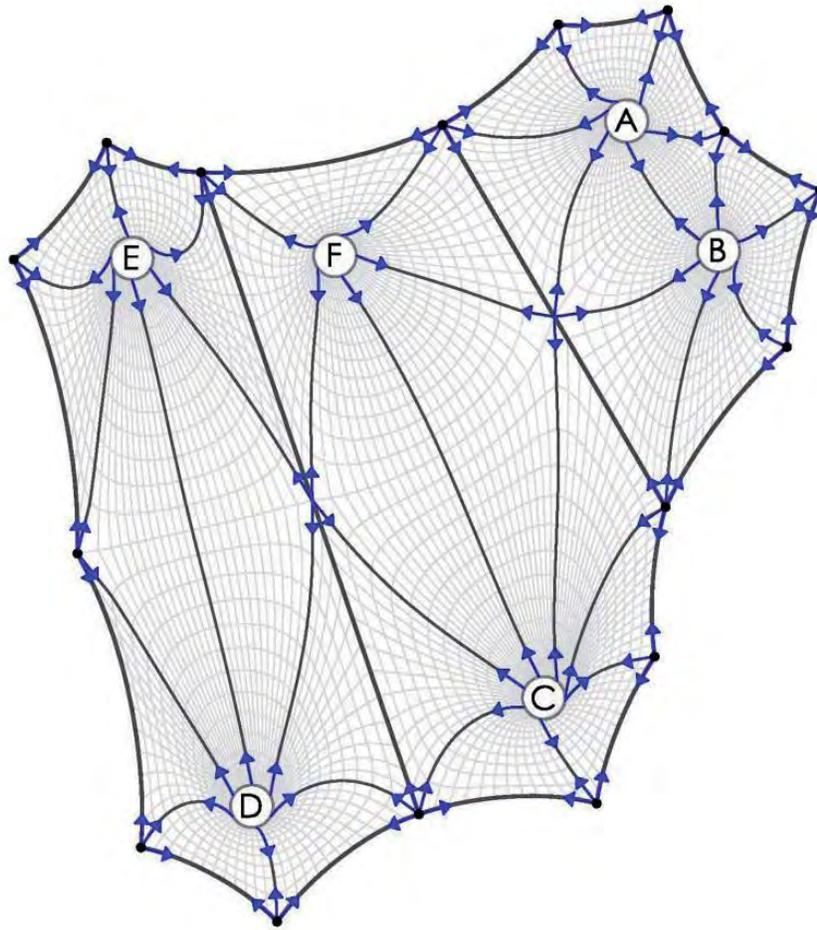


Fig. 5 Diagrama de fuerzas en cables.

El diagrama de la fig. 5 muestra como la tenso estructura trabaja únicamente a tracción, las fuerzas se encuentran distribuidas entre cada uno de los mantos que componen los conos. Las tracciones se generan tanto en la parte superior como en la inferior de la estructura. Para mantener la estabilidad en la parte superior de los sistemas de sujeción de malla a pino, se distribuyen todos los esfuerzos generados alrededor de los 360° del anillo de cúspide.

## Sistema de sujeción de malla a pinos

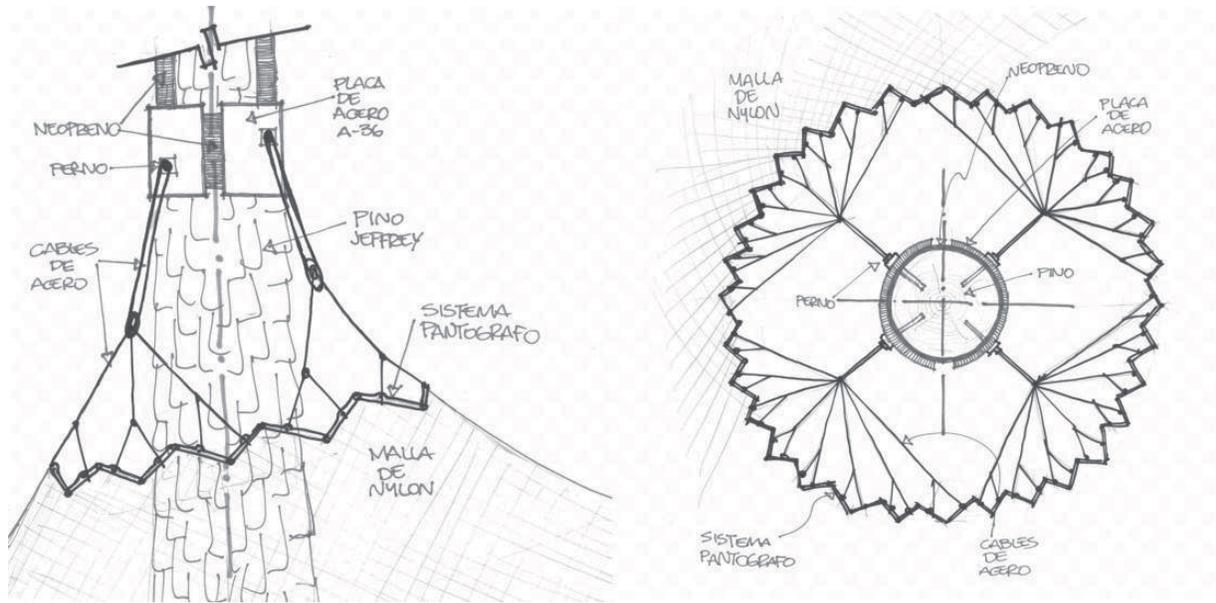


Fig. 6 Esquema conceptual de sistema de sujeción de nodo en planta y elevación.

### Pantógrafo

Área = 0.04 m<sup>2</sup>

Espesor= 0.0127 m

Cantidad= 24

$V = 0.04 \text{ m}^2 \times 0.0127 \text{ m} = 0.000508 \text{ m}^3$

$V_{\text{total}} = 0.000508 \text{ m}^3 \times 24 = 0.012 \text{ m}^3$

Peso = 0.012 m<sup>3</sup> x 7850 kg/m<sup>3</sup> = **94.2 kg**

### Cable 22 mm diámetro

Longitud total del cable=

2.60 m x 4= 10.4 m

Peso= 1.96 kg x 10.4 m = **20.38 kg**

### Placa de acero

Espesor= 0.0127 m

Perímetro= 3.2 m

Altura= 1.00 m

$V = 0.0127 \text{ m} \times 3.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} = 0.041 \text{ m}^3$

Peso= 0.041m<sup>3</sup> x 7850 kg/m<sup>3</sup>= **321.85 kg**

### Neopreno

Espesor= 0.0254 m

Perímetro= 3.3 m

Altura= 0.90 m

$V = 0.0254 \text{ m} \times 3.3 \text{ m} \times 0.90 \text{ m} = 0.075 \text{ m}^3$

Peso=0.075 m<sup>3</sup> x 80 kg/m<sup>3</sup>= **6 kg**

SUMA TOTAL DE PESO DE SISTEMA:

Pantógrafo =94.2 kg

Cable 22 mm diámetro= 20.38 kg

Placa de acero= 321.85 kg

Neopreno=6 kg

**TOTAL= 442.43 kg**

## Análisis de Materiales

### Malla de nylon

#### **Especificaciones de red M-1250BK-BD Black HTPP (Marca Incord)**

Estilo: Redes sin nudos

FIBRA	High Tenacity, Polypropylene (HTPP)
DIÁMETRO DEL CORDÓN	1/8" (3 mm)
DIMENSIÓN DE LA MALLA	2" (50 mm) abertura cuadrada
PUNTO DE RUPTURA	280 lbf (1.25 kN)
	0.0303 lb/ft <sup>2</sup> (148 g/m <sup>2</sup> )
PUNTO DE FUNDICIÓN	320°F (160°C)
UV	Extra UV estabilizadores
COLOR	Negro, revestido de látex



Fuente: [www.incord.com](http://www.incord.com)

M-1250BK-BD unido con latex es una malla sin nudos, formada con hilos a cada 5 cm. Los nudos son eliminados mediante la unión de la malla con el tejido de los hilos continuamente a lo largo de la malla para mejorar la fuerza y la durabilidad. HTPP es una fibra ligera altamente resistente a la abrasión, a la humedad y a los productos químicos. M-1250BK-BD tiene un revestimiento de latex, el cual aporta más cuerpo y rigidez a la malla.

Se propone utilizar esta malla de nylon para la construcción del aviario puesto que tiene una certificación de prueba de impacto ANSI A10.11-2010, la cual consiste en instalar la malla horizontalmente con medidas de 5.18 m x 7.32 m (17' x 24') en un marco de pruebas, en la cual se somete 3 veces a la caída libre de un peso de 159 kg (350 lbs), desde una altura de 2.74 m (9') para obtener un total de 4270 Nm (3150 ft-lb) por caída, sin deformación permanente en la malla. Estas pruebas se realizan generalmente para redes de escombros utilizadas en la construcción y en demoliciones, por lo tanto se considera que aparte de soportar las tracciones a las que estará sometida, la malla soportará el impacto de alguna rama de los pinos que pudiera caer sobre ella, sin que esta falle. Así mismo, al tener un alto porcentaje de deformación permite que la malla se deforme y vuelva a su estado inicial al desaparecer la fuerza aplicada (en este caso el escombro). En el aviario de climatización (ver imagen 4 y 5) se utilizó para su construcción red de nylon atunera.

Con el apoyo del Departamento de Estructuras, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se realizaron pruebas a tracción de la malla propuesta (M-1250BK-BD Black HTPP), para obtener la gráfica carga-deformación. Las pruebas se realizaron en 3 sentidos de la malla.

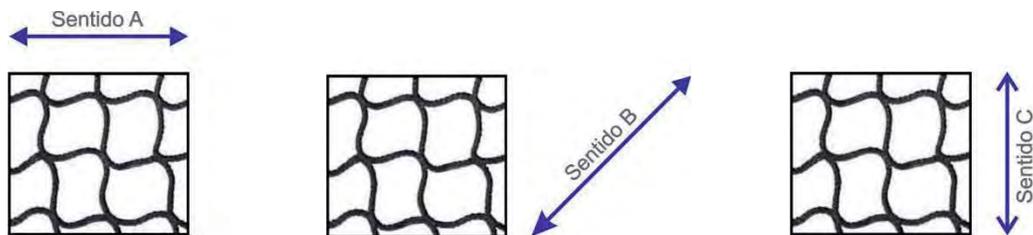


Fig. 7 Dirección de las fuerzas aplicadas en las pruebas a tracción realizadas en la malla. Sentido A a 0°. Sentido B a 45°. Sentido C a 90°.

En general las pruebas mostraron resultados similares en los sentidos A y C, por lo que se optó por realizar una sola gráfica carga-deformación en el sentido ortogonal a la malla. En el sentido B, la fuerza aplicada tiene una orientación a 45° con respecto a la malla, en este caso las deformaciones eran mayores, por lo que se optó realizar otra gráfica carga-deformación en ese sentido.

### Multimalla Galvanizada 5 x 10

Se propone utilizar multimalla galvanizada de 5x10 cm debido a que en la experiencia de construcción de aviarios para cóndor esta medida resultó bastante óptima pues ningún ave se había atorado en una malla rectangular con estas proporciones, como se daba en el caso de la malla ciclónica en donde las aves atoraban sus garras. (Gual Sill, 2011)

Tabla 1 Descripción de Multimalla Galvanizada.

Artículo	Peso teórico (kg)	Calibre de alambre	Abertura en cm	Longitud (m)
Multimalla galvanizada C-14 5x10 1.22 x 20 ml	15	14	5x10	20

Fuente: global aceros. [www.saapsa.com.mx](http://www.saapsa.com.mx)

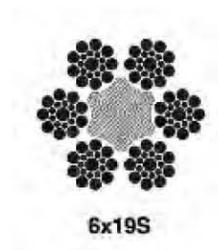
## Cables de acero inoxidable

Datos tomados de Camesa

([www.camesa.com.mx/Es/product-catalog/Barracuda-Cable-Clase-6x19](http://www.camesa.com.mx/Es/product-catalog/Barracuda-Cable-Clase-6x19))

Tabla 2 Resistencias a la tensión y pesos (milímetros)

Diámetro (mm)	Peso Aproximado (kg/m)	Resistencia a la Ruptura (Toneladas Metricas)	
		Arado Mejorado	Arado Extramejorado
6.35	0.18	2.7	3.1
7.94	0.27	4.1	4.8
9.53	0.39	6.0	6.9
11.2	0.52	8.1	9.2
13	0.68	10.4	12.1
14.5	0.88	13.2	15.2
16	1.07	16.2	18.7
19	1.55	23.2	26.7
22	2.11	31.4	36.1
26	2.75	40.7	46.9
29	3.48	51.3	59.0
32	4.30	63.0	72.5
35	5.21	75.7	87.1
38	6.19	89.7	103.0
42	7.26	104.0	120.0
45	8.44	121.0	139.0
48	9.67	138.0	158.0
52	11.0	156.0	180.0
Normas de Referencia: ASTM-A-1-23; API 9A			



## Análisis Estructural

Actualmente, los análisis de las tenso estructuras se realizan a través de software especializado, sin embargo, muchas veces no es posible tener a la mano algún programa y debemos de recurrir a métodos de cálculo manuales para obtener una aproximación de los esfuerzos a los que estará sometida la superficie de membrana o malla, y a las cargas en los puntos de tracción con las que estará trabajando la estructura. Esto, con el fin de obtener una idea de las cargas de nuestro diseño y trabajar dentro del rango que nos convenga, pues en base a los resultados se diseñará cada uno de los puntos de anclaje. Sin embargo, es posible realizar el cálculo a mano de un proyecto pequeño y obtener resultados confiables, al igual que un proyecto a gran escala, pero sin duda alguna, para estos últimos lo mejor es analizar el proyecto en un programa especializado, pues generalmente son superficies muy complejas que dificultan el proceso de cálculo manual de toda la estructura.

Anteriormente, este tipo de estructuras, debido a la falta de software especializado, resultaban muy complicadas, tanto en el proceso de obtención de la forma, como en el proceso de cálculo. Para obtener la forma, se realizaba una maqueta a escala y se ubicaban las coordenadas de cada punto de una curva, hasta obtener una serie de datos de coordenadas de cada una de las curvas principales del proyecto. También se realizaban modelos con pompas de jabón para encontrar la superficie mínima. Actualmente los modelos a escala se siguen utilizando en este tipo de estructuras, pero generalmente se crean para visualizar y estudiar en tercera dimensión el diseño y configuración del espacio y de la estructura, pues el diseño y geometría de las curvas se puede generar fácilmente en los programas especializados.

En este capítulo se analizará la estructura en el programa WinTess3, y a su vez se calculará uno de los ejes manualmente para comparar los resultados de las reacciones obtenidas. El primer paso, será recopilar todos los datos necesarios para realizar el cálculo. Para ello se analizarán las cargas muertas y las cargas vivas, donde el principal factor que afectará a la estructura será la carga de nieve. Así mismo se le sumará el valor de pretensado que se le aplicará a la superficie. En este caso, fue necesario realizar pruebas a tracción de la malla de nylon en el Departamento de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para elaborar gráficas "carga-deformación" de la malla, y obtener el valor de pretensado a aplicar en la superficie, así como, el módulo de elasticidad a utilizar en el programa WinTess3. Un paso posterior, sería el diseñar cada uno de los elementos que soportarán esas cargas, sin embargo, para fines de este trabajo, el alcance será únicamente obtener las reacciones.

## Nieve

Para obtener el valor a utilizar por carga de nieve, se debe tomar en cuenta la permeabilidad de la superficie, el terreno donde se ubica, la meteorología local, y todo ello en función de la forma de la cubierta o superficie que contenga el espacio. Se analizaron los factores tomados en cuenta en el caso análogo del aviario de Munich en Alemania. Los datos estadísticos del clima, mostraban que una de las peores nevadas con duración de 24 horas, acumulaba 35 cm de nieve con una densidad aproximada de  $150 \text{ kg/m}^3$ . Se consideró que únicamente dos tercios de la nieve que cae sobre la superficie de doble curvatura se quedará sobre la malla y el tercio restante se deslizará o traspasará la malla debido a la inclinación y a la permeabilidad respectivamente, hasta caer al piso. Tomando en cuenta estos factores, resultó una carga de  $35 \text{ kg/m}^2$ , sin embargo, considerando el peso propio de la malla (en este caso de acero) los ingenieros encargados del proyecto acordaron realizar el análisis con una carga de nieve de  $40 \text{ kg/m}^2$ .

Con base en lo anterior, y considerando el rango más alto de una nevada típica en la Sierra de San Pedro Mártir de 40 cm de nieve, se tomará para el análisis un total de carga de nieve de  $40 \text{ kg/m}^2$ . En este caso el peso de la malla, que es prácticamente despreciable, se tomará en cuenta dentro de la carga muerta, así que este valor corresponderá únicamente a la nieve.

$$\begin{aligned}
 40 \text{ cm de acumulación de nieve en } 1 \text{ m}^2 &= 0.40 \text{ m}^3 \\
 \text{Densidad de la nieve} &= 150 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Peso de la nieve en } 1 \text{ m}^2 &= 60 \text{ kg} \\
 \text{Considerando que } 1/3 \text{ de la nieve se} \\
 \text{desliza} &= 40 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

**Carga a considerar por nieve =  $40 \text{ kg/m}^2$**

Cabe mencionar, que dentro de las estructuras ligeras, las condiciones de cargas externas por viento, son consideradas un factor muy importante, ya que generalmente se pueden presentar succiones muy grandes. Sin embargo, en este caso no se aplicará ninguna carga adicional correspondiente al viento, por las siguientes consideraciones:

Existen tres posibles combinaciones de carga a tener en cuenta para las cargas externas que se pudieran presentar en la estructura, las cuales dependen de las condiciones ambientales. En la primera, se presentará una capa de nieve uniformemente distribuida en función a la forma de la superficie, donde exista un ambiente de calma sin viento o con muy poco viento. En este caso los  $40 \text{ kg/m}^2$  serán suficientes para soportar las cargas externas. En la segunda combinación se presentarán simultáneamente las cargas de nieve y viento, esta quizás pudiera parecer el peor escenario, pero debido a la permeabilidad de la malla, es posible que el viento favorezca la caída de la nieve, pues ayudará a que no permanezca pegada a los hilos de la malla ayudándola a deslizarse o caerse y automáticamente disminuirá el valor de la carga que se pudiera generar por nieve. Esto es únicamente una suposición, y es importante considerarlo, aunque lo ideal en todo caso sería calcular el proyecto con esta combinación de cargas al mismo tiempo. La tercera combinación posible no incluye nieve, será cuando se presente solamente el viento. En este caso el valor

a utilizar de  $40 \text{ kg/m}^2$ , obtenido para la carga de nieve es suficiente para soportar las cargas externas que se pudieran presentar por viento.

Para el proyecto del aviario, se calculará únicamente con la carga de nieve de  $40 \text{ kg/m}^2$  tanto en el programa WinTess3, como en el cálculo manual.

## Pretensado

Para obtener el valor de pretensado a aplicar en la superficie de la malla, es necesario conocer las propiedades del material y la capacidad de deformación del mismo. El pretensado de una estructura ligera de malla o membrana va directamente ligado con el comportamiento estructural, pues a través del pretensado se logra el equilibrio en conjunto de la estructura. Por ello, es indispensable establecer un valor específico de pretensado en relación al material que vamos a utilizar en el proyecto. Para el cálculo del pretensado de malla de nylon se considerará un factor de seguridad (FS) de la malla de 5, según las recomendaciones de la *Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas* para membranas, lo cual se considera lo más cercano a este material por su condición de textil.

Según la Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas, en las estructuras de membrana el valor de pretensado es de 1.3 %, y varía dependiendo del material a utilizar, mientras más rígido sea el material mayor porcentaje de pretensado es necesario aplicar. Así mismo, mientras menos curvatura tenga una superficie, mayor pretensado necesitará para lograr el equilibrio. En el caso de la malla de nylon, debido al alto porcentaje de deformación, es necesario aplicar un porcentaje mucho mayor que el 1.3 % de la membrana.

Para conocer mejor el material en cuestión, y conseguir los datos necesarios para obtener el valor de pretensado, se realizaron pruebas a tracción del material en tres direcciones, dos en sentido ortogonal a la malla, es decir, a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , y otra con una inclinación a  $45^\circ$ . Esto, debido a que es un material anisotrópico, es decir, que presenta un comportamiento diferente dependiendo del sentido en que se le aplique la fuerza.

En el caso de este tipo de mallas, no se puede definir exactamente la trama y la urdimbre, pues este es un material completamente tejido, y las uniones no están entrelazadas como en el caso de las membranas, ni tienen nudos como algunas otras mallas. Por ello se ponderaron los resultados de las pruebas en los sentidos ortogonales, obteniendo simplemente dos gráficas, una en el sentido ortogonal y otra con una inclinación a  $45^\circ$ . Sin embargo, todas las plantillas se trazarán en el sentido ortogonal de la malla. El cálculo manual se realizará con los datos de la gráfica "carga-deformación" ortogonal, y los resultados obtenidos de la gráfica "esfuerzo-deformación" de las pruebas a  $45^\circ$  se utilizarán en el programa WinTess3, pues permite ingresar valores de módulo de elasticidad en sentido de trama y urdimbre (es decir, ortogonal a la malla o membrana) y otro valor en diagonal.

Las gráficas carga-deformación o esfuerzo-deformación de las membranas y mallas, no presentan un comportamiento lineal, lo que quiere decir que la gráfica no es una recta. Sin embargo, debido a que necesitamos definir datos específicos para obtener el módulo de

elasticidad y el valor de pretensado a aplicar, fue necesario definir la zona que se acercaba más a un comportamiento lineal, y establecer una línea recta dentro de la gráfica. Esta zona, será considerada la zona elástica del material y para evitar deformaciones permanentes será necesario permanecer en ella. Las gráficas obtenidas son representativas, pues únicamente mostrarán el punto de inicio del rango elástico, el punto de fluencia del material y la resistencia última, cuando uno o varios de los hilos fueron rotos en la prueba.

## Pretensado para cálculo manual

Para el cálculo manual del pretensado se considerará el 1 % de la resistencia a la rotura del material, un poco menos que la membrana pues es un material menos rígido. Este porcentaje se aplicará a partir del punto de inicio del rango elástico. Por lo tanto, el porcentaje de pretensado total de la malla será de 19.10 %, si se considera la zona anterior.

Así mismo, la carga por metro lineal de pretensado será de:

$$w = 161.30 \text{ kg/m}$$

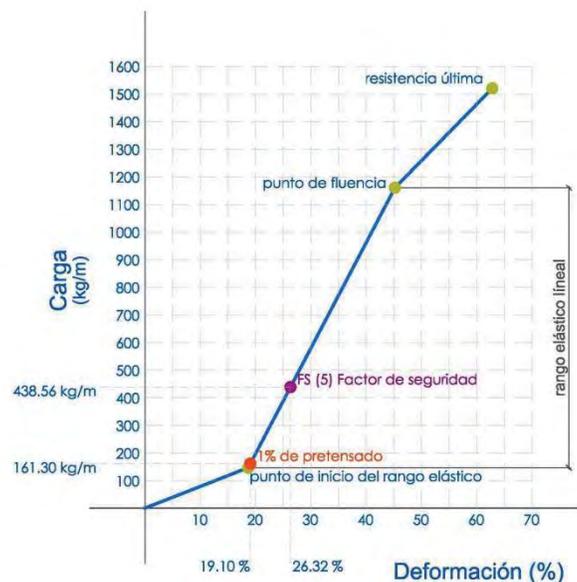


Fig. 8 Gráfica carga-deformación de la malla en sentido ortogonal, indicando el nivel de pretensado y la ubicación del punto del factor de seguridad.

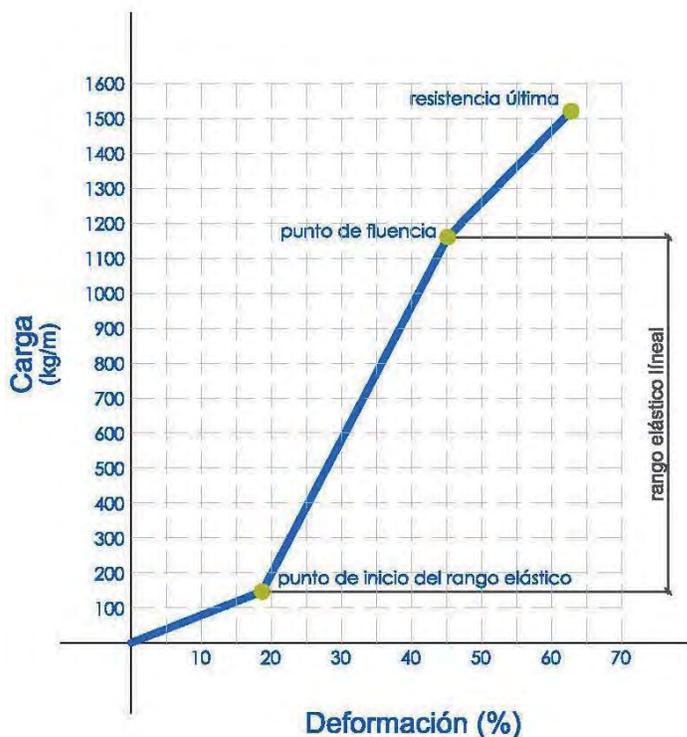


Fig. 9 Gráfica carga-deformación de la malla en sentido ortogonal.

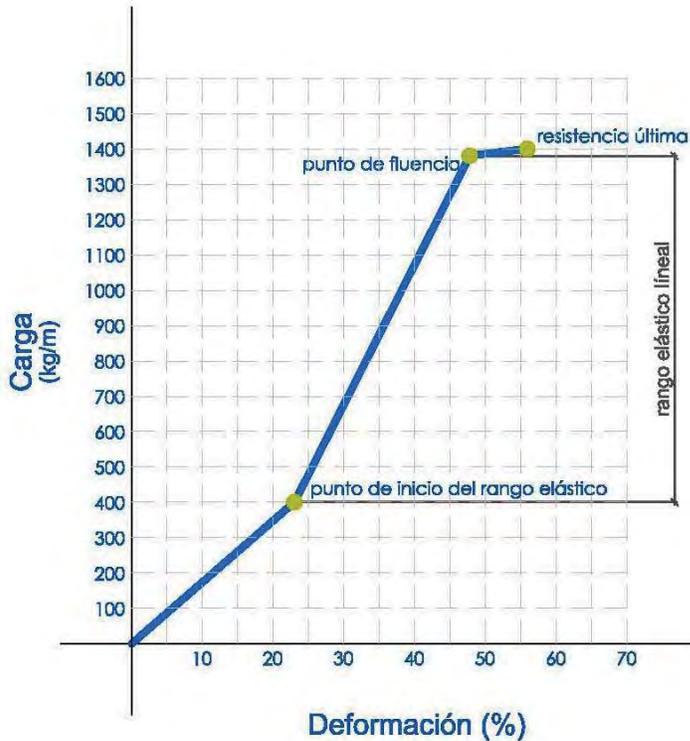


Fig. 10 Gráfica carga-deformación de la malla en diagonal.

La primer parte de la gráfica, la cual abarca desde el origen hasta el punto de inicio del rango elástico, es una zona donde las mordazas se estaban acomodando en las pruebas de laboratorio, por lo tanto, si mantuviéramos trabajando a la malla dentro de esa zona, lo más probable es que ésta no logre el equilibrio y permanezca floja, debido a su alto porcentaje de deformación. El rango elástico lineal es la zona donde debemos hacer trabajar a la malla. El punto de resistencia último es donde el material presento ruptura de uno o más hilos.

## Pretensado para cálculo de WinTess3 (E)

Generalmente para obtener el valor del módulo de elasticidad se requiere una gráfica esfuerzo-deformación, con unidades de kg/cm<sup>2</sup> o GPa, pues la relación entre ambos se expresa con la ecuación:

$$\sigma = E\epsilon$$

Donde:

$\sigma$  = *esfuerzo axial*

$\epsilon$  = *deformación unitaria*

$E$  = *módulo de elasticidad*

En este caso se utilizará una gráfica carga-deformación, para obtener un valor de módulo de elasticidad en ton/m, pues son las unidades que permite ingresar el programa WinTess3. Esto se debe a que no se considera el área de sección transversal del material por ser tan pequeña, y a su vez difícil de calcular, pues al momento de ejercer una fuerza a tracción, el material sufrirá una disminución considerable del área, debido a la deformación en el sentido transversal de la muestra. Por lo tanto, se considerará la carga en unidades de kg/m y la deformación en porcentaje para obtener un valor en ton/m.

Para obtener los valores a utilizar nos basaremos en el procedimiento utilizado en el "complemento de la ayuda" del programa WinTess3 en línea. Donde el módulo de elasticidad con unidades de ton/m, se obtiene de dividir la carga por metro lineal entre el porcentaje de deformación. Es importante resaltar, que la deformación se considera únicamente a partir del punto de inicio del rango elástico, por lo que se le restará la primer parte que inicia desde el origen.

Módulo de elasticidad (t/m) para la malla en sentido ortogonal

$$\text{Carga} = 1520 \text{ kg/m}$$

$$\text{Deformación} = 44 \%$$

$$E = \frac{1520 \text{ kg/m}}{0.44} = 3454.55 \text{ kg/m} = 3.46 \text{ t/m}$$

Módulo de elasticidad (t/m) para la malla en diagonal a 45°

$$Carga = 1400 \text{ kg/m}$$

$$Deformación = 33 \%$$

$$E = \frac{1400 \text{ kg/m}}{0.33} = 4242.42 \text{ kg/m} = 4.24 \text{ t/m}$$



Fig. 11 Ventana de datos de membrana (en este caso malla) en software WinTess3.

Es importante considerar ambos valores, el de pretensado y el de las cargas externas para el análisis, ya que si únicamente consideramos el pretensado, al momento de que exista alguna carga externa, puede suceder alguna pérdida de tracción y puede poner en riesgo a la estructura pues perderá el equilibrio.

# Áreas Tributarias

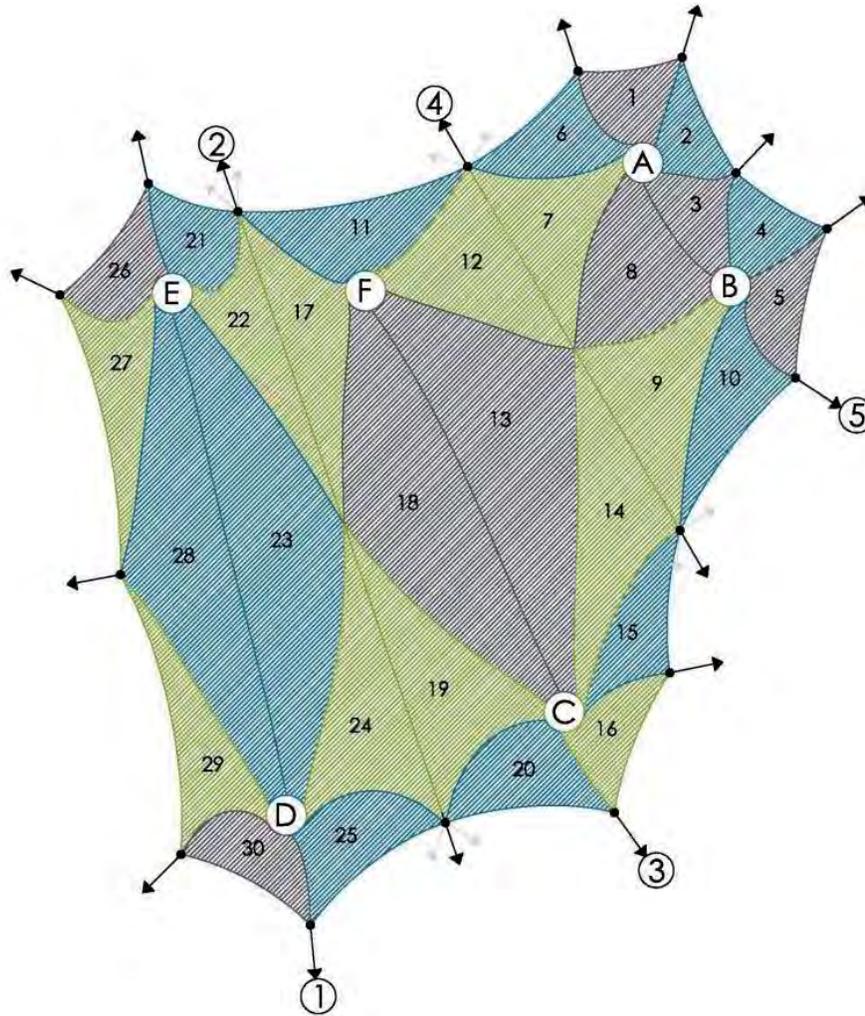


Fig. 12 Diagrama de áreas tributarias en planta

1	11.37	m <sup>2</sup>	11	21.90	m <sup>2</sup>	21	12.65	m <sup>2</sup>
2	9.38	m <sup>2</sup>	12	29.50	m <sup>2</sup>	22	20.06	m <sup>2</sup>
3	11.37	m <sup>2</sup>	13	73.73	m <sup>2</sup>	23	72.55	m <sup>2</sup>
4	10.90	m <sup>2</sup>	14	32.84	m <sup>2</sup>	24	32.55	m <sup>2</sup>
5	11.46	m <sup>2</sup>	15	14.71	m <sup>2</sup>	25	17.98	m <sup>2</sup>
6	14.98	m <sup>2</sup>	16	12.13	m <sup>2</sup>	26	12.90	m <sup>2</sup>
7	23.77	m <sup>2</sup>	17	24.53	m <sup>2</sup>	27	19.36	m <sup>2</sup>
8	28.37	m <sup>2</sup>	18	69.82	m <sup>2</sup>	28	61.64	m <sup>2</sup>
9	28.60	m <sup>2</sup>	19	33.90	m <sup>2</sup>	29	20.08	m <sup>2</sup>
10	18.66	m <sup>2</sup>	20	18.85	m <sup>2</sup>	30	13.57	m <sup>2</sup>
							784.11	m <sup>2</sup>

Tabla 2. Áreas tributarias por zonas (metros cuadrados en planta)

## Cálculo manual de sección de cable de acero en eje 2.

Para el cálculo de la sección de cables de acero se aplicará un factor de seguridad (FS) de 3. Se analizará uno de los cables al que le toca mayor área tributaria, únicamente para comparar los resultados que se obtendrán con el programa WinTess3 y ver las diferencias de cada método.

Para analizar el cable de catenaria, se determinará la  $w$  correspondiente a la carga viva más la carga muerta y se le sumará la  $w$  del pretensado, y posteriormente se calcularán las reacciones.

Si este fuera el caso de una curva de circunferencia donde se supone que todas las fuerzas son distribuidas radialmente, el pretensado se definiría tomando en cuenta la relación entre el radio de curvatura del arco y la carga por unidad de longitud.

$$T = w \times r$$

- T = Carga de Pretensado
- w = carga/unidad de longitud
- r = radio

Por otro lado, si la curva fuera una parábola, donde se supone a las fuerzas distribuidas uniformemente sobre la horizontal, el valor del pretensado ( $w$ ) se deberá multiplicar por la longitud del arco y luego dividir entre el claro, a esa nueva  $w$  se le sumará la  $w$  de la carga viva más la carga muerta y posteriormente se calcularán las reacciones.

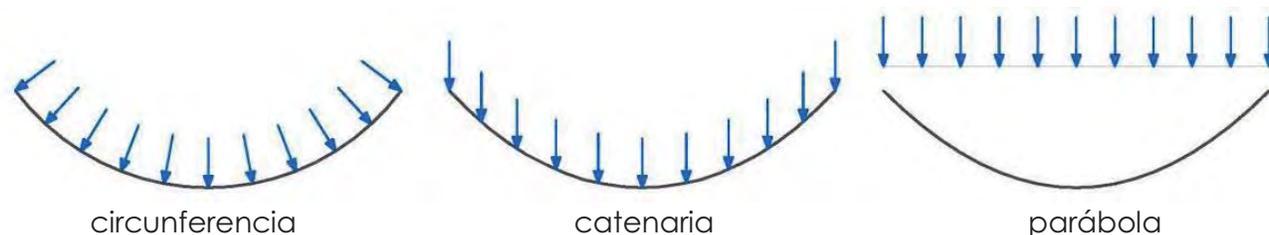


Fig. 13 Régimen de carga según el tipo de curva.

Se precisa utilizar diferente método de cálculo de pretensado dependiendo del tipo de curva a utilizar, porque aunque a veces suelen ser muy similares en forma, el régimen de carga es diferente en cada curva. En la fig. 13 se observa cómo están distribuidas las cargas en cada curva. En la circunferencia se distribuyen radialmente. En la catenaria uniformemente distribuidas a lo largo de la curva. En la parábola, uniformemente distribuidas en la horizontal.

Se iniciará realizando el análisis de cargas muertas y cargas vivas.

Tabla 3 Cargas Muertas.

<b>Material</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Peso</b>	
Malla de nylon sin nudo M-1250BK-BD Black HTPP (marca Incord), fibra high tenacity, Polypropylene	Diámetro de cordón: 3 mm Abertura cuadrada, con 50 mm de separación entre cada cordón.	0.0303 lb/ft <sup>2</sup>	148 g/m <sup>2</sup>
Cables de acero inoxidable marca Camesa	Diámetro de cable: 16 mm		1.07 kg/m
Sistema de sujeción de malla a pino (cable de acero galvanizado y acero A-36)	Diámetro de nodo: 1.80m		443 kg

Tabla 4 Cargas Vivas.

<b>Carga Viva</b>	<b>Peso</b>
*Personal de Mantenimiento del aviario	5 kg/m <sup>2</sup>
Nieve	40 kg/m <sup>2</sup>

\* De acuerdo al reglamento de construcción se tomará una carga viva para cubiertas con pendiente mayor al 5% de 5 kg /m<sup>2</sup>

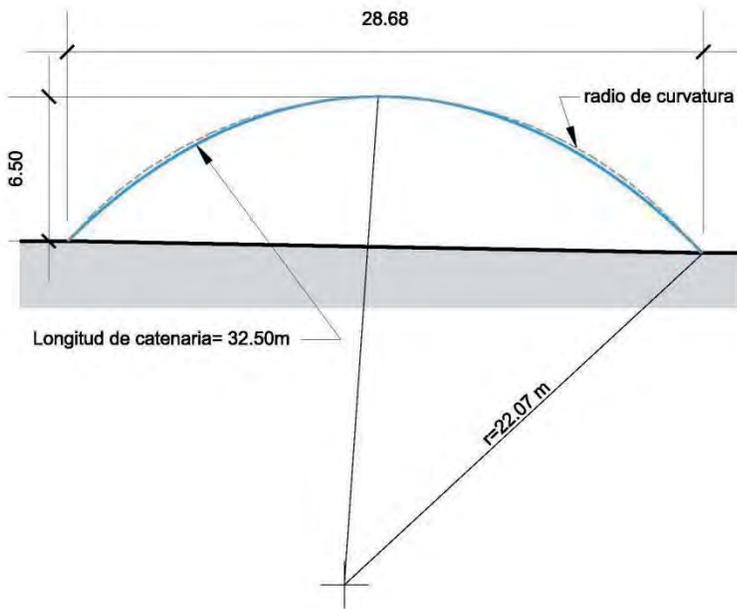


Fig. 14 Curva de catenaria en eje 2.

Ecuación de la catenaria:

$$y = c \cosh \frac{x}{c}$$

y= 22.64 m  
c= 16.14 m  
x= 14.34 m  
f= 6.50 m

Los valores se calcularon en excel utilizando la herramienta de solver, debido a que "c" no se puede despejar.

Tabla 5 Datos de eje 2 para cálculo

Área tributaria	111.04 m <sup>2</sup>
Longitud del arco (l)	32.50 m
Claro total (s)	28.68 m
Flecha (f)	6.50 m
c	16.14 m
y	22.64 m
Peso de malla de nylon	0.15 kg/m <sup>2</sup>
Peso de cable	1.55 kg/m
Carga por personal de mantenimiento	5.00 kg/m <sup>2</sup>
Carga de nieve	40.00 kg/m <sup>2</sup>

Tabla 6 Cálculo de cargas muertas.

Malla de nylon	0.15 kg/m <sup>2</sup>	111.04 m <sup>2</sup>	16.66 kg
Cable de acero	1.55 kg/m	32.50 m	50.38 kg

Tabla 7 Cálculo de cargas vivas.

Personal de mantenimiento	5.00 kg/m <sup>2</sup>	111.04 m <sup>2</sup>	555.20 kg
Nieve	40.00 kg/m <sup>2</sup>	111.04 m <sup>2</sup>	4441.60 kg

**Total (P) = 5063.84 kg**

w obtenida por cargas muertas más cargas vivas :

$$w = \frac{P}{l} = \frac{5063.84 \text{ kg}}{32.50 \text{ m}} = 155.81 \text{ kg/m}$$

w obtenida por pretensado:

$$w = 161.30 \text{ kg/m}$$

Suma de los dos valores de w para calcular las reacciones:

$$w = 155.81 \text{ kg/m} + 161.30 \text{ kg/m} = 317.11 \text{ kg/m}$$

Cálculo las reacciones:

$$H = cw \quad H = 16.14 \text{ m}(317.11 \text{ kg/m}) = 5118.16 \text{ kg}$$

$$V = w (l/2) \quad V = 317.11 \text{ kg/m} \left( \frac{32.50 \text{ m}}{2} \right) = 5153.04 \text{ kg}$$

$$R = wy \quad R = 317.11 \text{ kg/m} (22.64 \text{ m}) = 7179.37 \text{ kg}$$

Reacción

$$R = 7179.37 \text{ kg} = \underline{7.18 \text{ Ton}}$$

$$F (FS=3) = 7.18 \text{ Ton} \times 3 = 21.54 \text{ Ton}$$

Se propone utilizar cable marca CAMESA, tipo barracuda (galvanizado, núcleo de acero):

Diámetro = 19mm (3/4 pulgadas)

Peso aproximado = 1.55 kg/m

Resistencia a la ruptura (arado mejorado) = 23.2 ton

### Cálculo de estructura en programa WinTess3

El software WinTess3 trabaja con el método de cálculo de barras, y tiene la ventaja de que busca el equilibrio de la estructura por medio del -proceso iterativo en el cálculo. Esto quiere decir que posiblemente la forma de la estructura cambie un poco, pues además de calcularla buscará su equilibrio.

Es por ello que el cálculo por medio del software WinTess3 para tenso estructuras, nos arroja un cálculo más preciso, en comparación con el cálculo manual, pues para obtener un cálculo exacto manualmente, se requiere de más tiempo, y de un amplio conocimiento de los conceptos estructurales, de las deformaciones y los desplazamientos. No obstante, es importante tener en cuenta cómo trabajan y cómo se analizan estas estructuras antes de ingresar cualquier proyecto a un software especializado, pues será necesario el conocimiento, para su correcta utilización.

Para realizar el cálculo de la estructura en WinTess3, se importó el archivo creado MPanel a través de la plataforma de Autocad, donde se realizó la búsqueda de la superficie. En WinTess3, se eligió el tipo de material (cable) o elemento (membrana) para cada una de las barras. Posteriormente se pasó a la fase de cálculo donde se materializó la estructura y se definió el tipo de membrana (en este caso malla) y se introdujeron los valores siguientes, obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio.

$$\begin{aligned} \text{Resistencia (daN/5cm)} &= 74.5/74.5 \\ \text{Módulo de Elasticidad (t/m)} &= 3.46/3.46 \\ \text{Elasticidad diagonal (t/m)} &= 4.24 \\ \text{Peso (kg/m}^2\text{)} &= 0.150 \\ \text{Coeficiente de seguridad} &= 5 \\ \text{Pretensado (\%)} &= 19.47/19.47 \end{aligned}$$

En relación a las acciones consideradas para calcular la estructura se le aplicó el peso propio, pretensado y las cargas producidas por nieve con un valor de 40 kg/m<sup>2</sup>.

Posteriormente se inicia el proceso iterativo, donde podemos definir el valor máximo de desplazamiento en cada iteración, la precisión en kg y el número máximo de iteraciones.

El total de las reacciones obtenidas en el software WinTess3, resultaron más bajas en comparación con los calculados manualmente, y posiblemente esto se debe a todos los factores mencionados anteriormente que fueron tomados en cuenta.

Resultados

Salir HTML Export Excel (CSV) Guardar Imprimir

Nieve = 40 kg/m<sup>2</sup>  
 Precensado de la membrana = 19.47/19.47 %  
 Peso de los cables = 74.6 kg  
 Peso de los tubos = 153.9 kg  
 Peso de la membrana = 224.8 kg

-----

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS

(N)

Nudo	Rx	Ry	Rz	R(total)			
1	-4.471	2.691	-4.654	6.992			
60	-4.018	-1.474	-6.059	7.416			
211	-1.253	4.360	-3.510	5.746			
252	0.004	0.088	0.345	0.356	-0.000	-0.000	0.000
254	0.005	0.100	0.352	0.366	-0.000	-0.000	0.000
255	0.003	0.076	0.336	0.345	0.000	-0.000	0.000
262	0.005	0.116	0.361	0.379	-0.000	-0.000	0.000
263	0.002	0.066	0.330	0.337	0.000	-0.000	0.000
269	0.004	0.133	0.366	0.389	-0.000	-0.000	0.000
270	0.000	0.057	0.324	0.329	0.000	-0.000	0.000
273	0.002	0.147	0.364	0.392	0.000	-0.000	0.000
274	-0.001	0.050	0.320	0.324	-0.000	-0.000	0.000
280	-0.000	0.161	0.359	0.394	-0.000	0.000	0.000
281	-0.003	0.043	0.314	0.317	0.000	0.000	0.000
289	-0.004	0.171	0.345	0.386	0.000	0.000	0.000
290	-0.005	0.038	0.307	0.309	-0.000	0.000	0.000
300	-0.008	0.178	0.326	0.371	-0.000	-0.000	0.000
301	-0.005	0.031	0.298	0.300	0.000	-0.000	0.000
311	-0.012	0.162	0.303	0.353	0.000	-0.000	0.000
312	-0.010	0.028	0.290	0.291	-0.000	-0.000	0.000
321	-0.017	0.183	0.280	0.335	-0.000	0.000	0.000
322	-0.012	0.024	0.278	0.280	0.000	0.000	0.000

Fig. 15 Ventana de impresión de los primeros resultados en los nudos, WinTess3.

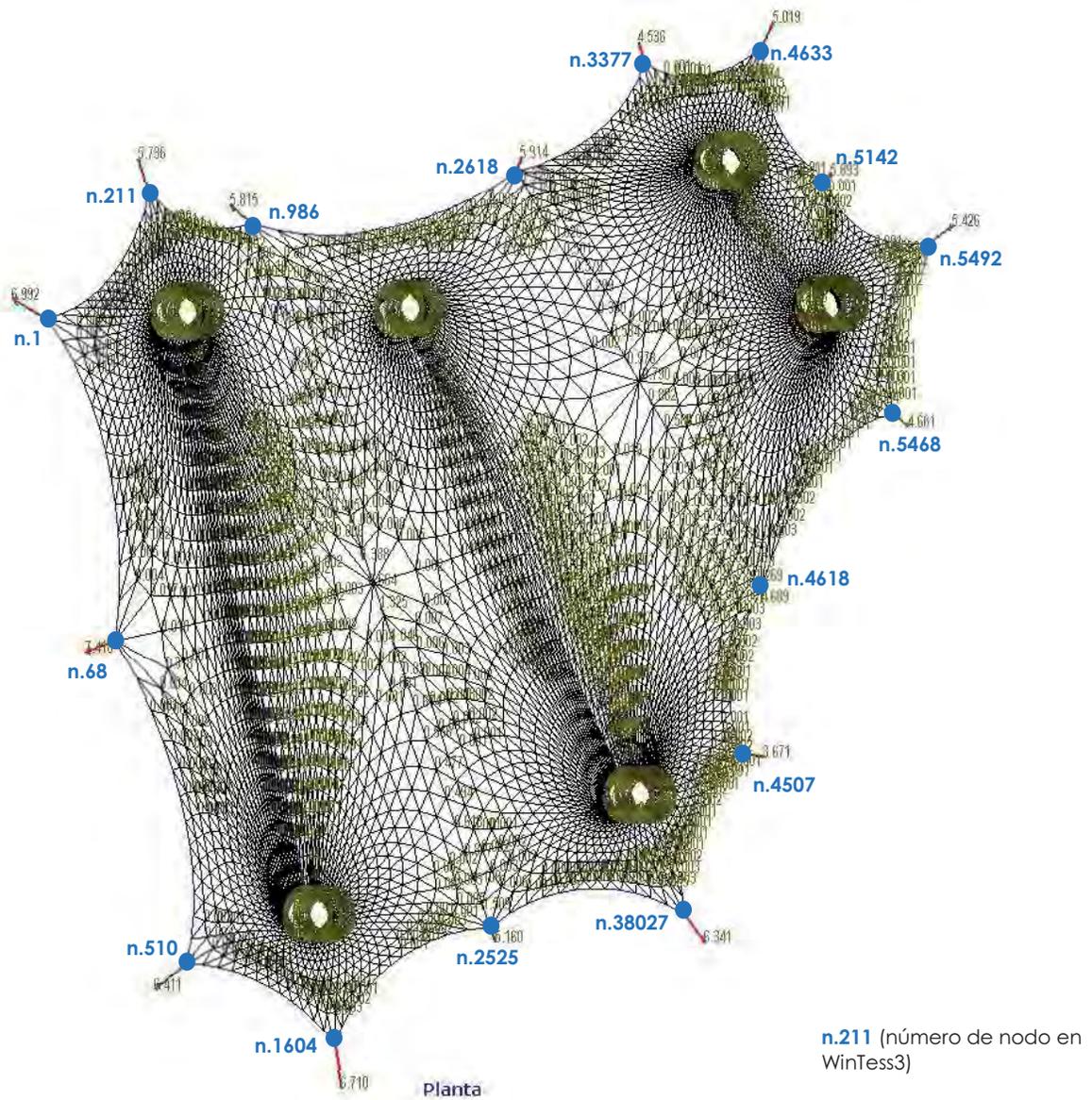


Fig. 16 Reacciones y fuerzas desequilibradas en planta obtenidas en el software WinTess3.

Tabla 8 Valores de reacciones en anclajes inferiores.

nodo	reacción	nodo	reacción	nodo	reacción
n.1	6.992 ton	n.4507	3.671 ton	n.3377	4.536 ton
n.68	7.418 ton	n.4618	4.689 ton	n.2618	5.914 ton
n.510	6.411 ton	n.5468	4.661 ton	n.986	5.815 ton
n.1604	6.710 ton	n.5492	5.426 ton	n.211	5.736 ton
n.2525	5.160 ton	n.5142	5.893 ton		
n.3802	6.341 ton	n.4633	5.019 ton		

En el diagrama de la fig. 16 podemos observar las reacciones y las fuerzas desequilibradas, las cuales sería ideal no tenerlas, sin embargo, estas son del orden de máximo 5 kg.

Para obtener el valor promedio de la reacción en los anillos de cúspide de los conos se sumaron todas las reacciones que llegaban a la parte superior del cono. El rango fluctúa entre 17 y 23 ton. Aunque este trabajo no abarque el diseño de cada uno de los anclajes, será de gran importancia para su construcción, realizar el análisis del sistema de sujeción propuesto para asegurar que el pino recibirá adecuadamente todas las cargas que actúen en él.

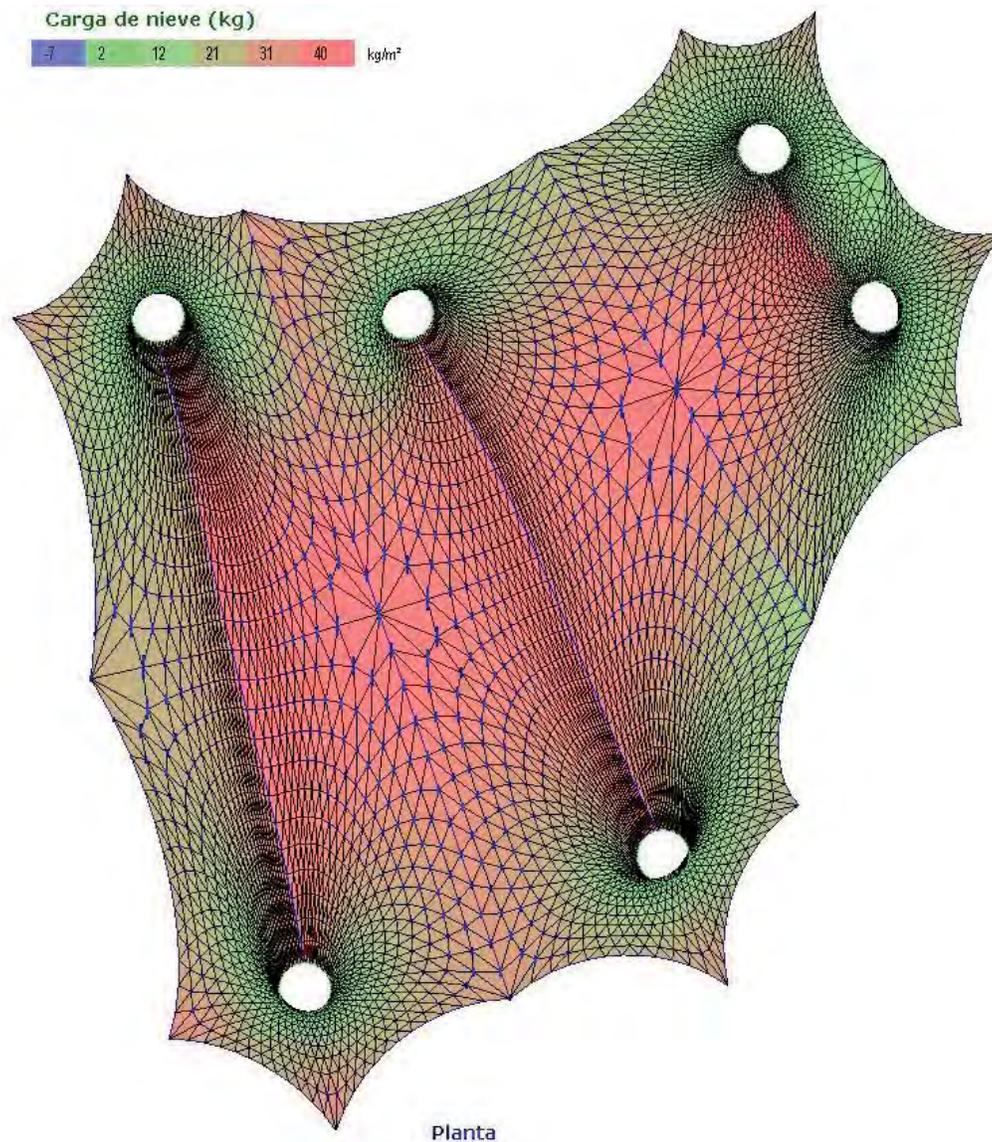


Fig. 17 Distribución de cargas de nieve en superficie.

En relación a las cargas de nieve, en la fig. 17 se observa que las zonas más críticas, en donde actúan los  $40 \text{ kg/m}^2$  son las áreas entre cada 4 conos. Las zonas verdes, son las que muestran mayor pendiente, por lo tanto es muy poco probable la acumulación de nieve en ella.

## Comparativa de resultados – método manual – software WinTess3

Hemos observado cómo se comporta el sistema estructural en WinTess3 y la manera en que se busca el equilibrio de la estructura. En cuanto a los cálculos manuales realizados, el método utilizado se puede considerar muy general. Para obtener datos más precisos en el método manual, será necesario tomar en cuenta otros factores como los desplazamientos y calcular las reacciones de los cables de relingas y los cables auxiliares.

En general, los resultados obtenidos con el cálculo manual fueron más altos que los del software WinTess3. Esto nos indica, que podemos obtener un porcentaje considerable de ahorro en los materiales al realizar el cálculo con todos los elementos que actúan conjuntamente.

### **Reacciones obtenidas en eje 2 (nudos 986 y 2525)**

Método Manual

Reacción (n.986) = 7.18 Ton  
Reacción (n.2525) = 7.18 Ton

Software WinTess3

Reacción (n.986) = 5.82 Ton  
Reacción (n.2525) = 5.16 Ton

## Detalles Constructivos

### Detalle de placa de punta en anclaje inferior

Como propuesta en los anclajes inferiores, se presenta una esquina recortada para facilitar la unión de la malla con los elementos soporte, cables y placa de punta. El lazo entre la malla y los cables de acero tanto interiores, como cables de relinga, se proponen con el sistema acordonado a base de cuerda de nylon.

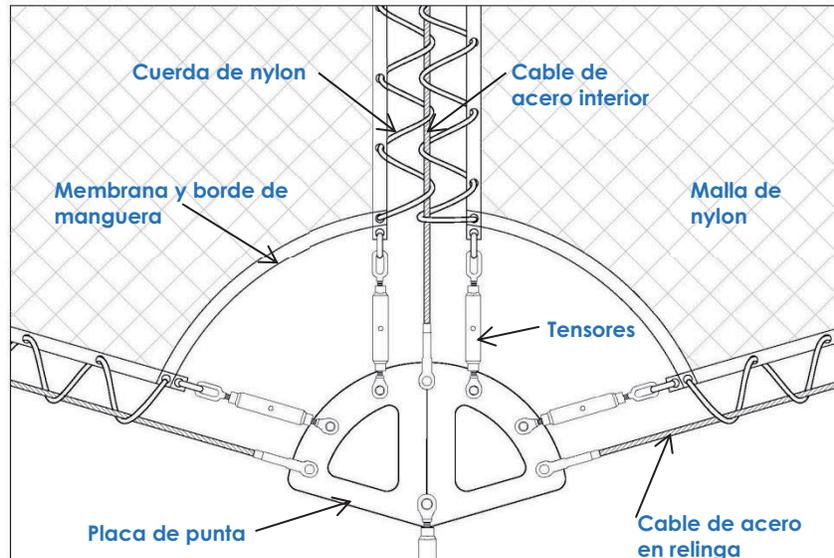


Fig. 18 Detalle de esquina inferior recortada

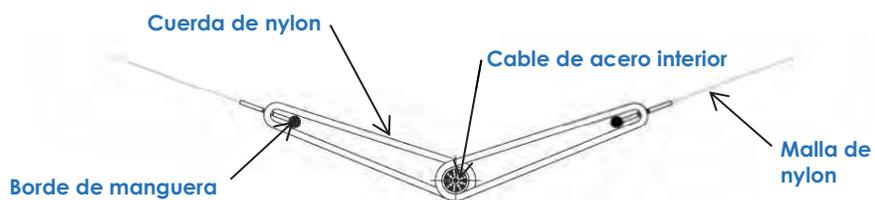


Fig. 19 Detalle de cable interior unido a la malla mediante el sistema acordonado

## Detalle de sistema acordonado para relingas

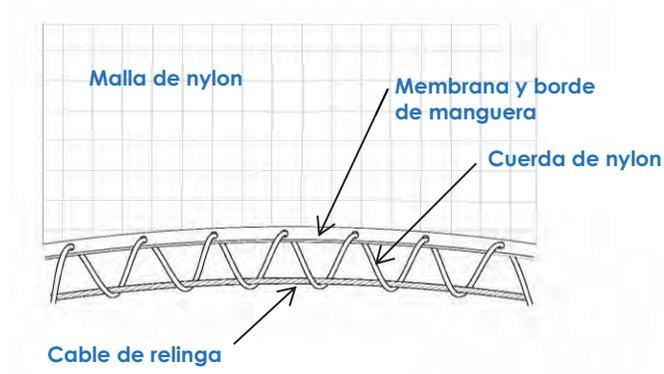


Fig. 20 Detalle de sistema acordonado en cables de relinga.

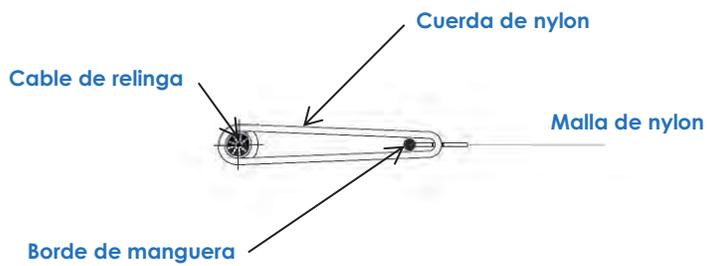


Fig. 21 Detalle en corte de sistema acordonado en relinga.

## Detalle de sistema pantógrafo

Se retoma el concepto del sistema pantógrafo utilizado en el Aviario de Munich. La función será unir las partes altas de la superficie mediante un sistema que permita el movimiento de la malla cuando existan cargas externas que produzcan desplazamientos en la superficie.

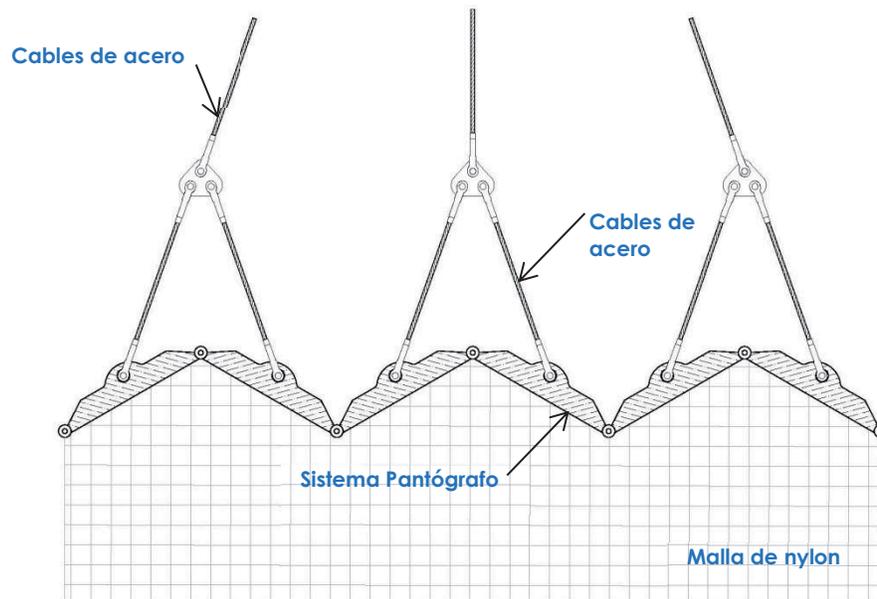


Fig. 22 Detalle de sistema pantógrafo en anclaje superior.

## Detalle unión de malla a cuerda

La unión de malla con malla para unir cada una de las plantillas, se propone mediante una cuerda de nylon, de esta manera, se controlará cada plantilla individualmente. En la fig. 23 se muestra el ejemplo proporcionado por Incord de una malla amarrada a una cuerda de borde, se propone realizar el mismo amarre para unir cada una de las plantillas de la superficie.

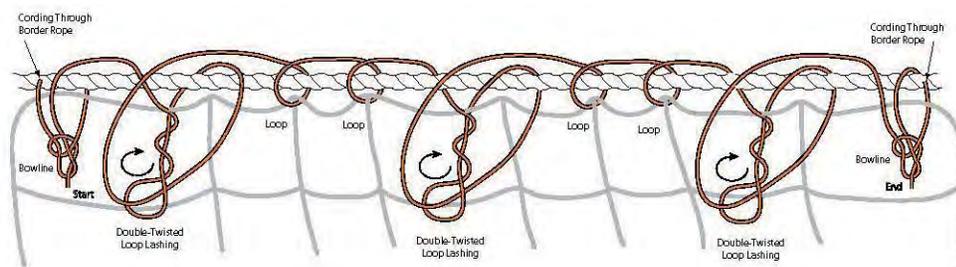


Fig. 23 Detalle de malla incord para unión de malla a cuerda de borde,

## Plantillas

Se realizó una maqueta de estudio, donde fue necesario trazar cada una de las plantillas para generar la superficie.

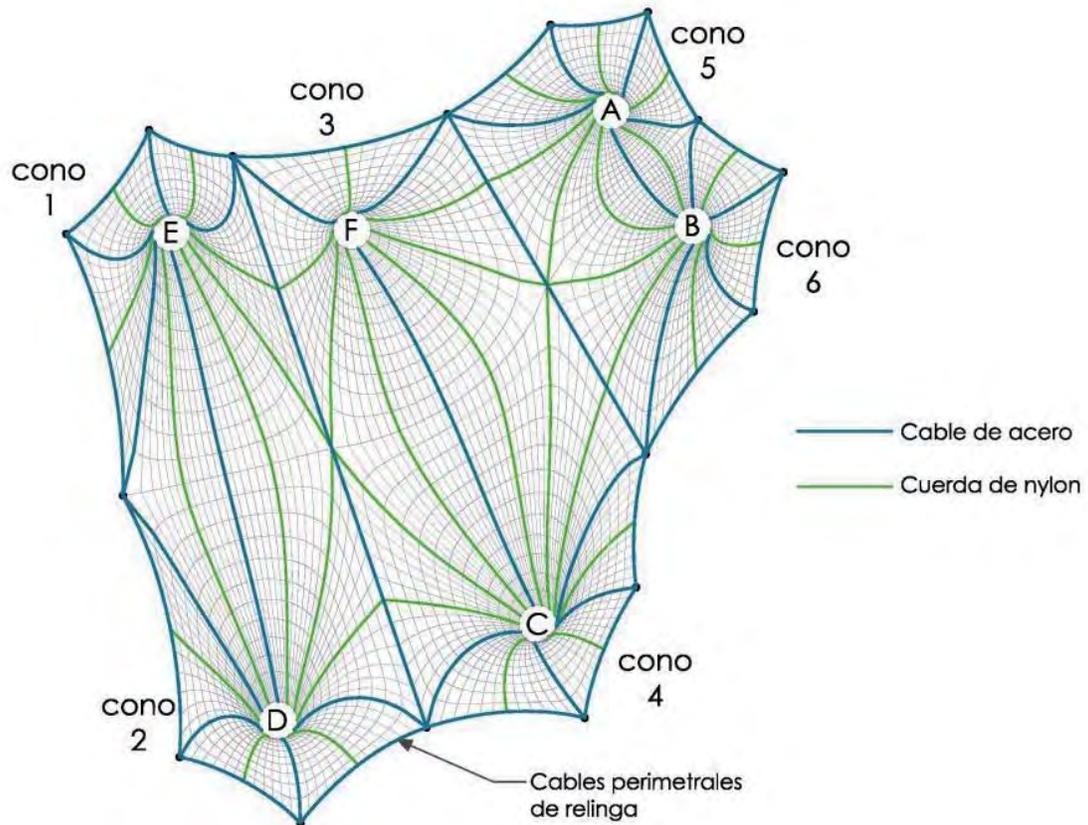


Fig. 24 Planta de proyecto con el diseño de plantillas.

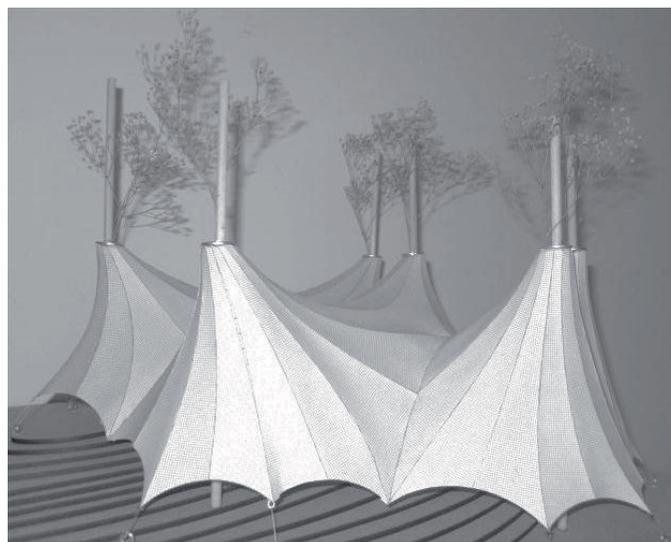


Imagen 23 Maqueta de estudio.

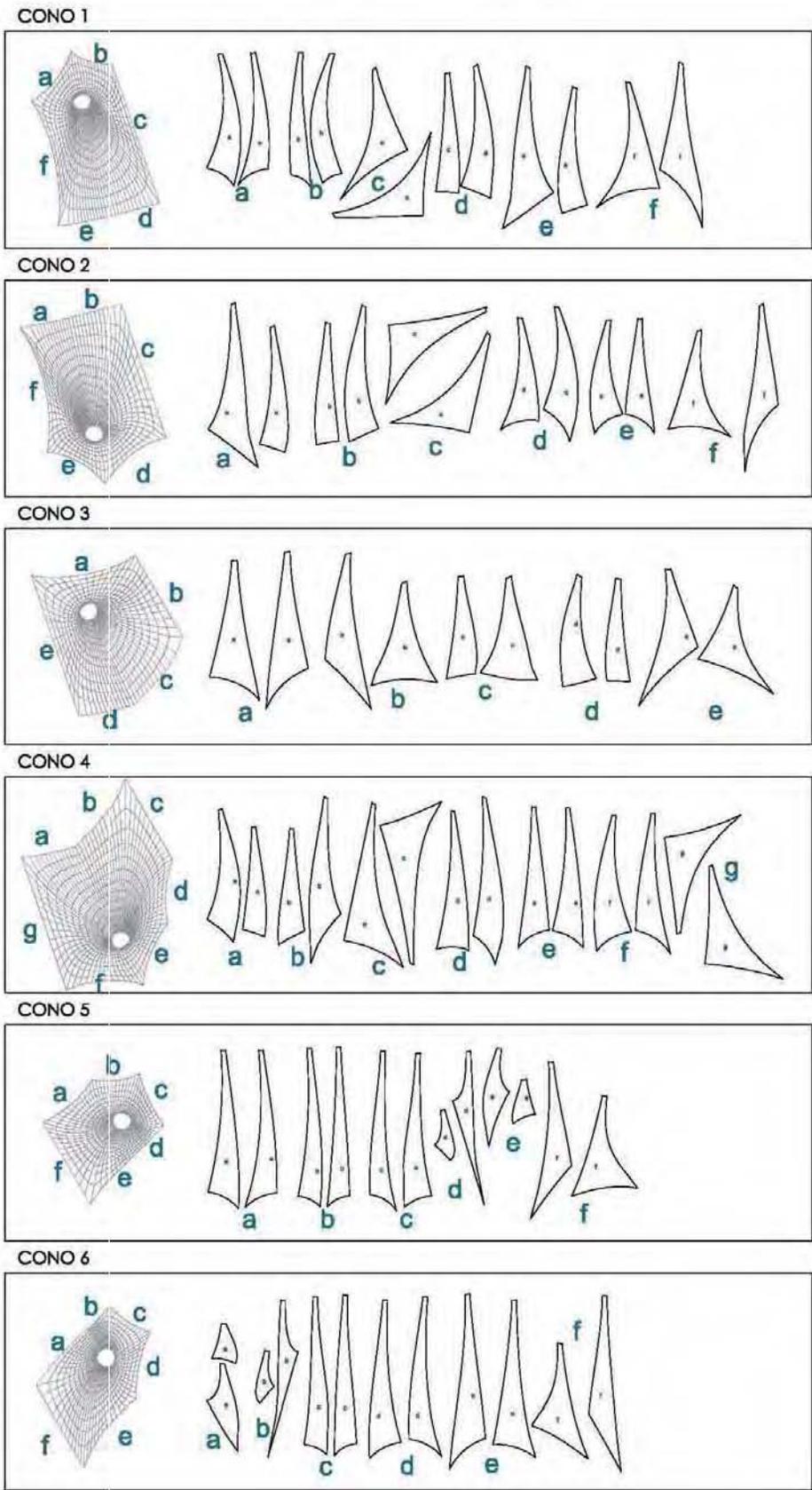


Fig. 25 Trazo de plantillas en cada cono, para generar la superficie.

En la Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas se recomienda realizar las plantillas o patrones de acuerdo a líneas geodésicas para generar la plantilla de manera más uniforme y evitar desperdicio de material. La línea geodésica entre dos puntos se puede obtener en algún software como MPanel o WinTess3, ésta es la línea con menor distancia entre dos puntos en una superficie. En la fig. 26 se ve la diferencia de una misma plantilla trazada con y sin línea geodésica.

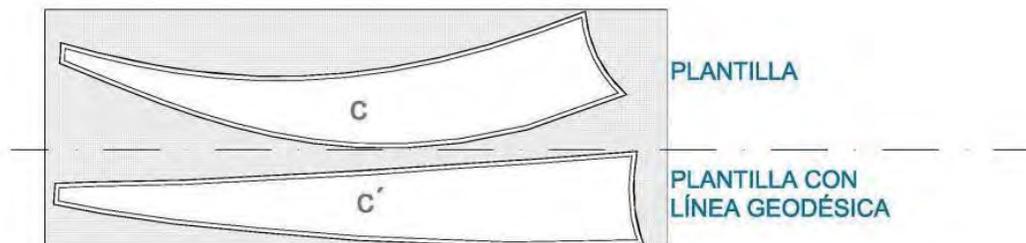


Fig. 26 Detalle de plantilla generada con las líneas de la superficie ( $c$ ) y plantillas generadas con líneas geodésicas ( $c'$ ).



Imagen 24 Recorte y unión de plantillas en maqueta de estudio de papel.



---

## Conclusiones

En el objetivo principal del proyecto, se planteó la necesidad del diseño de un aviario para cóndor en donde la estructura sea resistente por forma y no por masa.

Sin duda, podríamos abordar este proyecto con una solución convencional, en donde una estructura ortogonal fuera el espacio contenedor del aviario. Sin embargo, si nos preocupamos por los aspectos que intervienen en la elaboración del proyecto, y tomamos el compromiso de crear un producto eficiente estructuralmente y responsable con el medio ambiente, lo adecuado era buscar una solución estructural ligera, en donde se tratara de reducir al máximo la energía y los materiales a utilizar.

Este proyecto basado en la envolvente de un espacio, da respuesta a tal objetivo, mediante una superficie que genera un contenedor libre en el interior de cualquier elemento que pudiera perturbar la esencia funcional del proyecto. Así mismo, este proyecto cumple con los requerimientos de factibilidad que incluyen la utilización de un mínimo de materiales debido a que el sitio se localiza en una zona de difícil acceso, lo que lo hace un proyecto viable constructiva y económicamente. La respuesta a la problemática de este proyecto generó elementos sencillos que permiten que la sinergia entre estos mantenga el equilibrio de cada uno de ellos, pues la distribución de fuerzas, van ligadas al funicular del mismo, creando de esta manera una estructura ligera.

Es necesario seguir indagando en este tipo de estructuras, ya que prometen un panorama óptimo para las construcciones. Sí bien, la diferencia entre una estructura ligera y una estructura convencional radica en la dificultad de obtener su forma y el cálculo no lineal del mismo. Los resultados presentados a partir de ellas, son un ahorro considerable en cuanto a materiales, lo cual nos ayuda a contribuir con la disminución de las emisiones tóxicas al ambiente. Así mismo, las estructuras ligeras tienen la característica de poseer cualidades estéticas, por lo que pueden ser aprovechadas para el diseño arquitectónico de espacios, pues son atractivas visualmente y no requieren de ornamento para ocultar la estructura portante. Creo que este trabajo es una referencia de cómo abordar un proyecto estructural de este tipo, independientemente del material con el que se pretenda trabajar, pues habitualmente es difícil encontrar ejemplos que nos guíen en cómo llevar a la práctica los conceptos de las estructuras ligeras, los aspectos que se deben considerar en la elección del material y las propiedades que nos ayudarán a realizar el cálculo.

## Sitios web

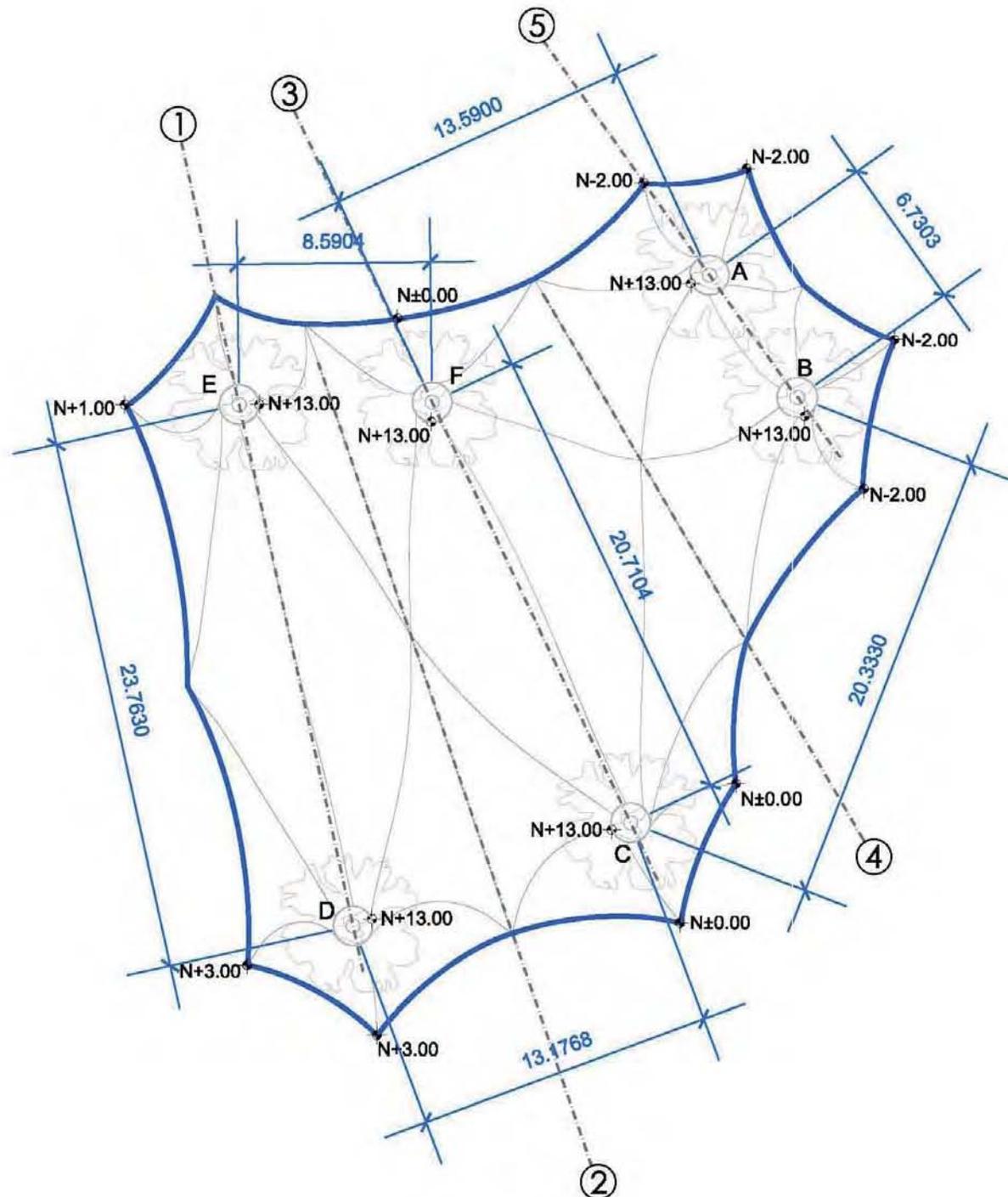
- [www.conanp.gob.mx](http://www.conanp.gob.mx)
- <http://sites.upc.es/~www-ca1/cat/recerca/tensilestruc/portada.html>
- <http://www.tensinet.com/database/>
- <http://www.mayr-ludescher.com/aviary-in-the-wilhelma-stuttgart.html>
- <http://www.horstberger.com/>
- [www.burohappold.com](http://www.burohappold.com)
- [Tecno.upc.es/wintess/manual/](http://Tecno.upc.es/wintess/manual/)
- <http://www.meliar.com/MPanel.htm>
- <http://www.camesawire.com/>
- <http://www.incord.com/>

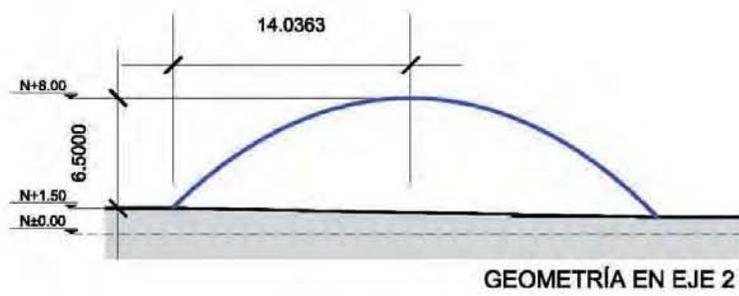
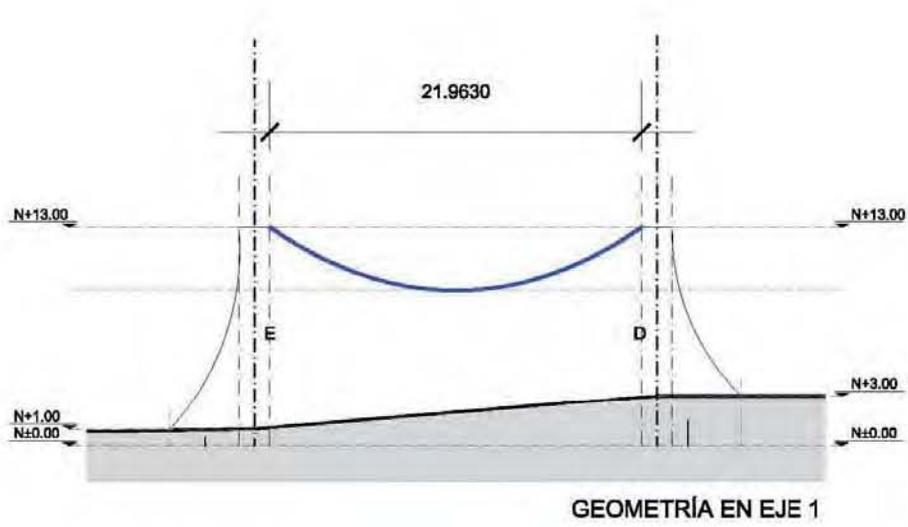
## Bibliograf1a

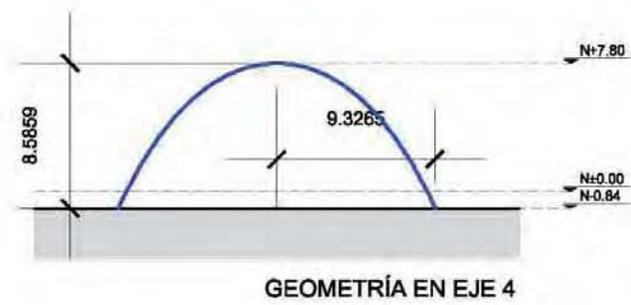
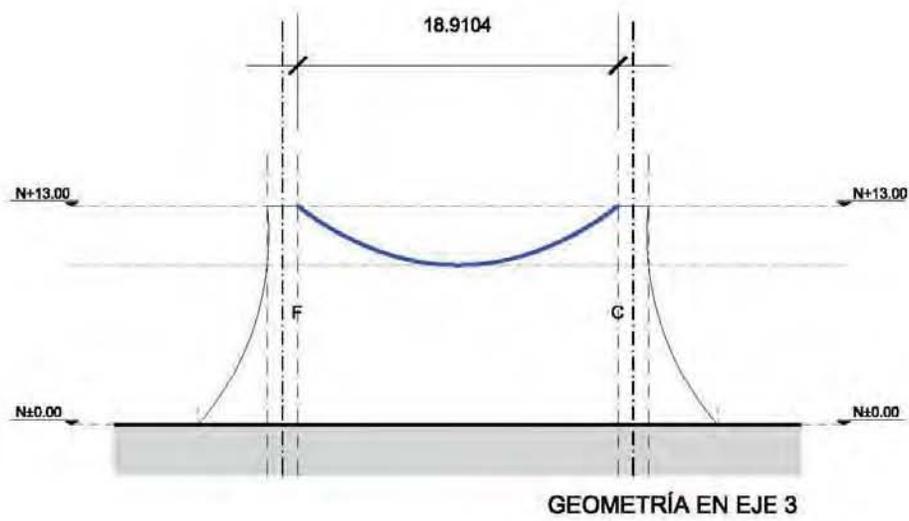
- Brian Forster, Marijke Mollaer, Arquitectura Textil: Gu1a Europea de Dise1o de las Estructuras Superficiales Tensadas, ISBN 9788489150829
- Cindy & Mike Wallace. El condor regresa a su hogar en Baja California. Zoological Society of San Diego.
- Comisi6n Natural de 1reas Naturales Protegidas. Programa de Conservaci6n y Manejo Parque Nacional Sierra de San Pedro M1rtir, M6xico. M6xico DF, 2006. ISBN: 968-817-830-6
- Engel, Henio. Sistemas Estructurales. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1999.
- Essay on the Munich Aviary and Jeddah Sports Complex  
Architect: Jorg Gribl with Frei Otto  
Structural Engineers: Buro Happold
- Ferdinand P. Beer; E. Russell Johnston, Jr.; John T. DeWolf; David F. Mazurek. Mec1nica de Materiales. Ed. McGraw-Hill, M6xico, 2009.
- Frei Otto; Rainer Barthel; Berthold Burkhardt. Nat1rliche Konstruktionen, 1985.
- HAPPOLD, The Confidence to Build, Derek Walker / Bill Addis, Great Britain, 1997, Happold Trust Publications Limited. ISBN 0-203-97648-7 Master e-book
- Patterns 5, Publicado por Buro Happold Consulting Engineers, May 1989
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. M6xico, 2010.
- Tonda Juan Antonio, Cascarones de concreto, Universidad Aut6noma Metropolitana, 1987.
- Torroja Miret, Eduardo. Raz6n y Ser de los Tipos Estructurales. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Cient1ficas, Madrid, 2004.
- Yield and fatigue behavior of polypropylene and polyamide-6 nanocomposites. Journal of materials science 38 (2003) 3183-3190, P.K.Mallick, Yuanxin Zhou, Center for lightweighting Automotive Materials and Processing, University of Michigan-Dearbo

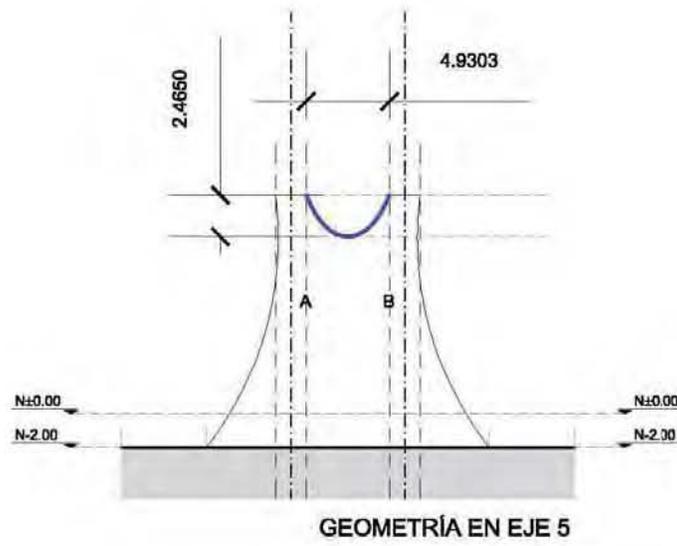
## Anexos

## Dimensiones en planta y alzados de aviario









## Pruebas a tracción en malla de nylon en Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Se realizaron pruebas a tracción en 3 sentidos de una malla de nylon con el apoyo del personal del Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Tipo de Malla: M-1250BK-BD Black HTPP

Marca: incord ([www.incord.com](http://www.incord.com))

Diámetro del cordón: 3 mm

Dimensión de la malla: 50 mm (apertura del cuadrado medido entre las uniones de la malla)

Peso: 148 g/m<sup>2</sup>

M-1250BK-BD unido con latex es una malla sin nudos, formada con hilos a cada 2 pulgadas. Los nudos son eliminados mediante la unión de la malla con el tejido de los hilos continuamente a lo largo de la malla para mejorar la fuerza y la durabilidad. HTPP es una fibra ligera altamente resistente a la abrasión, a la humedad y a los productos químicos. M-1250BK-BD tiene un revestimiento de latex, el cual aporta mayor cuerpo y rigidez a la malla.

Tablas de los resultados de las pruebas:

Sentido Ortogonal

	<b>Carga* (kg)</b>	<b>Deformación Unitaria (cm)</b>	<b>Carga (kg/m)</b>	<b>Deformación Lineal (%)</b>
<b>Punto de Inicio de Rango Elástico</b>	36.67	4.67	146.68	18.67
<b>Punto de Fluencia</b>	290	11.30	1160	45.20
<b>Resistencia Última</b>	380	15.70	1520	62.80

\*Carga aplicada en pruebas de laboratorio a una muestra de 25cm.

Sentido a 45°

	<b>Carga* (kg)</b>	<b>Deformación Unitaria (cm)</b>	<b>Carga (kg/m)</b>	<b>Deformación Lineal (%)</b>
<b>Punto de Inicio de Rango Elástico</b>	100	6.50	400	22.98
<b>Punto de Fluencia</b>	345	13.50	1380	47.74
<b>Resistencia Última</b>	350	15.80	1400	55.87

\*Carga aplicada en pruebas de laboratorio a una muestra de 25cm.

## Reporte Fotográfico



Imagen 26 Prueba en sentido A



Imagen 25 Malla deformada en sentido A.



Imagen 27 Maquina de prueba utilizada en ensayos a tracción de malla.



Imagen 29 Hilos rotos en sentido B



Imagen 28 Hilos rotos en sentido B



Imagen 30 Muestra de malla en sentido B (primer prueba, posteriormente se redujo 1 espacio para que la máquina de prueba pudiera deformarla lo suficiente.)



Imagen 31 Prueba en sentido C



Imagen 32 Malla rota en sentido C



Imagen 33 Inicio de prueba a tracción en muestra de malla de nylon. La mordaza se presionaba con la palanca durante al inicio de la carga aplicada.

