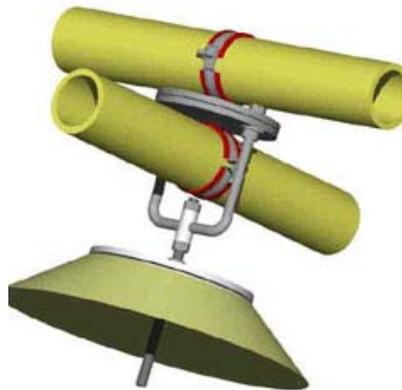


# ETSAB

# ETSAV



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA - ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA -  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DEL VALLE - DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES  
ARQUITECTÓNICAS 1

## DISEÑO DE ESTRUCTURA TRANSFORMABLE POR DEFORMACIÓN DE UNA MALLA PLANA EN SU APLICACIÓN A UN REFUGIO DE RÁPIDO MONTAJE

Tutor: Dr. José Ignacio Llorens  
Co-tutor: Dr. Ramón Sastre Sastre

Autor: Arq. Nelson Rodríguez

BCN Diciembre 2005

# CAPÍTULO 2

## DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

---



ETSAB



# CAPÍTULO 2

## DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

---

### Resumen al capítulo:

En este capítulo se desarrolla la parte central de este trabajo de investigación, aquí se sintetiza el estudio del material, el proceso para la obtención de la forma de la malla pre-flectada por el método de las curvas de flexión y de la membrana anticlástica textil de rigidización utilizando, para ambos casos, modelos experimentales físicos y modelos matemáticos, con la finalidad de verificar la hipótesis. También se realiza un detallado estudio del comportamiento de la malla ante cargas externas (viento y nieve) determinando, para cada caso, sus esfuerzos y la tensión de las barras críticas.

### Contenido:

- 2.1. Los plásticos como material de construcción
- 2.2. Definición geométrica form-finding (obtención de la forma)
- 2.3. Simulación por modelo físico
- 2.4. Simulación por computadora
- 2.5. Comprobación de la tensión inicial de la malla
- 2.6. Estudio de la influencia de la sección de la barra en la pre-flexión inicial
- 2.7. Comprobación de la obtención de la forma
- 2.8. Simulación del comportamiento estructural ante cargas externas
- 2.9. Comportamiento de la estructura ante cargas externas de viento: análisis elástico
- 2.10. Comportamiento de la estructura ante cargas externas de nieve: análisis elástico

Introducción al capítulo

## **El cálculo de mis tormentos**

Una vez estudiadas las mallas deformadas a través de casos específicos y el tema centrado en el campo de las estructuras transformables, este capítulo se referirá al desarrollo técnico de las mallas.

Como primer punto, abordaremos un estudio del material seleccionado, analizamos sus características físicas y sus propiedades mecánicas para lo cual se determinó experimentalmente su límite rotura a través de probetas. También se abordará el tema de la búsqueda de la forma, su geometría y coordenadas, a través de la construcción de modelos a escala tanto físico como por computadora.

Para simplificar esta parte experimental tendremos como variable constante del estudio las barras. Todas las barras tendrán un mismo patrón de igual longitud para generar una cúpula de base cuadrada, con arcos perimetrales y apoyada sobre cuatro puntos, con la finalidad de comparar los resultados. La fuerza externa aplicada a la malla para lograr la deformación estará ubicada en las esquinas perimetrales y en la parte central de la malla. Los nudos estarán fijos. Las variables desconocidas son las coordenadas resultantes en cada uno de los modelos que serán encontrada al generar la forma.

Con los modelos físicos estudiaremos las coordenadas, geometría y comportamiento global de la estructura durante el proceso de erección. Con los modelos por computadora se estudiará las coordenadas, geometría, forma de la membrana y el análisis de los esfuerzos iniciales necesarios para introducir la pre-flexión en las barras, así como las tensiones para determinar los puntos críticos de la estructura.

Estos modelos nos permitieron estudiar la viabilidad del método de búsqueda de la forma por curvas de flexión, planteada en la hipótesis y no por catenaria de modelos colgantes. Así como es cierto, que un cable suspendido adopta una forma estáticamente óptima, tal y como lo explicamos en el capítulo N° 1, es también cierto que a una barra rígida hay que doblarla. Por ello, no alcanzara la forma de una catenaria aunque sus diferencias sean despreciables por efecto de la longitud de la barra o de su sección, por lo que hay que estudiar la relación existente entre la geometría de la sección de la barra y el esfuerzo de flexión.

El cálculo matemático de las estructuras pre-flectadas ha sido posible únicamente por métodos aproximados. En este sentido, en el comportamiento estático de las mallas, el estudio de la influencia de las tensiones que actúa sobre los componentes estructurales es decisivo tanto para encontrar la forma como para su comportamiento como estructura ante cargas externas, ya que, como veremos en este capítulo, para cada estado de tensión hay una deformación. Es por ello, que centraremos la definición de las mallas pre-flectadas, a través de conceptos emitidos por expertos y desde el sistema de ecuaciones que la constituyen expresando la relación entre el método de búsqueda de la forma, el proceso de erección y su comportamiento ante cargas externas de viento y nieve.

Para este último apartado del capítulo sobre el comportamiento estructural bajo cargas externas, realizamos un estudio de a través de un ensayo de túnel de viento para determinar coeficientes eólicos, lo que permitió determinar los coeficientes de presión sobre la membrana en exposición directa al viento, con el objetivo de precisar las deformaciones correspondientes y los puntos críticos de la estructura.

Para la elaboración de este capítulo realizamos consultas bibliográficas sobre cálculo no lineal, pasantías conjuntas entre en la empresa Technet, que gentilmente cedió los derechos comerciales del programa Easy® v8 para la elaboración de los modelos por computadora, y en el Instituto de Estructura Ligeras de la Universidad de Stuttgart donde se definieron aspectos geométricos y constructivos importantes para el desarrollo de esta investigación

En general, se presentan en este capítulo los conceptos teóricos y principios técnicos, necesarios para la comprensión del comportamiento estructural las mallas pre-flectadas, caso de estudio: cúpula de base cuadrada apoyada sobre cuatro puntos

## **2.1 La presencia del material: el plástico como material de construcción.**

### **El caso de los Plásticos Reforzados con Fibras de Vidrio (PRFV)**

Para la construcción de una malla el material tiene que tener un comportamiento isotrópico, en el caso de los materiales anisótropo como la madera y los plásticos hay que desarrollar estrategias para disminuir este efecto. En el caso específico del material de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) es utilizar perfiles de secciones cuadradas o redondas, huecas o sólidas. Así se logra una mejor distribución de las cargas en los componentes de la malla, dado que las mallas de barras rígidas estarán sometidas no sólo a esfuerzos axiales de compresión y tracción, sino que actuarán también sobre ellas momentos de flexión, torsión y esfuerzos cortantes

Los materiales compuestos específicamente los PRFV (resinas + fibra de vidrio) son materiales heterogéneos, anisótropos desde el punto de vista de su trabajo mecánico y visco-elásticos. La fibra de vidrio está elaborada a partir de materias primas tradicionales necesarias para la fabricación del vidrio: sílice, cal, alúmina y magnesita. A estos constituyentes se les añaden según los tipos de vidrio ciertos óxidos.

Los tipos de vidrio utilizados como fibras son:

- Vidrio A: de alto contenido de sílice. Se utiliza como reforzante y posee gran resistencia química.
- Vidrio B: Posee excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad.
- Vidrio E: Excelentes propiedades mecánicas, sin electricidad estática, buena absorción de la resina, especialmente indicado para el enrollamiento y pultrusión.
- Vidrio ERC: Con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- Vidrio S: Es el más costoso y posee alta resistencia a la tracción y estabilidad térmica. Se utiliza en las construcciones aerodinámicas.
- Vidrio R: Alta resistencia mecánica y módulo de elasticidad.

El vidrio en los plásticos reforzados es usado de diferentes formas, como:

1. Tejido: para conseguir resistencia en dos direcciones.
2. Mat: fieltro de hilos continuos o troceados mantenidos por un ligante adaptado al modelo.
3. Pultrusión: consiste en un método de fabricación en hilos continuos formando una hebra principalmente utilizada en la técnica de "Filament Winding".

Las resinas se pueden clasificar en:

1. Resinas epoxi: son termo-endurecibles que contienen en sus moléculas funciones epoxídicas o glicídicas. La más típica es el diglicidiléster del bisfenol. Las resinas epoxi se presentan en forma líquida más o menos viscosa que pueden ser transformadas en material sólido infusible mediante la acción de endurecedores.

Las resinas epoxi presentan las siguientes propiedades:

- Baja retracción.
- Buen comportamiento a temperatura elevada, hasta 180 °C.
- Buena resistencia a los agentes químicos.

2. Resinas de poliéster:

Son resinas compuestas fenólicas obtenidas por poli-condensación de uno o varios glicoles con uno o varios diácidos en los que por lo menos uno tiene doble enlace etilénico. Entre sus principales propiedades tenemos:

- Resistencia al choque.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al ataque químico, sobre todo a los disolventes orgánicos.
- Excelente adhesión a otras resinas (epoxis, formol, etc).
- Estabilidad dimensional.
- Se alteran con los rayos UV.

Se encuentra en varias presentaciones, polvo de moldeo, en disolventes orgánicos y en resinas líquidas con un porcentaje de agua. Su técnica de moldeo puede ser de alta y media presión o baja presión.

3. Resinas Viniléster:

Son resinas termo-endurecibles de reciente desarrollo. Son el resultado de una poliadición de resina epoxi sobre el ácido insaturado acrílico o metacrílico.

Se presenta en disolución al 30-40% de monómetro reactivo, generalmente estireno y se utilizan de la misma forma que las resinas de poliéster con los mismos aceleradores y catalizadores.

Las principales propiedades son:

- Buenas cualidades mecánicas, excelente resistencia a la fatiga.
- Excelente fluidez que facilita la impregnabilidad y moldeo.

La fabricación de materiales compuestos avanzados:

El poliéster se encuentra entre las resinas existentes de bajo costo y se usa extensamente en la fabricación de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRVF) para aplicaciones

estructurales de construcción industrial que requieren resistencia a la corrosión, a temperaturas por debajo de los 60° C.

Los vinilésteres tienen una resistencia superior y mantienen la rigidez a altas temperaturas hasta 90 °C., resistencia química y elongación del 4% para compatibilidad con fibras de vidrio reforzantes.

Los procesos de fabricación para plásticos reforzados con fibras dependen de su función, tamaño, cantidad, tasa de producción, acabado y costos. Los procesos más comunes son: contacto, laminado continuo, transferencia de resinas y pultrusión.

El proceso de pultrusión es ideal para la fabricación de piezas que tienen una sección transversal constante, tales como perfiles, celosías, postes, varillas, tubos, paneles y pasamanos. Mediante esta técnica pueden obtenerse dimensiones precisas, así como resistencias longitudinales altas y rigidez. La mayor dificultad que presenta son las uniones que suelen resolverse mediante tornillos, remaches o con adhesivos.

La Pultrusión es una técnica de fabricación que permite producir piezas de materiales compuestos que presentan formas parecidas a las fabricadas en acero o el aluminio, a pesar de las diferencias del comportamiento existentes entre ambos materiales, pues el comportamiento del acero es isótropo frente al marcado comportamiento anisótropo de los materiales compuestos.

(Ver anexo 2. Materiales Plásticos reforzados con fibra de vidrio- PRFV).

### **2.1.1. Propiedades Mecánicas**

Las propiedades mecánicas del material compuesto, en cualquier dirección, dependen del porcentaje de fibra, en volumen, orientadas en la misma dirección, así como de las propiedades mecánicas de las fibras, de la longitud, forma, composición de las fibras, de las propiedades mecánicas de la resina y de la adherencia entre las fibras y matriz.

Los perfiles pultrusionados de materiales compuestos están constituidos por:

- Fibras de larga longitud capaces de resistir tensiones longitudinales de tracción y compresión, proporcionando rigidez y resistencia al impacto.  
Las fibras tienen influencia en las propiedades eléctricas: el vidrio ofrece aislamiento eléctrico y transparencia electromagnética, mientras que la fibra de carbono presenta conductividad térmica.
- Matriz o resina.  
Las propiedades de la matriz influyen en:  
las resistencias a cortante del material compuesto. La matriz, también proporciona soporte lateral al pandeo de las fibras bajo sollicitaciones de compresión.
- Aditivos: Sustancias añadidas a la matriz que permiten mejorar o complementar las propiedades físico-químicas del material compuesto, reducir la retracción (dilatación) o retrasar el proceso de endurecimiento del material durante su fabricación, pueden ser pigmentos, retardadores del fuego, etc.

En general, los perfiles pultrusionados incorporan fibras unidireccionales y capas de tejido que proporcionan fibras en dirección transversal a la del pultrusionado contribuyendo a una mejora de la resistencia del perfil a esfuerzos transversales y a las uniones atornilladas.

La fibra de vidrio de estos perfiles es del tipo “E” con un contenido de fibra entre un 45% a un 75% en peso y una resina termoestable viniléster.

Datos presentados en la ponencia “ Pasarela peatonal de materiales compuestos de fibra de vidrio” por la empresa PEDELTA, Ingeniería de Estructuras. Barcelona (2002).

Propiedades	Und.
Resistencia Cortante (MPa)	23
Módulo Cortante, G (GPa)	3
Densidad (kg/dm <sup>3</sup> )	1.8
Coefficiente dilatación térmica (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	8
Coefficiente Poisson $\nu_{12}$ (-)	0.23
Coefficiente Poisson $\nu_{21}$ (-)	0.09

Tabla N° II-1. Propiedades mecánicas de los plásticos compuestos

Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

Propiedades	Uni.
Resistencia Tracción (MPa)	81.4
Resistencia Flexión (MPa)	137.9
Modulo Deformación (Gpa)	3.7
Deformación de Rotura (%)	5

Tabla N° II-2. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

Propiedades mecánicas de la resina

Propiedades	Und.
Densidad (Kg/dm <sup>3</sup> )	2,6
Resistencia Tracción (MPa)	3,400
Modulo Deformación (GPa)	72.4
Deformación de Rotura (%)	4.8

Tabla N° II-3. Propiedades mecánicas de las resinas

Datos tomados de la página web del fabricante (www.nioglas.com-2002)

Propiedades Físicas		Unidades		Norma
Peso específico	1,65 / 1,85	Kg/dm <sup>3</sup>		UNE 53020-73
Contenido en vidrio	50 / 70	%		
Absorción de agua	0,5 / 1,0	% peso		UNE 53028-55
Coefficiente dilatación lineal	15 / 17	1/°C.106		UNE 53126-79
<b>Propiedades Mecánicas</b>				
Resistencia a la flexión	300 / 600	MPa		UNE 53022-76
Resistencia a la tracción	400 / 650	MPa		UNE 53023-86
Resistencia a la compresión	150 / 300	MPa		UNE 53024-86
Módulo de elasticidad (E)	15000 / 32000	MPa		UNE 53022-76
Resistencia al impacto	150	daN cm/cm2		UNE 53021-81
<b>Propiedades Térmicas</b>				
Conductividad térmica	0,2 / 0,3	Kcal / mH °C		UNE 53037-76

Tabla N° II 4. Propiedades mecánicas de los plásticos compuestos fabricados por NIOGLAS

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Tabla comparativa de los módulos de elasticidad del acero y PRFV (KN/m<sup>2</sup>)

	<b>Acero</b>	<b>PRFV</b>
<b>Modulo de elasticidad (KN/m<sup>2</sup>)</b>	2,1x10 <sup>8</sup>	2,3x10 <sup>7</sup>
<b>Resistencia a la rotura (KN/m<sup>2</sup>)</b>	3,6 x10 <sup>5</sup>	6,5 x10 <sup>5</sup>
<b>Resistencia a tracción (KN/m<sup>2</sup>)</b>	2,6x10 <sup>5</sup>	4x10 <sup>5</sup>

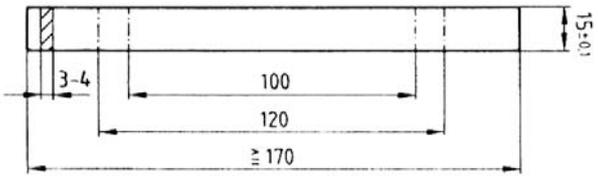
Tabla Nº II-5. Comparativa de los módulos de elasticidad entre el acero y PRFV (KN/m<sup>2</sup>)

Los materiales compuestos de PRFV tiene una resistencia a la tracción dos veces mayor que la del acero y son tres veces mas flexibles que el acero, lo que los hacen idóneos para aplicarlos a un sistema constructivo que tiene como objetivo la pre-flexión de una malla rígida para lograr la rigidez global. Entre otras ventajas para su aplicación en este proyecto pueden mencionarse los siguientes:

- Alto módulo de flexión.
- Posibilidad de colorear.
- Longitud máxima: 13.000 mm.
- Anchura máxima: 650 mm.
- Altura máxima: 400 mm.
- Pared máxima: 30 mm.
- Pared mínima: 2 mm.
- Radios mínimos: 1 mm.
- Tolerancia en espesor: +/- 0,1 mm.
- Tolerancia de corte: +/- 2%.

## 2.2.2 Ensayo experimental de comprobación del límite de rotura del material

Con el objetivo de comprobar el límite de rotura del material utilizado se prepararon tres probetas del material compuesto de acuerdo con la norma ISO/DP527, para someterlas a esfuerzos de tracción, determinar la curva tensión-deformación y compararla con las curvas teóricas típicas. (Sin determinar el módulo de elasticidad).

<b>Información del material</b>	
<p><b>Tipo de material:</b> Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV).  <b>Referencia comercial:</b> Nioglas.  <b>Método de fabricación:</b> Pultrusión.  <b>Antecedente:</b> Aplicación estructural en la pasarela peatonal en Lleida. Catalunya (2001).</p>	
<b>Información de las probetas</b>	
<p><b>Dimensiones de la probeta:</b>                      Largo: 200 mm                      Ancho: 10 mm                      Espesor: 4 mm                      Área: 40 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Nº de probetas ensayadas:</b> 3</p> <p><b>Espacio para mordazas:</b> 40 mm por cada</p>	 <p>Tomado de:                      Guía de materiales plásticos. Propiedades, ensayos y parámetros.</p>

lado, evitando su deslizamiento.	Hanser. Norma UNE-EN ISO 527 (I y II), AENOR-1997
	
<p>Características de la máquina:</p> <p><b>Modelo:</b> ELID-50/W (IBERTEST)</p> <p><b>Velocidad del ensayo:</b> entre 0.01 y 200 mm/seg</p> <p><b>Tipo de mordazas:</b> Cabezales de tracción con sistema de cierre en cuña modelo CTV</p> <p><b>Grado de exactitud:</b> Desplazamiento: 0.001mm Fuerza: 0.0001KN Tensión: 0.001MPa</p> <p><b>Software de medición:</b> Wintess</p>	<p>Ecuación de cálculo de la tensión:</p> $\sigma = \frac{F}{A}$ <p>Donde: F: Fuerza en Kilos A: Área de la sección transversal inicial de la probeta en mm<sup>2</sup></p>

Cuadro N° II-1. Datos del ensayo de límite de rotura

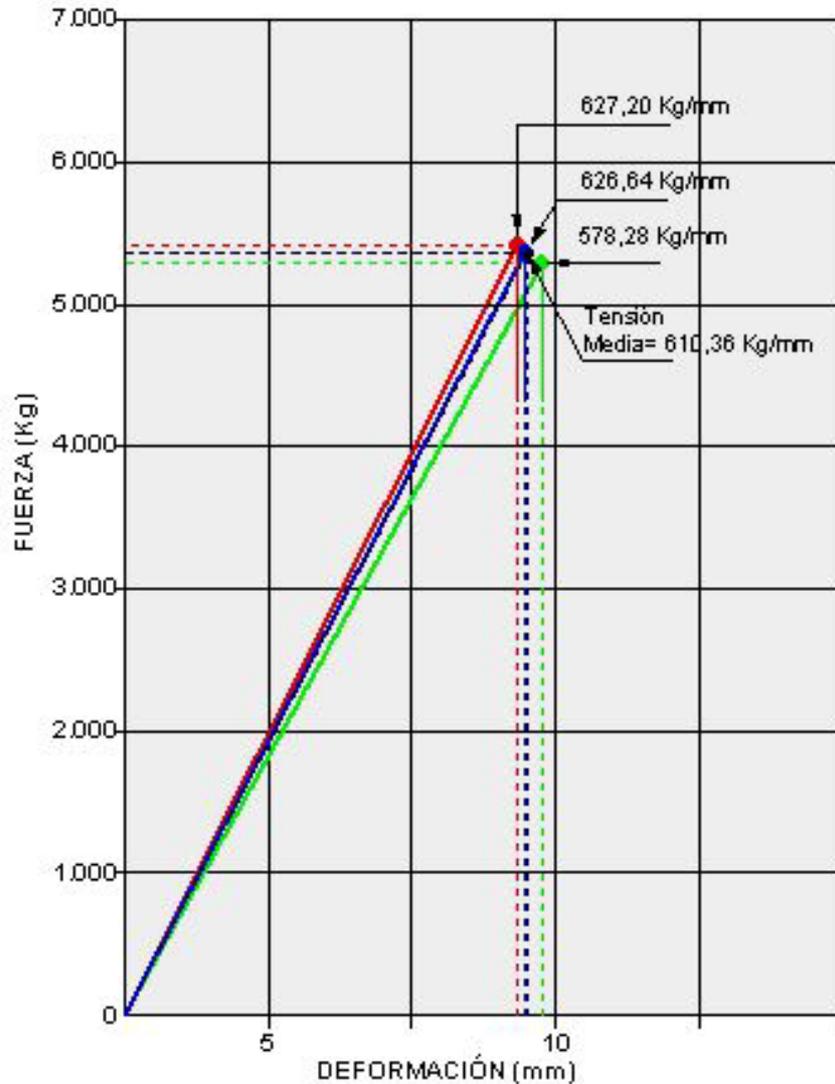
<b>Probetas Post-ensayo</b>	
	<p>Las tres probetas al llegar a su tensión máxima de tracción explotan debido a que la matriz revienta y las fibras tienden a desgarrarse. En el gráfico se puede observar como la fibra y la resina de poliéster tienden a separarse.</p>

## Resultados

### TENSION-DEFORMACION PROBETAS POLIESTER CON FIBRA DE VIDRIO

No Muestra	Dimensiones (mm) largo x ancho	espesor (mm)	C. Rotura Fuerza (Kg.)	Dist. recorrida Deformación (mm)
1	200x10	4	5.833	9,30
2	200x10	4	5.715	9,12
3	200x10	4	5.592	9,67
Media			5.713	9.36

### Curva Tensión-Deformación obtenida



Cuadro N° II-2. Resultados del ensayo de límite de rotura

En este ensayo se puede observar que el límite elástico del material (PRFV) es el límite de rotura.

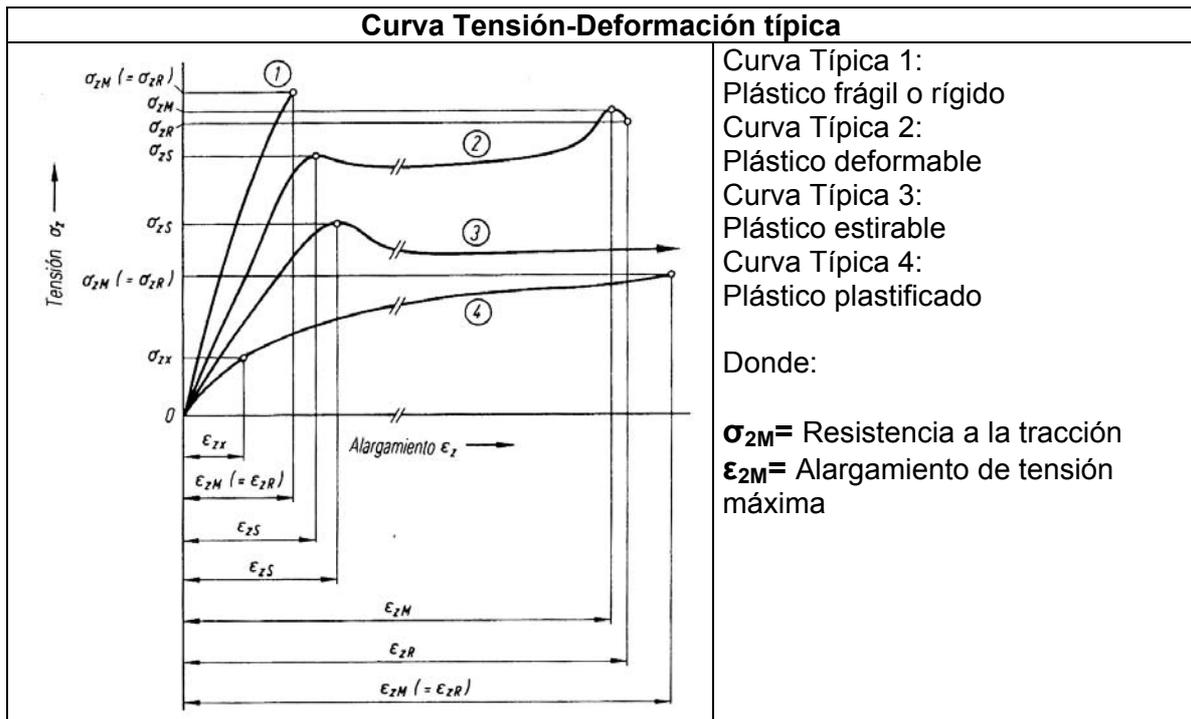


Gráfico N° II-1. Resultados del ensayo de límite de rotura

Fuente: AENOR - ensayos

Comparando la curva resultante de las probetas y las curvas típicas se observa que el material producto de este estudio corresponde a la curva N° 1 definida como plástico frágil o rígido. El material es estructural porque tiene en su composición más del 40% de contenido de fibra, por otra parte no tiene ductilidad ya que al llegar a su límite elástico estalla teniendo una deformación por desgarre de las fibras.

Cálculo de la resistencia a la tracción ( $\sigma_{LE}$ ) con los datos obtenidos experimentalmente.

<p>Datos para el cálculo:</p> <p>Resistencia a la tracción media (<math>\sigma_{2M}</math>): <b>5.713 Kg</b></p> <p>Alargamiento Promedio (<math>\epsilon_{2M}</math>): <b>9.36 mm</b></p> <p>Área de la probeta(A): <b>40 mm</b></p>	<p>Ecuación:</p> $\sigma_{LE} = \frac{\sigma_{2M}}{A}$ <p>Sustituyendo:</p> $\sigma_{LE} = 142,83 \text{ Kg/mm}^2 = 14.283 \text{ Kp/cm}^2$ <p>Coefficiente de minoración de la tensión del límite de rotura de tracción = 2</p> $\sigma_{LE} = 71,42 \text{ Kg/mm}^2 = 7.141 \text{ Kp/cm}^2$
	<p>Equivalencias:</p> <p><math>\sigma_{LE} = 700,40 \text{ Mpa}</math></p> <p><math>\sigma_{LE} = 700.400 \text{ KN/m}^2</math></p>

Tabla N° II-6. Resultados del ensayo de límite de rotura

## Definición geométrica

### 2.2. Obtención de la forma (Form-finding)

Las geometrías con formas no conocidas usualmente no pueden ser descritas por simples funciones matemáticas y por consiguiente, requieren un proceso conocido como “form-finding” o de obtención de la forma. El objetivo de la obtención de la forma es producir formas con estructuras óptimas estables, en equilibrio y con rigidez, a través del uso de una cantidad mínima de material. En general, el proceso de obtención de la forma de las superficies de las membranas y mallas contempla:

1. La realización de modelos físicos a escalas reducidas.
2. El desarrollo de modelos por computador usando una variedad de técnicas numéricas.

Los modelos físicos son importantes porque son un verificador de los resultados del modelo informático, el modelo físico requiere una secuencia de actividades manuales para producir un modelo refinado con muchísimo cuidado y precisión y asegurar que las dimensiones pueden ser usadas en las fases de análisis estático y de diseño constructivo, ya que los errores longitudinales tienen efecto directo tanto en la tensión de la superficie como en los componentes estructurales. Los modelos físicos ofrecen una impresión visual instantánea de la superficie.

Los modelos por computadora de las estructuras de mallas presentan información numérica y gráfica. Describe la forma de la estructura, tensiones y deformaciones bajo ciertas condiciones de carga. La información se obtiene desde algoritmos numéricos a través de un proceso interactivo de ajustes geométricos de superficies en tensión y en equilibrio.

Mucho han sido los aportes en el estudio numérico de las formas no conocidas entre los que podemos mencionar a Euler (1744) con las primeras ecuaciones matemáticas describen las superficies mínimas, D’Arcy Thomson muestra con el logaritmo espiral que los vectores se cortan por sucesivos radios, al igual los ángulos vectoriales crecen continuamente sin cambiar la forma. La ecuación de tensión de Von Mises, implica que la superficie inicial producida se expande uniformemente y en proporción a la raíz cuadrada de las tensiones. Young (1805) y Laplace (1806) demostró que para la superficie curva, la tensión en la superficie en cualquier punto es igual a la relación entre la tensiones internas y las externas de la superficie y el radio de las curvaturas principales. Las investigaciones del Instituto de Estructuras Ligeras (IL) de la Universidad de Stuttgart (1964-1991), bajo la dirección del Dr. Frei Otto, en el estudio en las formas estructurales que obedecían a “principios de ligereza” de acuerdo con una interpretación de leyes naturales del comportamiento estructural.

Este trabajo exigió la realización de los dos tipos de modelo, físico y computarizado, dado que la experiencia ha demostrado que la combinación de ambos son la mejor estrategia metodológica que usar exclusivamente uno de ellos, ya que se pueden determinar desavenencias muy útiles para la investigación. Estos modelos se emplearon para los procesos de obtención de la forma tanto de la malla como de la membrana, la malla formada por barras rígidas a través de pre-flexión de las barras y para la membrana textil buscar su forma pretensada. Ambas actuarán conjuntamente en una sola estructura aportándose prestaciones.

El proceso de obtención de la forma debe relacionar la forma con los esfuerzos iniciales y finales de la deformación de la malla, material, proceso de montaje y detalles constructivos. Lo cual llevó a diseñar unas condiciones que debía cumplir los modelos físico e informático para el proceso de obtención de la forma:

1. Las barras deben ser rígidas, de longitudes normalizadas y con capacidad para ser flectadas.
2. Los nudos en el caso del modelo físico, serán realizados con piezas existentes en el mercado y de fácil realización.
3. Además, deberán:
  - permitir el paso de la barra y su transformación de la posición plana a la posición deformada a través de todas las posiciones intermedias, otorgando suficiente libertad inicial, sin que las barras se suelten ni que se produzcan desplazamientos comportándose como un mecanismo.
  - minimizar el roce durante el proceso de deformación para evitar el desgaste excesivo de los componentes y piezas.
  - permitir su rigidización para su comportamiento como estructura.
4. Los nudos de las bases deberán ser articulados sin que se produzcan momentos de flexión.
5. La malla plana será simétrica con barras de igual longitud con un sólo tipo de nudo.
6. La forma final será el resultado de deformar la malla al aplicarle una fuerza externa y la deformación será por curva de flexión, sin cambio de las longitudes de las barras ni de las condiciones de borde.
7. Las diagonales de rigidización serán sustituidas por una membrana pre-tensada.
8. El proceso de búsqueda de la forma tendrá que incorporar el método de erección y montaje de la malla, así como también los detalles constructivos de los nudos.

### **2.3 Simulación por modelo físico:**

El modelo fue realizado en el Laboratorio de Construcción y de Maquetas de la Escuela de Arquitectura del Valles (ETSAV-UPC), se realizó tanto el modelo físico de las barras pre-flectadas como de la membrana pretensada.

Obtención de la forma de la malla pre-flectada:

Consistió en construir una retícula formada por barras rígidas y unidas por nudos con tornillos pasantes. Como la gran mayoría de los perfiles existentes en el mercado cuentan con una longitud estándar de 6 m, seleccionamos esta medida para evitar el corte de las barras del modelo y no generar desperdicios. Las características del modelo fueron las siguientes:

Características del modelo			
<p><b>Barras</b> Perfil "U" de plástico poliéster de 5 mm x 5 mm. perforadas cada 160 mm.</p> <p>Longitud simulada: 6 m Longitud real: 1 m Escala del modelo: 1:6 Φ simulado 30 mm.</p>		<p><b>Bases</b> Barra maciza de perfil cuadrado de 5 mm x 5 mm para encajar en los extremos de la barras en "U", con un terminal de aro como anclaje.</p>	
<p><b>Nudos</b> Formados por tornillos pasantes, arandelas y tuercas para generar presión sobre un trozo de perfil "U" encargado de unir las dos barras de perpendiculares colocado en el sentido inverso de las "U" de las barras.</p>		<p><b>Retícula</b> Malla formada por un damero cada 160 mm (en escala cada 1 m) formada por 6 barras en las dos direcciones.</p>	

Figura N° II-1: Características del modelo físico

La malla articulada en los nudos de tornillos pasantes, presenta dos niveles de transformabilidad. E primero como una estructura reticular plana en forma de paquete compacto facilitando su proceso de transporte para luego ser desplegada en el lugar de su montaje.

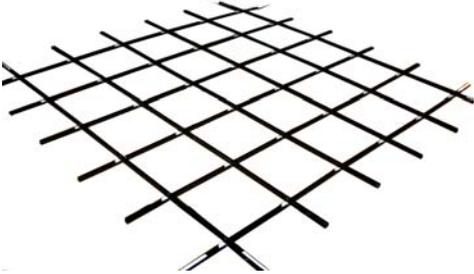
Primer nivel de transformabilidad		
Posición plegada	Posición Intermedia	Posición desplegada
 <p>En su configuración cerrada el modelo tiene dos metros</p>		

Figura N° II-2: Primera transformación de la malla

En este primer nivel de transformabilidad de la malla, los nudos funcionan como un nudo tipo tijera, deben tener holgura suficiente para permitir que la malla pase de su configuración totalmente cerrada a la abierta plana. El nudo sólo debe permitir el giro y evitar que las barras puedan soltarse o desplazarse en cualquiera de las direcciones. Hasta esta posición en la malla sólo actúa el peso propio.

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Para desarrollar el segundo nivel de transformabilidad, es necesario introducir la pre-flección y deformar la malla. Para determinar la altura de arco de borde se realizó una prueba doblando una barra hasta alcanzar la altura útil habitable de 2.10 m que en el modelo fue de 350 mm.

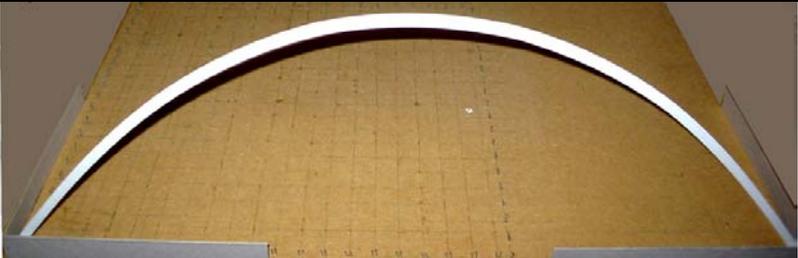
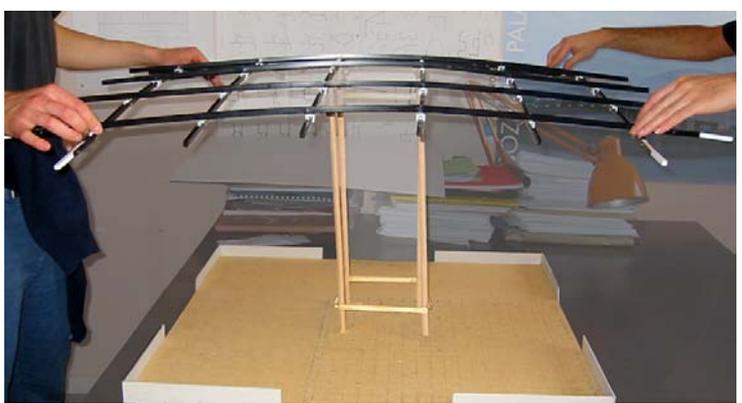
<b>Prueba de flecha del arco</b>	
	Dimensiones simuladas: $f_{arc} = 2.10 \text{ m}$ Luz entre apoyos: 4.40 m
	Dimensiones del modelo: $f_{arc} = 350 \text{ mm}$ Luz entre apoyo: 730 mm

Figura N° II-3: prueba de flecha del arco

<b>Segundo nivel de transformabilidad – form finding por flexión</b>	
<b>Posición inicial</b>	
	<p>Los cuatro nudos de la malla se hace coincidir con los soportes de la estructura del andamio. Estos nudos sólo podrán permitir el giro mas no desplazarse.</p> <p>Se pensó de esta manera, ya que la fuerza de la gravedad puede contribuir minimamente a la deformación de la malla por peso propio.</p>
<b>Posición intermedia</b>	
	<p>A la malla apoyada se le aplicó una fuerza externa gradualmente incrementada en los nudos de la base. Toda la malla fue capaz de repartir la carga homogéneamente a todos los componentes comenzando el proceso de deformación.</p> <p>En este punto los nudos tienen sólo las restricciones de movimiento que le impone la configuración de la malla. Son conexiones móviles, permitiendo el giro de las barras y cambiando la configuración de la retícula de cuadrados a rombos.</p>

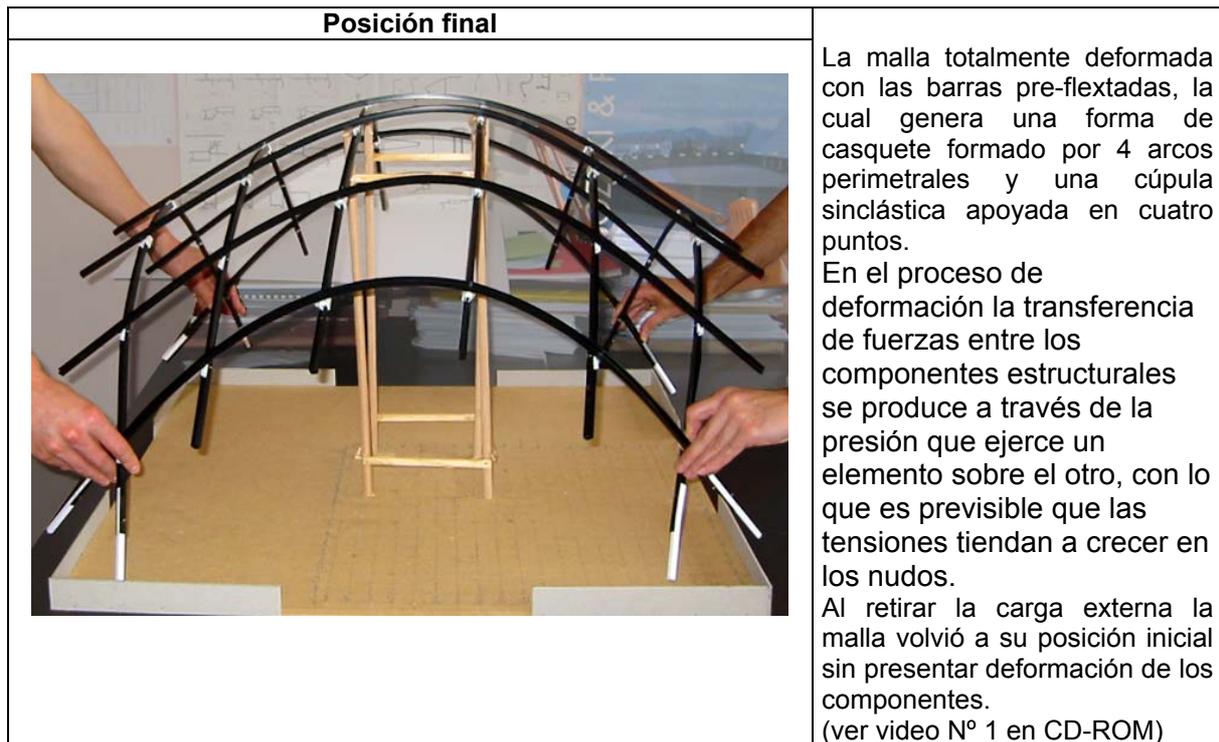
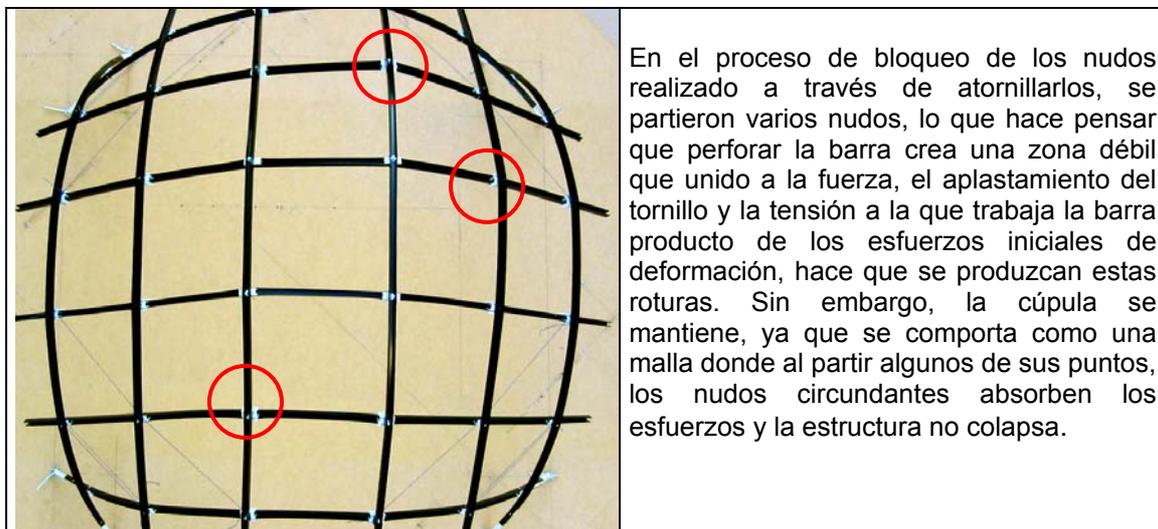


Figura N° II-4: Segunda transformación de la malla. Proceso de obtención de la forma de la malla

Para el paso del mecanismo móvil a una estructura y poder obtener las coordenadas de la cúpula, es necesario rigidizar los nudos restringiendo el giro, para realizar este proceso se anclaron los nudos de las bases a la plataforma y se apretaron todos los nudos de la malla y los arcos perimetrales, pudiendo retirar el andamio de soporte.



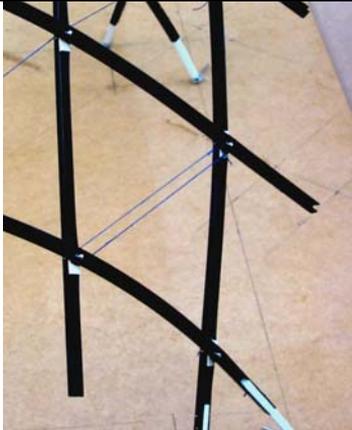
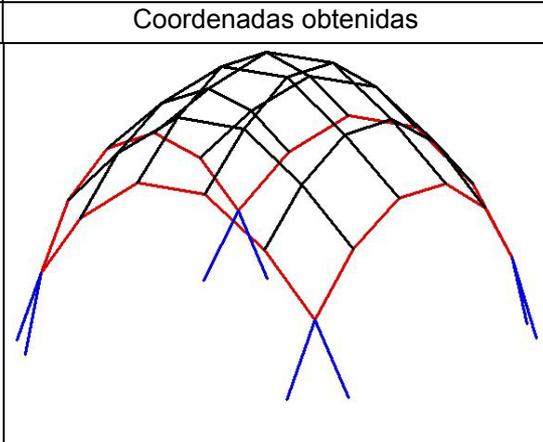
			<p>Al arriostrar la diagonal más corta de los cuatro rombos de las esquinas de la cúpula (pechinás) entró en tensión y evitó que los arcos perimetrales se abrieran.</p>
		<p>Malla deformada</p>	<p>Los nudos de las bases fueron anclados a la plataforma a través de unos pasadores de lo que resultó una unión articulada. Son momento de flexión para que la cúpula pueda absorber deformaciones producto de los cambios térmicos. Las coordenadas se midieron con cinta métrica guiado por un hilo entre el nudo y su proyección en planta. Luego se promediaron los valores de los puntos simétricos.</p>
		<p>Coordenadas obtenidas</p>	

Figura N° II-5: Resultados geométricos

### Obtención de la Forma de la membrana pretensada y su unión con la estructura pre-flectada:

Este modelo consistió en generar una superficie anticlástica pretensada a partir de las coordenadas generadas por la obtención de la forma de la malla pre-flectada. Se reprodujeron los puntos de las coordenadas de los arcos con unos bastidores en triángulo de madera atornillados a una base y un punto central que coincide con el centro de la malla pre-flectada.

	<p>Para generar la membrana se utilizó tela de lycra, ya que es un tejido que se estira muy bien en los dos sentidos. Cuando estuvo bien tensada la tela se marco en los puntos altos de los triángulos.</p>
	<p>La membrana textil se desmontó de los bastidores y se colgó del punto central de la malla pre-flectada para luego llevar los puntos marcados en la tela hasta los nudos de los arcos perimetrales y obtener la membrana pretensada dentro de la malla pre-flectada.</p>
	<p>Luego fueron cortados los sobrantes de tela y reforzados con hilo los bordes de la tela. Al finalizar este proceso pudimos observar como las tensiones en la membrana tienden a concentrarse en el punto alto y en las cuatro esquinas, así como también se observó que existe un punto de equilibrio entre la pretensión de la tela y las barras, que si es excedido la malla de barras pre-flectadas comienza a deformarse. En las imágenes inferiores se observa una vista interna del espacio resultante, así como un detalle de la unión de la membrana textil y la malla de barras.</p>
	

Figura N° II-6: Obtención de la forma de la membrana

## 2.4 Simulación por computadora

Para simular la mecánica del modelo físico fue necesario seleccionar un paquete informático. En nuestro caso trabajamos con tres programas, el primero fue Wintess, programa interactivo de cálculo de estructuras tensadas diseñado en ETSAV-UPC (Sastre 2002), que calcula la catenaria en función del coseno hiperbólico producido al aplicar a una malla plana de hilos, una carga en cada nudo. Este procedimiento se suspendió porque el resultado fue análogo al del modelo colgado de cadenas o hilos y, al compararlo con las curvas de flexión de la malla, estableció unas diferencias considerables. Entre ellas se puede mencionar la condición de borde de los arcos perimetrales: mientras en el modelo físico las curvas eran cóncavas hacia fuera de la malla en el modelo informático eran convexas hacia dentro de la malla. Otro de los parámetros donde se encontraron diferencias fueron en las alturas y en la forma global.

El segundo intento por realizar la obtención de la forma fue con el programa SAP-2000. Se construyó una malla rectangular introduciendo las propiedades del material (módulo de elasticidad, modulo cortante, coeficiente de Poisson, densidad y las propiedades de la sección).

Los cuatro nudos centrales se restringieron los movimientos y giros. Los nudos restantes de la malla eran totalmente libres en los ejes x,y,z, en este caso los movimientos y giros están restringidos por la configuración de la malla. Se aplicó una fuerza vertical externa en los nudos de los extremos, el programa dio como resultado una deformación muy similar a la del modelo físico en términos globales, pero al no ser un programa de cálculo de segundo orden, los resultados de la deformación no recogía la distancia entre los extremos de las barras de la malla al flectar, teniendo como resultado una barra estirada, por lo que los resultados no eran admisibles.

El tercer programa utilizado fue el paquete informático **EASY®** Versión 8 (2003), producido por la empresa alemana Technet-gmbh. Es un programa interactivo de calculo de segundo orden basado en el “método de la densidad de fuerza” (ver anexo N° 3), originalmente desarrollado para el cálculo de membranas a tensión. La versión usada para la realización de este capítulo fue de última generación para el momento de realizar esta actividad. El paquete informático cuenta con cuatro sub-programas: “**Easy-Form**” calcula la obtención de la forma en equilibrio. “**Easy-Statical Analysis**” calcula y analiza estructuras derivadas del proceso de la obtención de la forma bajo una carga externa de peso propio, nieve o viento por procesos no-lineales. “**Easy-Beam**” calcula y analiza barras rígidas con todos los datos como áreas, momentos de inercia, sección, módulo de elasticidad y sistema de coordenadas bajo una carga externa de peso propio, nieve o viento por procesos no-lineales. “**Easy-Cut**” descompone la superficie de doble curvatura en patrones planos de acuerdo con líneas geodésicas.

Como el subprograma “EASY-BEAM” puede calcular de manera conjunta o separada membranas pre-tensadas, los elementos a compresión y mallas constituidas por elementos rígidos a flexión, aunque no de manera directa, ya que el programa no tiene desarrolladas herramientas gráficas para elaborar el modelo, lo cual significo que la construcción del modelo se tuvo que realizar introduciendo los datos manualmente. Sin embargo el programa resultó ajustado a las necesidades de este trabajo.

El objetivo fue encontrar una forma en equilibrio con nuevas coordenadas partiendo de una malla plana.

La estructura debe cumplir los siguientes requisitos:

### CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

1. La condición de equilibrio: la fuerza en cada nudo libre es cero.
2. El material se comporta de acuerdo a la ley de Hooke
3. La geometría está en estado de deformación, donde para cada estado de tensión hay un estado de deformación.

En este apartado se estudia el modulo estructural y comprobaremos numéricamente estos requisitos.

### Procedimiento General para la obtención de la forma

El fundamento geométrico que debe cumplir la deformación de la malla se puede representar en el siguiente gráfico:

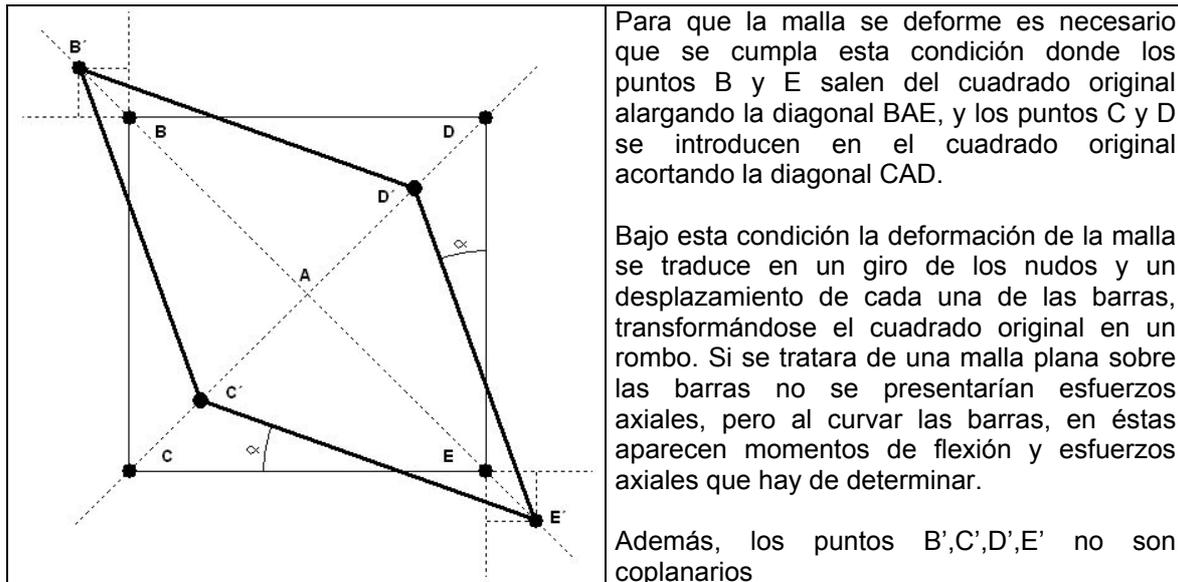


Figura N° II-7: Fundamento geométrico

Los archivos de entrada del sistema son:

1. Introducción de los tipos de ligamientos de los nodos y el grado de libertad permitido.
2. Coordenadas de todos los puntos de la malla en su posición plana, indicando los puntos fijos con restricciones determinando igualmente las longitudes de las barras.
3. Valores de la relación fuerza-longitud (densidad de la fuerza) de los elementos de barras (ejemplo 0,1 a lo largo de toda la malla).
4. Las propiedades del material (área de la sección, módulo de elasticidad, momentos de inercia y momentos resistentes a la flexión y a torsión).
5. Los parámetros de las barras de la malla y la condición de borde de los arcos para determinar la forma de transmisión de esfuerzos y momentos.

### Construcción del modelo

**Primer modelo:** La malla como mecanismo

Hay que destacar que los ingenieros que desarrollan el programa Easy habían participado en el cálculo de los modelos colgados realizados en el instituto de Ingeniería Geodésica conjuntamente con el Instituto de Estructura ligeras (IL) ambos de la Universidad de Stuttgart. Sin embargo, era la primera vez que el equipo, que asesoró el proceso de obtención de la forma para este trabajo, junto con los tutores y el autor, participaban en la

realización de los cálculos del proceso de obtención de la forma por pre-flexión de las barras, lo cual significó la realización de varias pruebas para ir descartando posibilidades. Las propiedades asignadas a los nudos tuvieron que editarse manualmente hasta lograr la simulación correcta, ya que el programa no contempla herramientas para realizarlo, como se dijo anteriormente. Siempre se tomó como referencia importante la mecánica del modelo físico. Lo que se presenta en este apartado es un resumen de los pasos realizados.

La simulación parte de la malla plana totalmente abierta, la cual se dibujó utilizando la herramienta "FRONT" del sub-programa "FORMFINDING", donde se generaron las características topológicas de la malla, números de nudos y barras, sus coordenadas iniciales y longitudes de barras. Luego fue exportado al subprograma "EASYBEAM" para incorporarle todas las propiedades mecánicas del material de las barras y las condiciones de restricción y grado de libertad de los nudos para obtener la deformación a flexión de las barras. (Ver Apéndice A. Construcción de modelo informático)

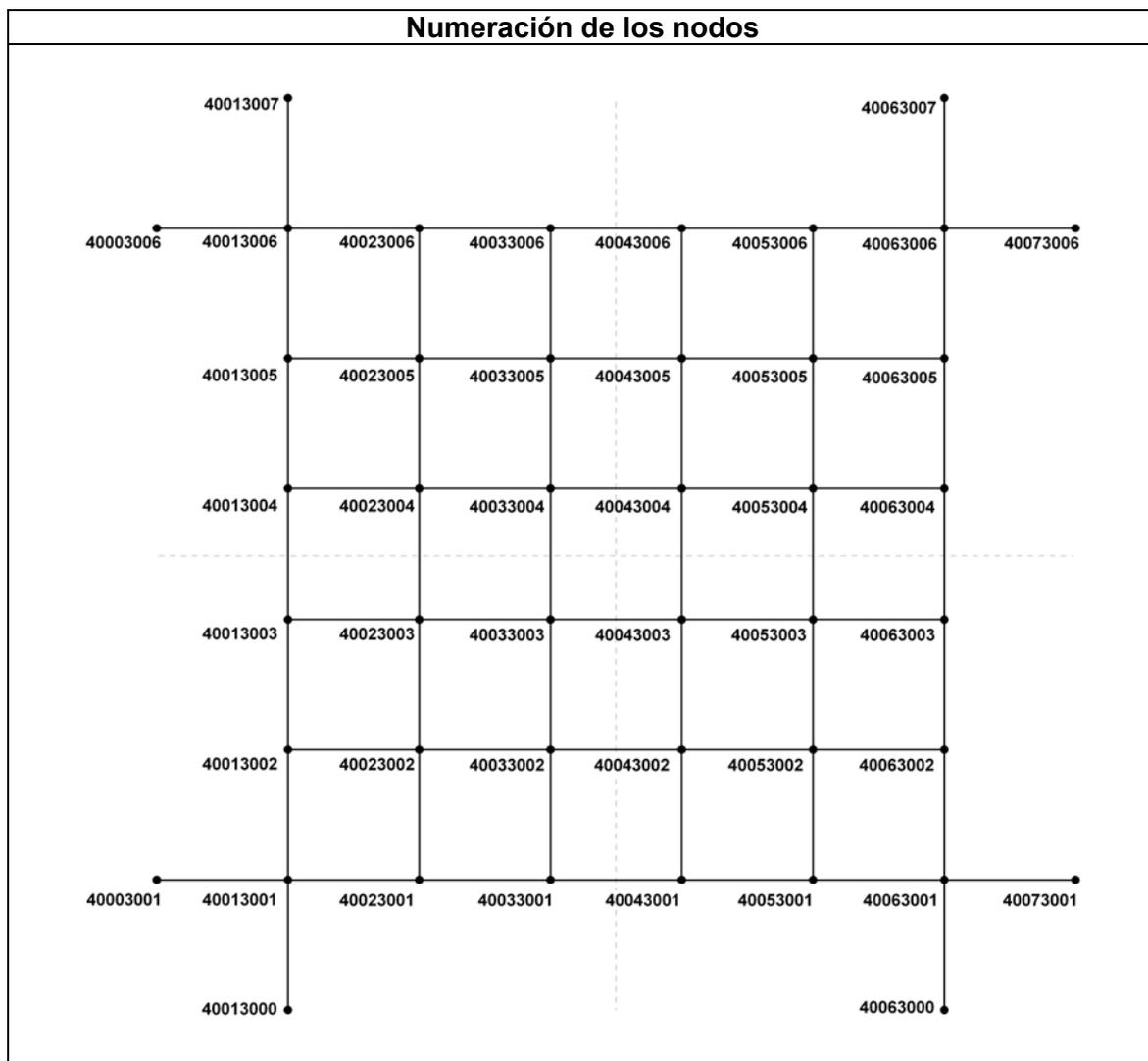


Figura N° II-8: Numeración de los nudos

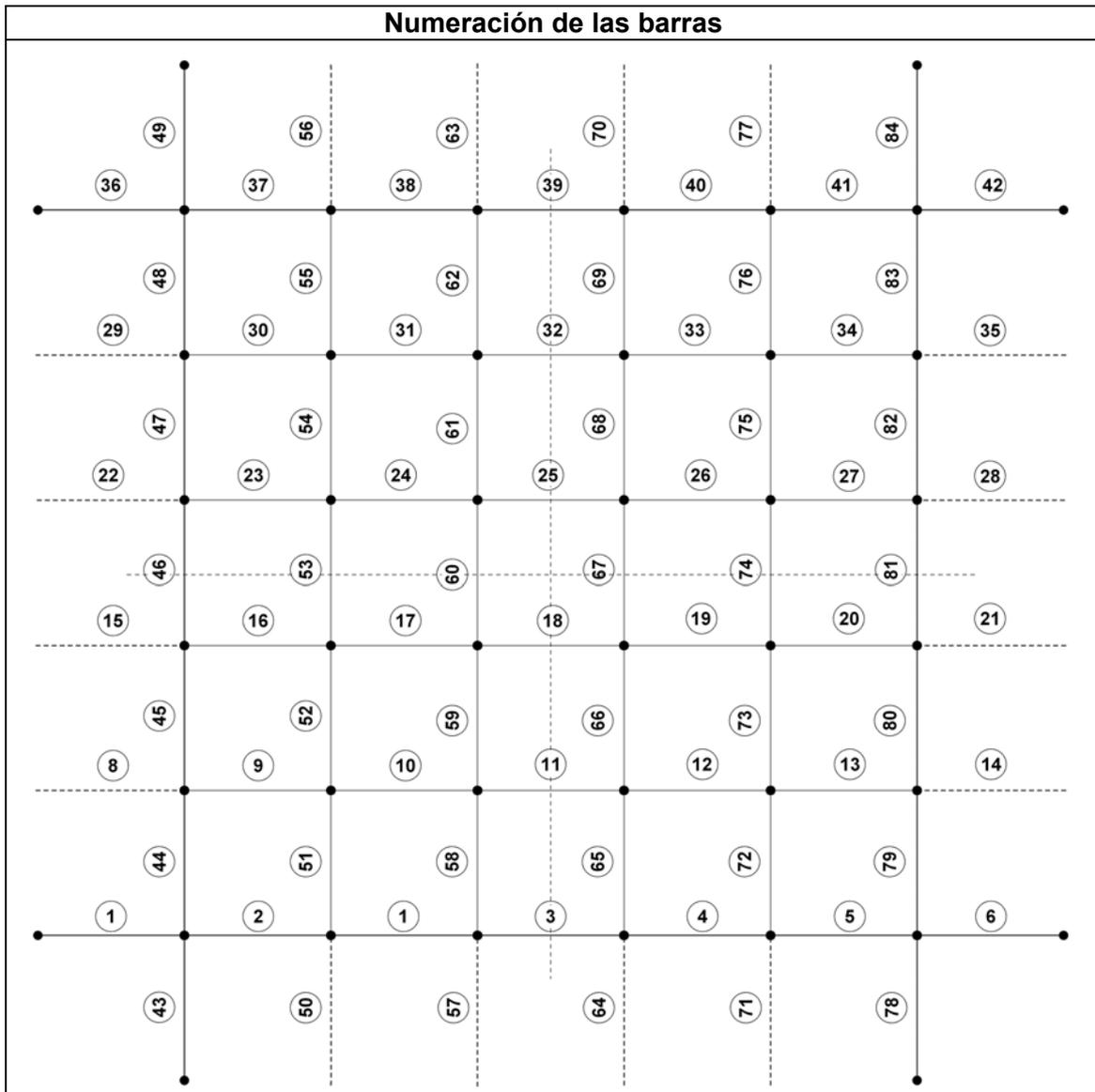


Figura N° II-9: Numeración de las barras

Es de hacer notar que las barras marcadas con los números 8, 14, 21, 22, 28, 29, 35, 50, 56, 57, 63, 64, 70, 71 y 77, y representadas en línea segmentada en la figura II-9, se introdujeron en el modelo para que el programa pudiera simular los nudos de los arcos perimetrales articulados con doble punto de giro. De lo contrario, el programa asume que los nudos son rígidos e introduce deformaciones no deseadas sobre los arcos cuando se les introduce la carga de la pre-flexión. A estas barras no se le asignaron propiedades ni cargas.

Para que la malla se deformara como el modelo físico, había que de introducir a los nudos un mecanismo, por lo que hubo que realizar cambios en la configuración de la malla creada por el sub-programa "FRONT" que asume, automáticamente la condición de nudos rígidos, como se dijo anteriormente. Para definir estos cambios el estudio del comportamiento mecánico del modelo físico fue la clave fundamental para lograr la simulación.

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Para que el modelo matemático simulara que la malla está conformada por nudos y barras pasantes y continuas se separaron otorgándole a cada nudo un doble punto de giro (ROT), es decir en una dirección la barra tiene giro los ejes X,Y,Z y en la que cruza tiene giro en los ejes X',Y',Z', vinculados por un resorte.  
(Ver apéndice N° A Construcción del modelo informático)

### Condiciones de los nudos

Nudos centrales			Nudos Perimetrales (*)			Nudos de la Base		
<b>Nº de nudos</b>		4	<b>Nº de nudos</b>		32	<b>Nº de nudos</b>		8
<b>Ubicación</b>		Centrales	<b>Ubicación</b>		Perímetro e interiores	<b>Ubicación</b>		Bases
Condiciones:			Condiciones:			Condiciones:		
<b>TRANS (Desplaz)</b>	<b>ROT (giros)</b>		<b>TRANS (Desplaz)</b>	<b>ROT (giros)</b>		<b>TRANS (Desplaz)</b>	<b>ROT (giros)</b>	
Fijo	Resorte	X, X'	Libre	Resorte	X, X'	Libre	Libre	X, X'
Fijo	Resorte	Y, Y'	Libre	Resorte	Y, Y'	Libre	Libre	Y, Y'
Fijo	Resorte	Z, Z'	Libre	Resorte	Z, Z'	Libre	Libre	Z, Z'

Tabla N° II-7: condición de los nudos

Como se puede observar en el cuadro anterior los nudos centrales de la malla tienen restricciones de desplazamiento en los ejes X,Y,Z y X',Y',Z', los nudos de la malla se pueden desplazar y los nudos de las esquinas no tienen ninguna restricción.

### Propiedades de la barra

Propiedades de la Sección				
<b>Long. de Barras entre nudos (m)</b>		1		
<b>Sección (mm)</b>		Diámetro exterior (D)	Diámetro interior (d)	
		32	26	
<b>Espesor (mm)</b>		3		
<b>Modulo de elasticidad del material (*)</b>		23.000.000 KN/m <sup>2</sup>		
<b>Densidad (*):</b>		1.650 Kg/m <sup>3</sup> (**)		
(*) Datos suministrado por el fabricante NIOGLAS ver p. 81 cap II. (**) Con este valor, el área de la sección y la longitud de la barra el programa calcula el peso propio de la estructura				
<b>Momento de Inercia torsor (I<sub>x</sub>) (m<sup>4</sup>)</b>	<b>Momento de Inercia flector (I<sub>y,z</sub>) (m<sup>4</sup>)</b>	<b>Momento resistente a la Flexión (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Momento resistente a Torsión (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área de la sección (m<sup>2</sup>)</b>
$I_x = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)$	$I_{y,z} = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$	$W_{y,z} = \frac{I}{D \cdot 1/2}$	$W_x = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{16 D}$	$A = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}$
Sustituyendo $I_x = 5.800802 \times 10^{-8}$	Sustituyendo $I_{y,z} = 2.9040 \times 10^{-8}$	Sustituyendo $I_{y,z} = 1.8150 \times 10^{-6}$	Sustituyendo $I_{y,z} = 3.63002 \times 10^{-6}$	Sustituyendo $A = 2.734 \times 10^{-4}$

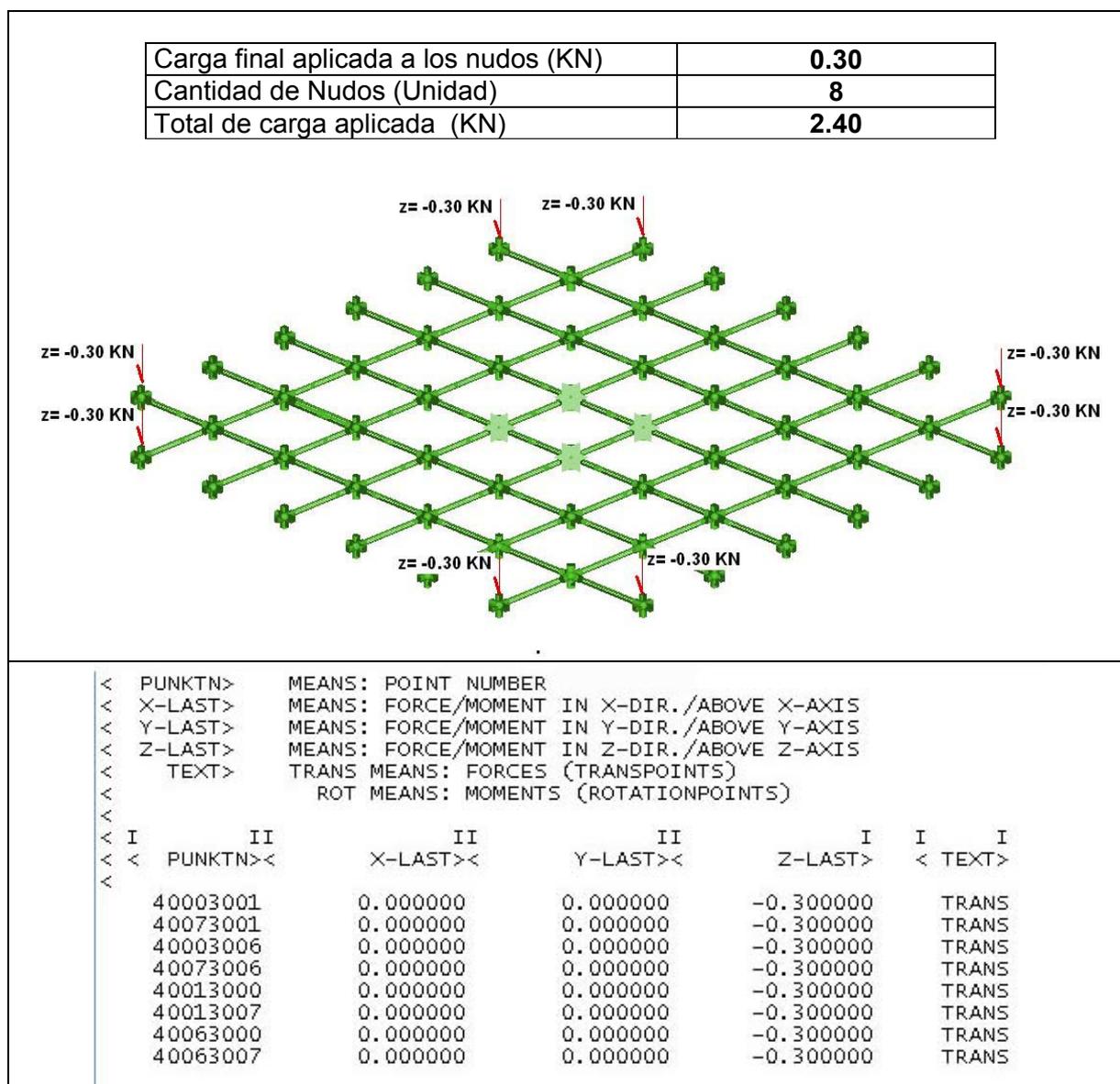
Tabla N° II-8: propiedades de la barra

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

## Proceso de obtención de la forma de la malla por curvas de flexión

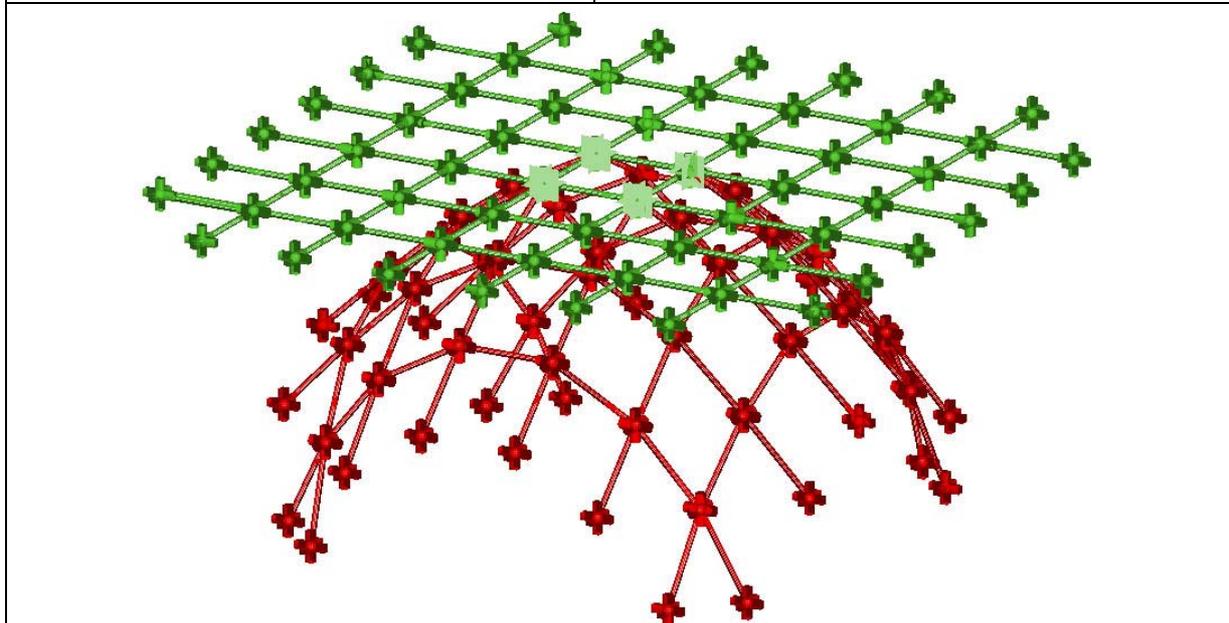
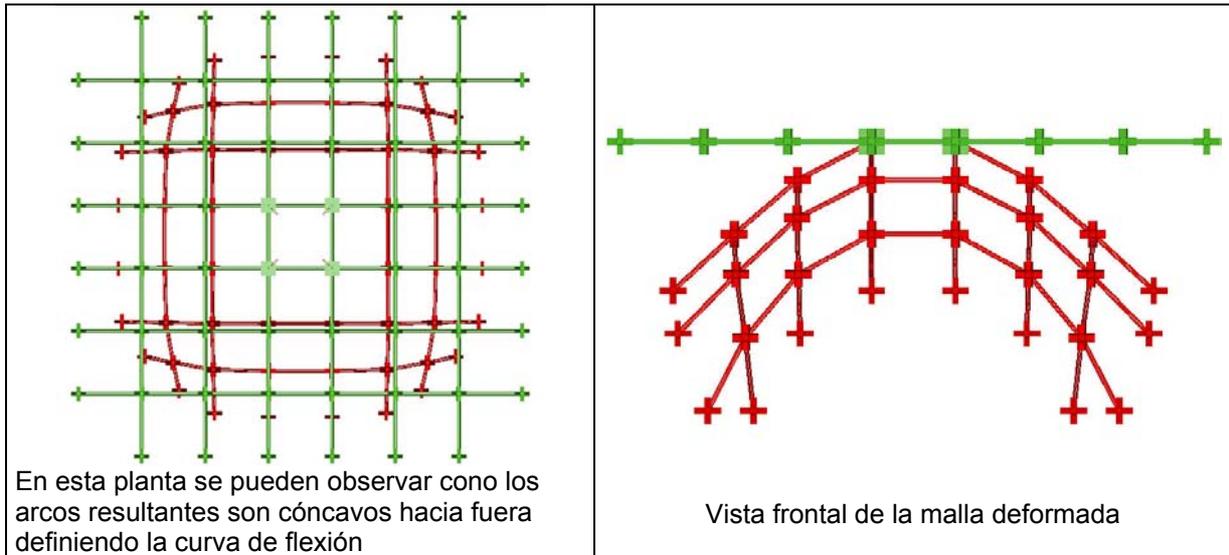
Una vez construido el modelo con todas sus características, y propiedades mecánicas y físicas se realizó el proceso de deformación de la malla, el cual consistió en aplicar a los nudos terminales, ubicados en los extremos de las esquinas, una carga que para determinarla fue incrementándose hasta llegar a la relación arco-flecha igual a la obtenida en el modelo físico, es decir con una flecha de  $f = 2.10 \text{ m}$ .

Para aplicar la carga que deforma la malla e introduce la pre-flexión a las barras se creo manualmente un archivo llamado "LOADGEN". En los 8 nudos de las esquinas marcados con los números 40003001, 40073001, 40003006, 40073006, 40013000, 40013007, 40063000 y 40063007 se les aplicó una carga de 0.30 KN en una dirección negativa sobre el eje Z permitiendo el desplazamiento en los ejes X,Y,Z, marcados con la condición (TRANS). Tal y como se observa en la figura N° 11-3.



Cuadro N° II-3: Aplicación de cargas para la deformación

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL



La malla plana marcada en verde y la malla deformada marcada en rojo. La forma encontrada no se puede asimilar a una bóveda por rotación, ya que la deformación y la disposición de las barras no presentan simetría radial. Por otra parte, la zona de máxima deformación en el ángulo de cruce entre las barras se presenta hacia los finales de los extremos de los arcos y la zona de menor deformación se acerca a los ejes de simetría de la cúpula.

Resultados Geométricos (*)	
Altura Total Cúpula (m)	3.26
Flecha del arco (m)	2.14
Distancia entre apoyo (m)	4.90
Relación Luz/flecha	2.28

(\*) Estos resultados son tomados directamente del modelo deformado

Cuadro N° II-4: Resultado geométrico de la obtención de la forma simulado por computadora  
Estudio de los ángulos de la malla deformada:

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

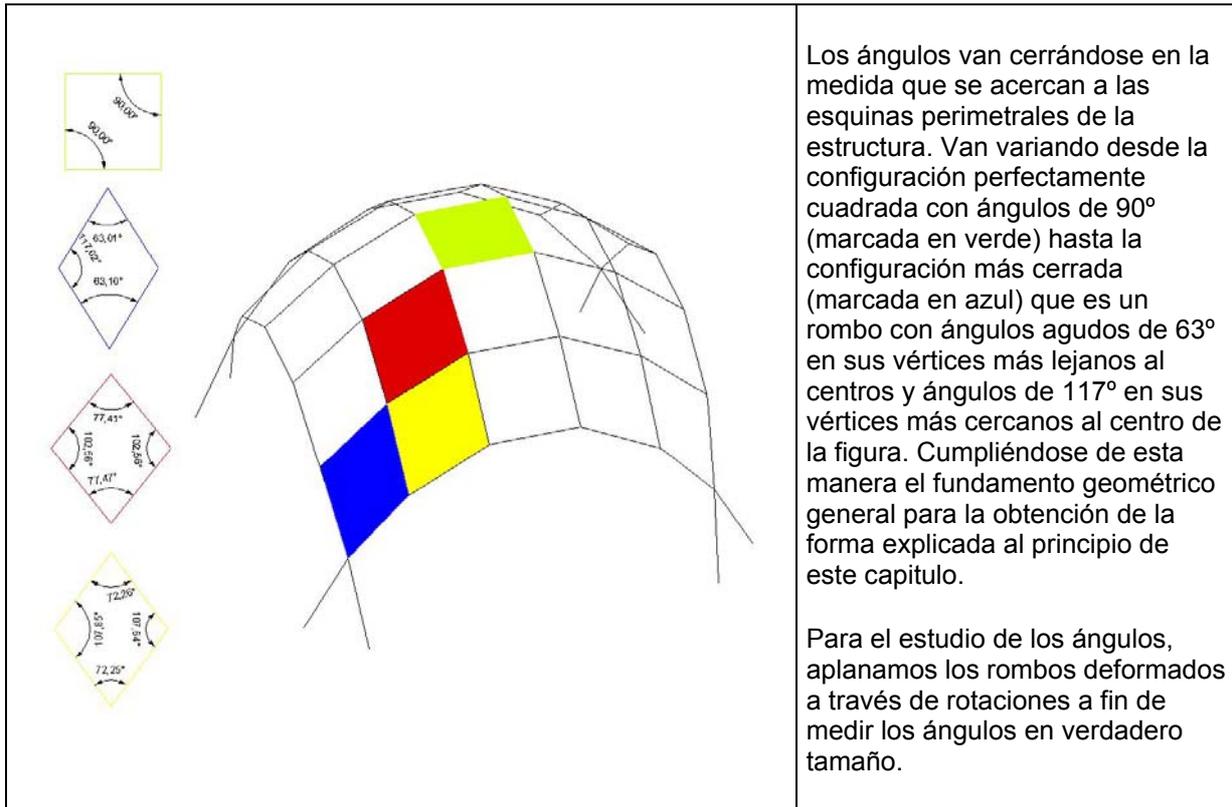


Figura N° II-10: Ángulos de los rombos de la malla

Flexión resultante por la deformación:

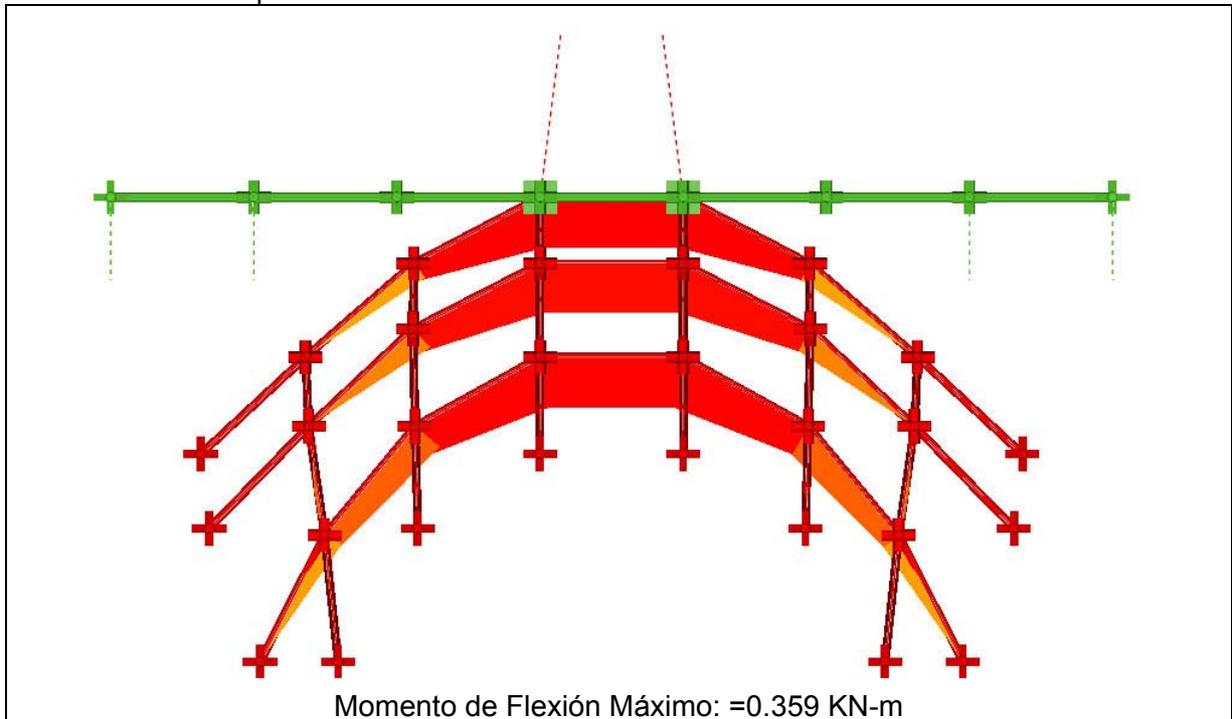
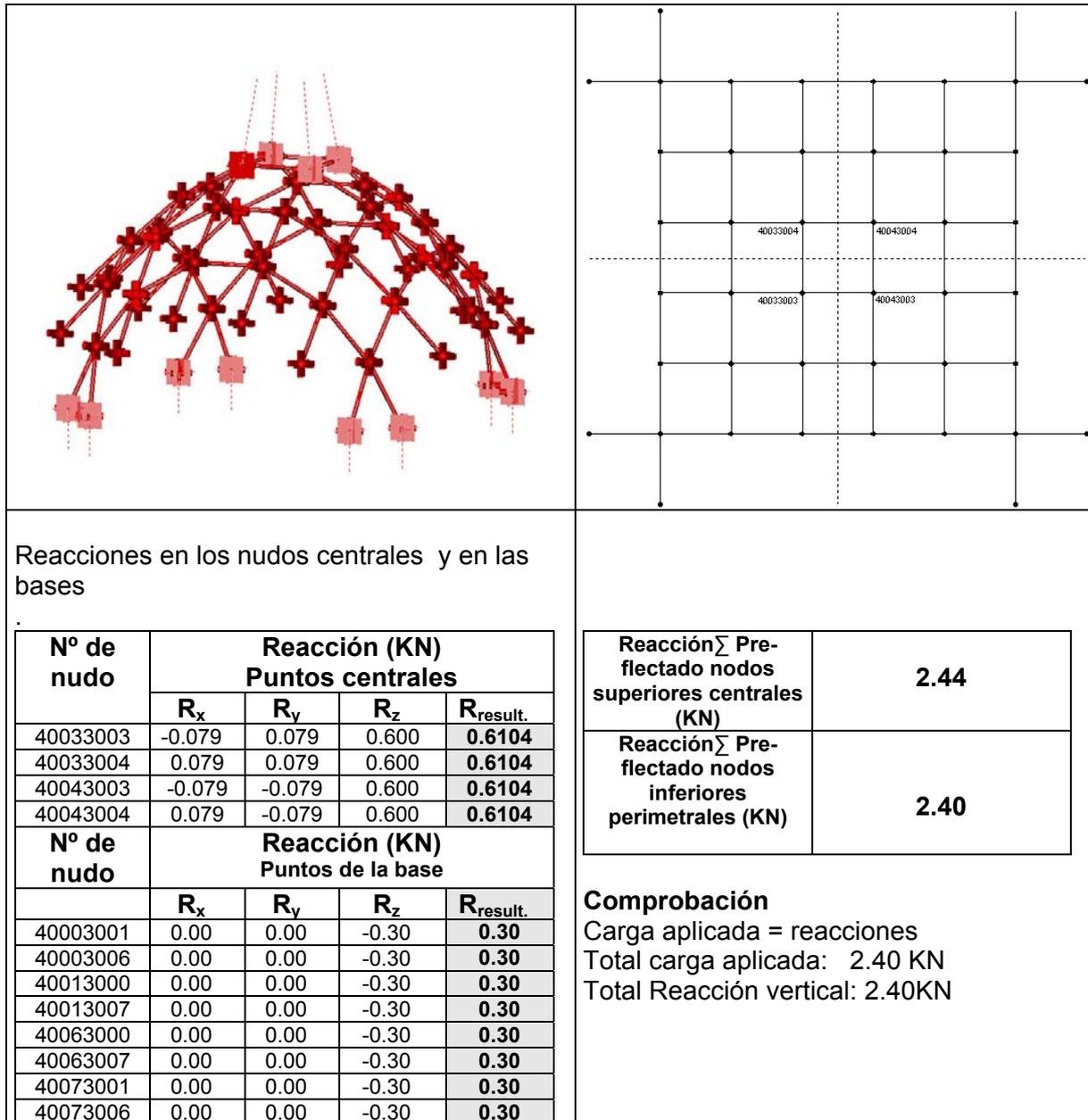


Figura N° II-11: Flexión inicial producto de la deformación

## Segundo modelo. Las reacciones

Las reacciones repartidas están entre los nudos centrales inferiores y los nudos de la base al asignarle la propiedad de restricción de desplazamiento vertical y horizontal, tal y como lo muestra la figura



Cuadro Nº II-5: Reacciones iniciales

Se puede ver como la suma de las reacciones verticales de los nudos centrales y los nudos perimetrales es el mismo valor, igual a 2.40 KN.

### Tercer modelo: La malla como estructura

Una vez obtenida la forma de la cúpula por flexión de las barras había que transformarla en una estructura pre-flectada para su posterior cálculo estático ante una carga externa.

Al eliminar las restricciones de los nudos centrales se obtuvo un resultado de total aplanado de la cúpula, perdiéndose la forma encontrada, esto es debido a que los nudos de la malla tienen asignada la propiedad de doble punto de rotación o giro con lo que se le otorga libertad de giro y la pre-flexión interna inicial, intenta colocar las barras en su posición inicial deformando nuevamente los rombos. Por lo que la forma encontrada de la cúpula se mantendrá sólo cuando los nudos de la malla estén rígidos.

(Ver apéndice B. Procedimiento de transformación de la malla de mecanismo en estructura)

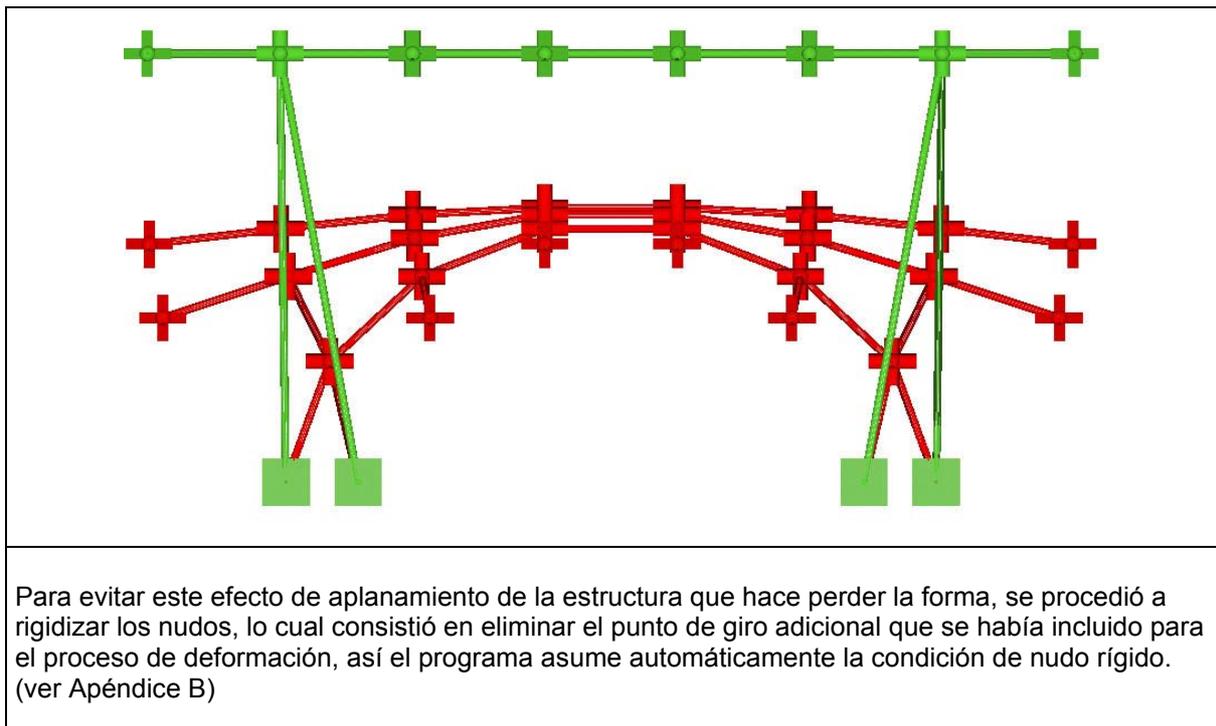


Figura N° II-12: Pérdida de la geometría

Al modelo obtenido con nudos bloqueados (impedidos de volver a su estado inicial) se le realizó un análisis estático para comprobar que estuviera en equilibrio, obteniendo como resultado una estructura en equilibrio con un asentamiento de 15 cm, resultando una altura total de la cúpula de 3.10 m y una flecha de arco perimetral de 2.088 m, con lo que la relación luz-flecha es de 2.36.

Según el grupo de asesores, este asentamiento se presentaba igualmente en los prototipos construidos por el IL en la década de los 70 y se pudo comprobar, al observar los audiovisuales<sup>(\*)</sup> filmados por el Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart. Las estructuras de los prototipos al liberarlas del andamiaje de soporte durante el proceso de erección sufrían un ligero descenso hasta encontrar equilibrio.

(\*) "An Experimental Grid Shell". 16 mm. 13 min. Silente. II-1977

Este asentamiento es producto de dos aspectos, el primero es que para facilitar la construcción de la malla, la rigidez del arco perimetral es igual al de los componentes internos de malla, una manera de disminuir este efecto sería colocando barra doble en el perímetro, pero complica su construcción por lo que se descartó esta posibilidad. El segundo aspecto son las bases, en las que se apoya la estructura, las cuales están articuladas para facilitar el proceso de erección de la estructura, sobre este aspecto nos referiremos en el siguiente capítulo. Sin embargo este asentamiento no compromete el la forma global de la malla deformada ni su interior.

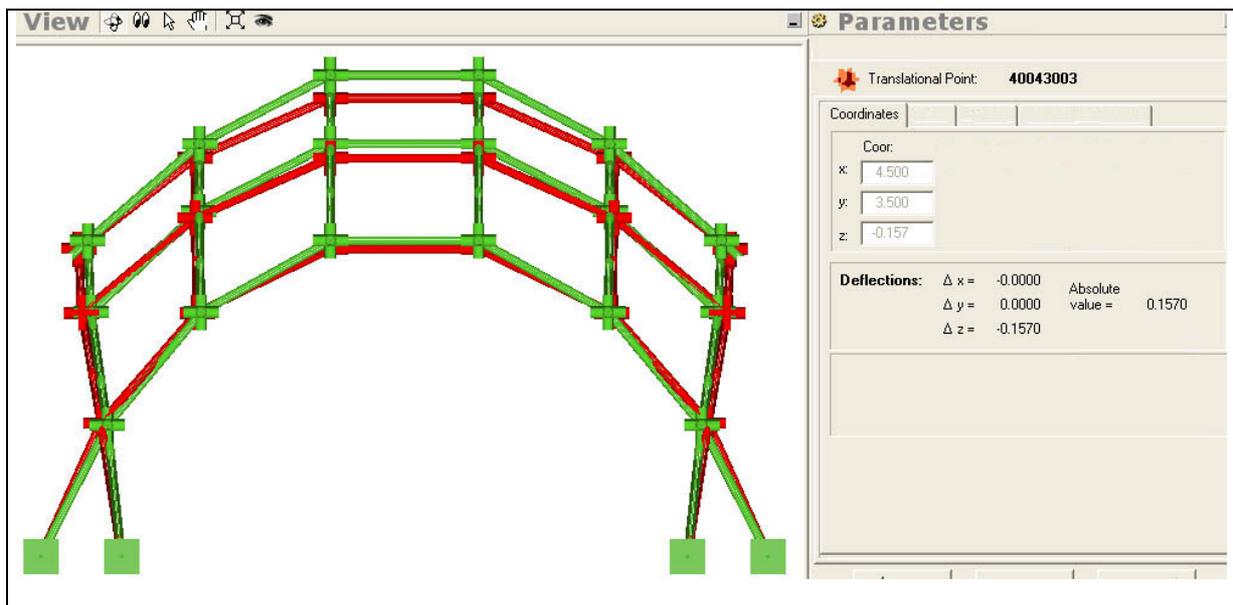


Figura N° II-13: Proceso de re-equilibrio de la estructura

Este asentamiento, que se produce por las razones ya comentadas, tiene efectos en las coordenadas de la malla y en una leve disminución de los esfuerzos iniciales de la obtención de la forma, presentándose en la pre-flexión inicial de las barras y por ende en las reacciones finales.

Si observamos con detenimiento este asentamiento podemos ver el efecto que tiene pequeños movimientos del arco de borde sobre la cresta de la cúpula. En el arco hay desplazamiento resultante de 8 cm hacia fuera de la estructura (6 cm el eje X y 5 cm en el eje Z) Esto produce un desplazamiento de los nudos centrales de la malla en el eje Z de 15 cm, tal y como se observa en la figura N° 11-13 donde aparecen en la columna de "Parameters las coordenadas del punto N° 40043003 y su "Deflections", observándose el valor de descenso de la estructura en  $\Delta_z$ .

La cresta desciende 3 veces el valor de lo que desciende el arco en el eje Z.. Este efecto de asentamiento puede ser reducido cuando participe el cerramiento o diagonales ubicadas en el lado más corto de los rombos o empotrando las bases.

## Estudio del efecto de la rigidización de la estructura en la geometría

Cuarto modelo: introducción de las diagonales

Para determinar si los elementos rigidizadores tienen influencia sobre la forma de la cubierta se introdujo unas diagonales en el lado corto de los rombos que forman los arcos de borde.

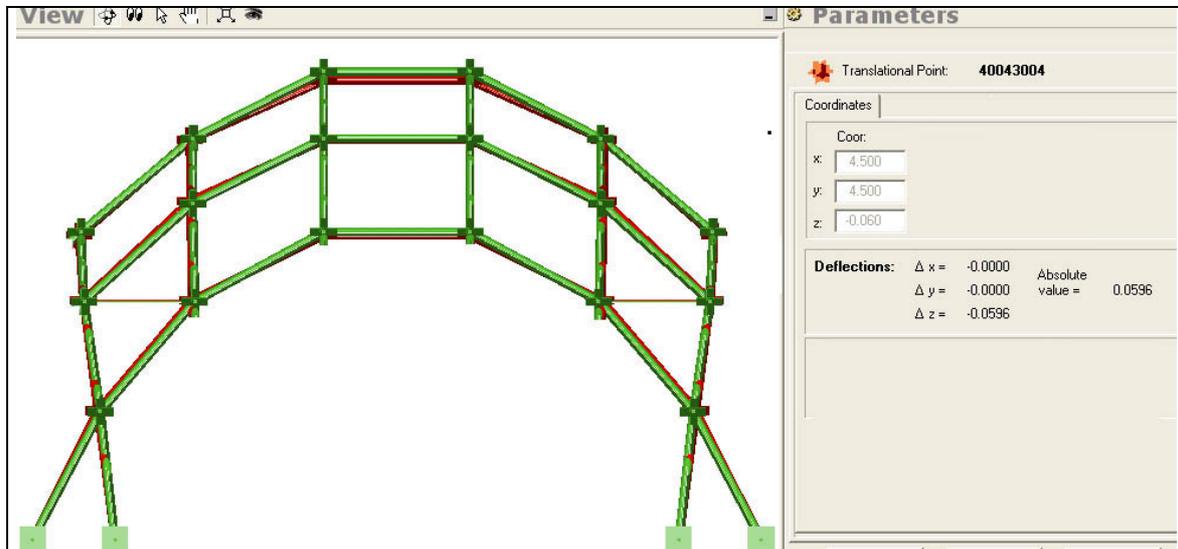


Figura N° II-14: Proceso de re-equilibrio de la estructura con tensores en las esquinas

Al introducir diagonales en los rombos de las esquinas, dio como resultado que en los arcos perimetrales de borde no se presentan asentamiento dado que están restringidos por la diagonal corta del rombo. Los nudos centrales de la cúpula se asentaron 5 cm en el eje Z, tal y como se observa en la figura II-14. En la columna de "Parameters" se puede observar las coordenadas del punto 40043004 y en el apartado "Deflections" se puede verificar el descenso de la estructura en  $\Delta_z$ . El sentamiento del tercer modelo se redujo un 75 % con respecto al anterior. Estos resultado muestran la importancia de la rigidización de la cúpula para su funcionamiento como estructura.

## Comparación de las coordenadas obtenidas por el modelo físico y las obtenidas por el modelo informático

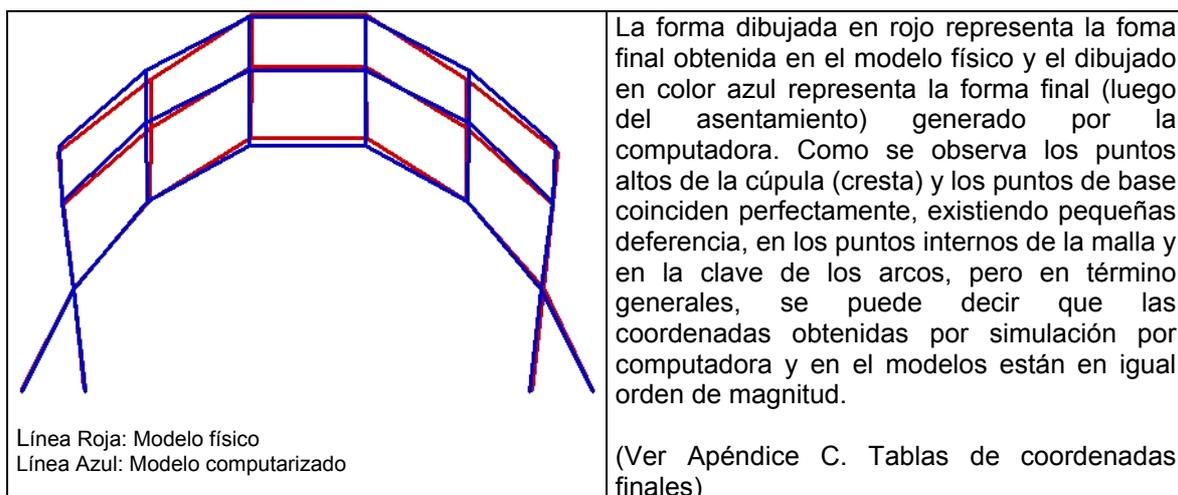


Figura N° II-13: Comparación de coordenadas obtenidas por los dos modelos

## Estudio de la transformabilidad de la malla para volver a su posición horizontal

Con el objetivo de estudiar si las barras presentan alguna deformación al devolver a su estado inicial se realizó una prueba de cálculo estático al devolver el modelo a su posición inicial plano partiendo del modelo deformado. Para esto se eliminaron las restricciones de los nudos de la base y se restringieron en los ejes X,Y,Z los nudos del centro de la malla. Este procedimiento de comprobación se aplicó a los dos modelos informáticos, con los nudos sin restricciones y con dos puntos de giro (modelo N° 2), y cuando los nudos son considerados bloqueados con un solo punto de giro (modelo N° 3)

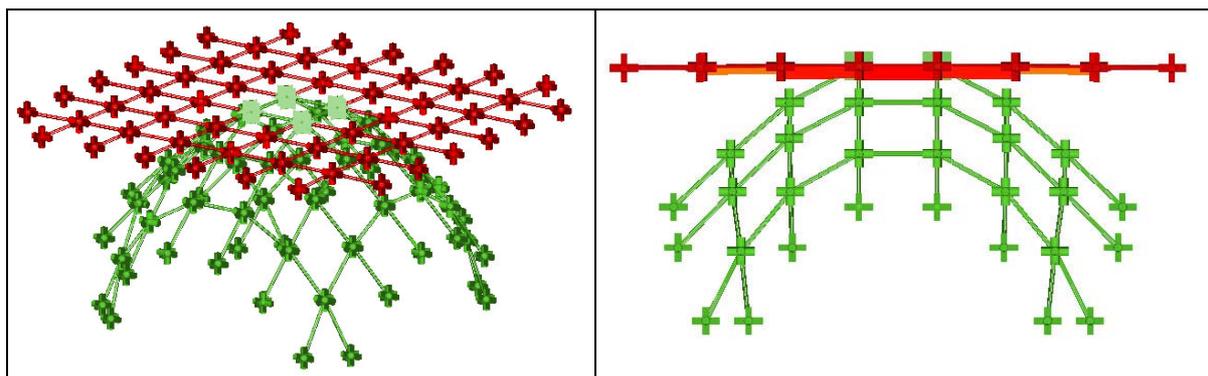


Figura N° II-14. Retorno de la estructura a su posición inicial plano

El resultado de la prueba con el modelo con doble punto de rotación o giro, que regresa a su posición inicial, sólo presenta momento de flexión producto de la carga gravitatoria de peso propio, dado que la malla se encuentra en el espacio. Esta flexión tiene un valor mínimo de 0.004 KN-m

La segunda comprobación fue realizada con el modelo de los nudos rígidos, liberando los nudos de la base y colocando las restricciones en los nudos centrales de la malla en los ejes X,Y,Z.

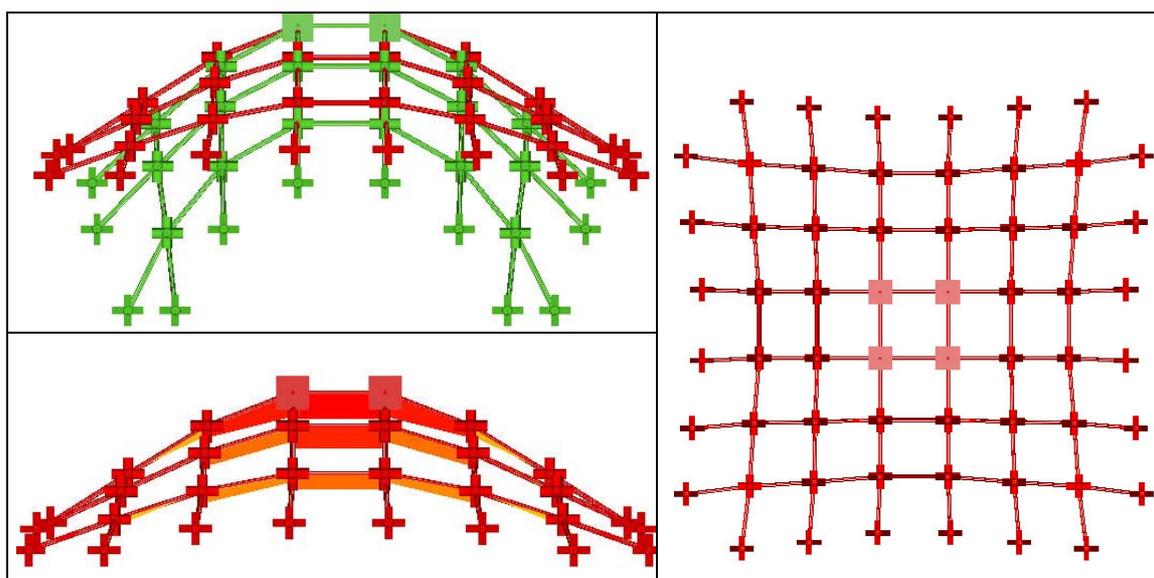
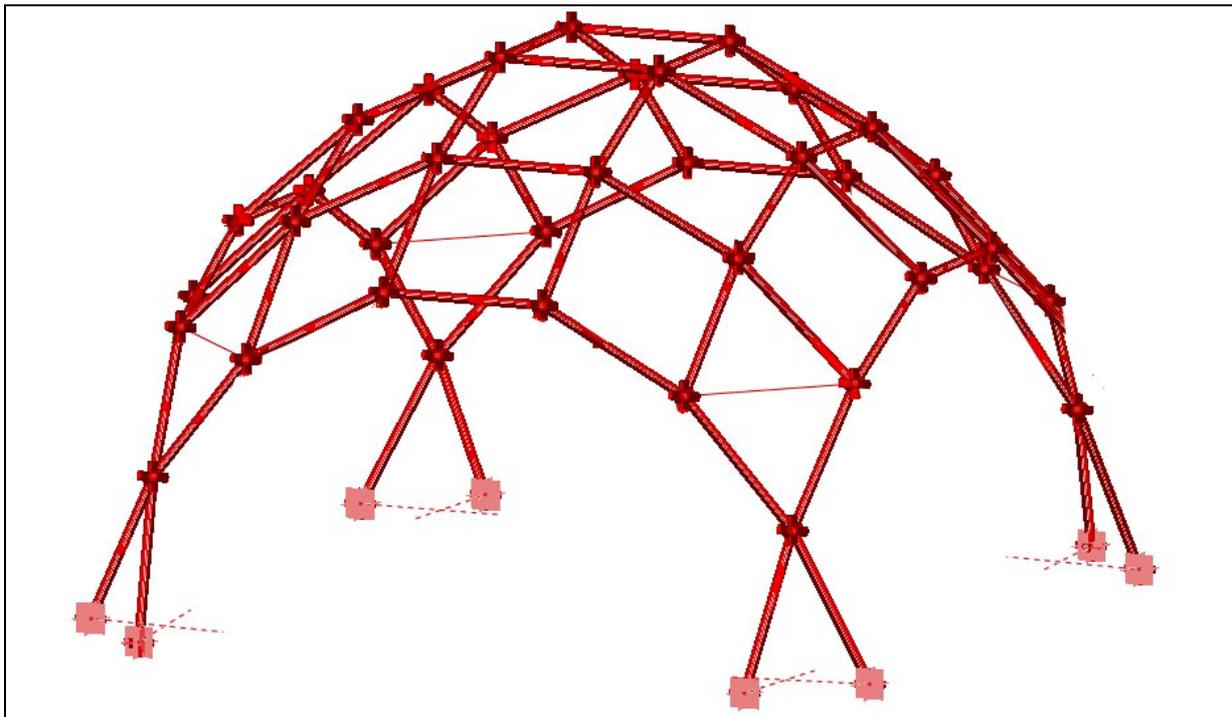


Figura N° II-15: Prueba de la malla con nudos bloqueados y anclajes sin restricciones

El modelo al ser liberado en los nudos de la base intenta retornar a su estado inicial pero los nudos bloqueados impiden que la malla vuelva a la posición totalmente plana, obteniéndose como resultado una forma que se asemeja a un modelo por catenaria. El momento de flexión máximo tiene un valor de 0.27 KN-m.

De este estudio concluimos que el diseño del nudo tiene que cumplir con dos condiciones: la primera, deben tener libertad de giro para lograr la deformación e introducir la pre-flexión a las barras, aunque estos giros movimientos estén restringidos por las propias barras. La segunda condición, deben estar bloqueados en todos los ejes para que, una vez la malla deformada, pueda trabajar como estructura.

**Estudio de las reacciones en las bases:**



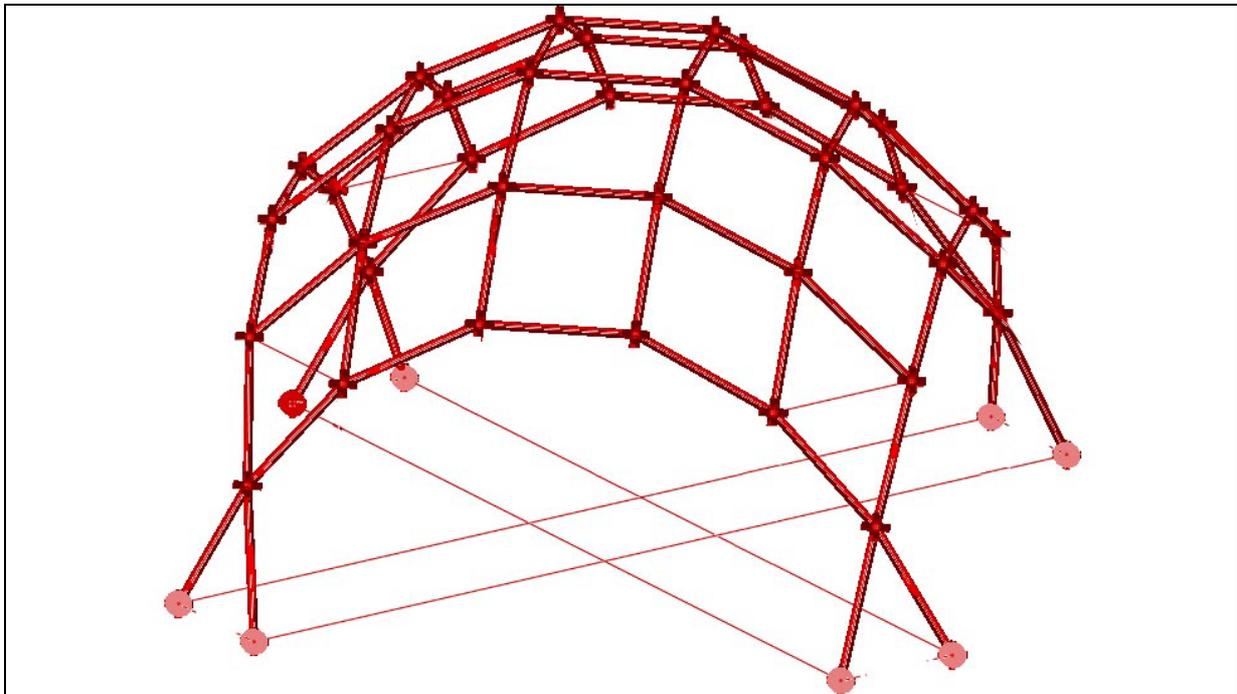
Reacciones en los de las bases en el nuevo estado de equilibrio

N° de nudo	Reacción (KN) Puntos de la base			
	R <sub>x</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>result.</sub>
40003006	0.172	0.012	0	<b>0.17</b>
40013000	-0.012	0.172	0	<b>0.17</b>
40013007	0.012	0.172	0	<b>0.17</b>
40063000	0.012	0.172	0	<b>0.17</b>
40063007	0.012	0.172	0	<b>0.17</b>
40073001	0.172	-0.012	0	<b>0.17</b>
40073006	0.172	0.012	0	<b>0.17</b>
40003001	0.172	0.012	0	<b>0.17</b>

Cuadro N° II-6: Reacciones iniciales después del re-equilibrio de la estructura

Tal y como se muestra en la figura y la tabla de reacciones de los nudos de la base sólo existen componente en los ejes X e Y siendo la componente Z igual a 0. Esto indica que si conectamos en diagonal cada base con su respectiva opuesta entra en tensión el elemento de conexión y las fuerzas se anulan y por lo tanto la reacción total es cero obtendremos una estructura totalmente en equilibrio, la cual incluye los esfuerzos de la pre-flexión inicial y el peso propio de la estructura.

### Comprobación de la reacción = 0



Reacciones en los nudos de las bases.

Nº de nudo	Reacción (KN) Puntos de la base			
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_{result.}$
40003006	0	0	0	0
40013000	0	0	0	0
40013007	0	0	0	0
40063000	0	0	0	0
40063007	0	0	0	0
40073001	0	0	0	0
40073006	0	0	0	0

Cuadro Nº II-7: Reacciones iniciales igual a 0

Si conectamos cada base con su opuesto con unos cables en la dirección de la diagonal obtenemos que las fuerzas se anulan siendo cero en cada uno de los puntos, la tensión del cable es en orden de magnitud, muy similar a las reacciones iniciales con un valor de 0.10 KN

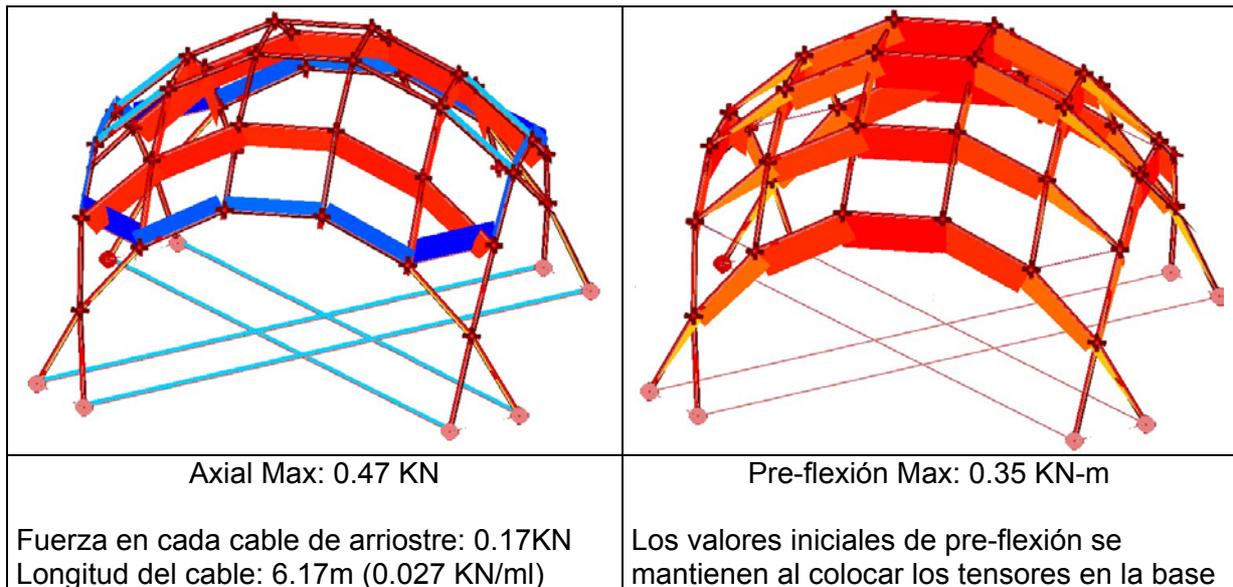


Figura N° II-16 Comparación de los esfuerzos iniciales con los cables de arriostre.

### Obtención de la forma de la membrana rigidizadora

El objetivo fue buscar una membrana pre-tensada en equilibrio con forma anticlástica colgada de la malla de barras pre-flectadas que contribuyera a rigidizar la estructura y sustituir las diagonales en el lado menor de los rombos, ya que para cada rombo habría una distancia, y que también actuara de cerramiento.

La búsqueda de la forma de la membrana parte de las condiciones de borde dadas por el modelo de malla de barras pre-flectadas, es decir los puntos fijos vienen dados por las coordenadas de los nudos de las barras de los arcos y de la cresta de la cúpula.

Procedimiento de la obtención de la forma:

1. Introducir las coordenadas de los nudos de los arcos perimetrales y de los cuatro puntos altos de la cúpula.
2. Generar las condiciones topológicas internas de la membrana (longitud inicial de barras, propiedades de los bordes).
3. Generar la triangulación de la malla y los elementos de enlace entre la membrana y los bordes.
4. Calcular la forma anticlástica con las tensiones balanceadas por el método de la densidad de fuerza.

(Ver apéndice D. Proceso de obtención de la forma de la membrana)

### Propiedades de la membrana:

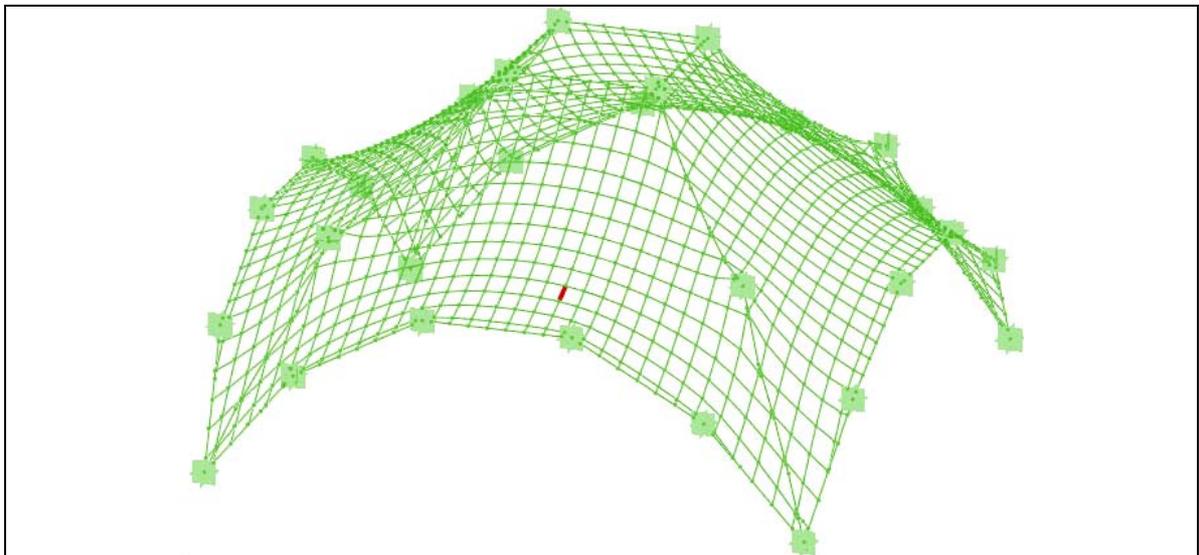
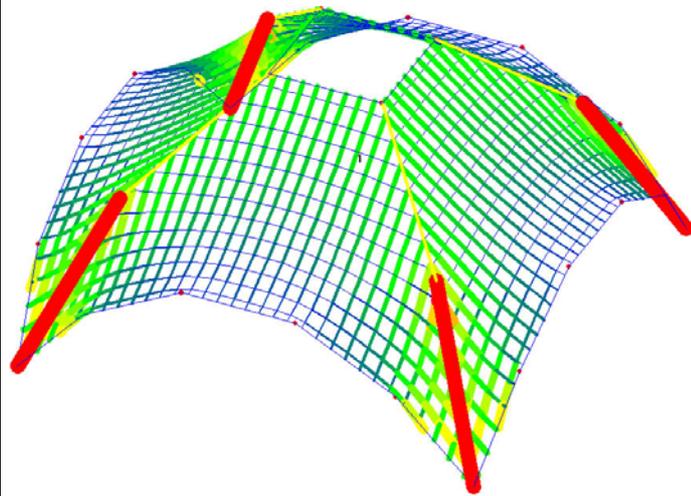
<p>Para asignar las propiedades del material utilizamos el menu <b>E-Modul</b> del sub-programa <b>Statical Análisis</b> del programa <b>EASY</b>. Los módulos de elasticidad de la membrana en sus dos direcciones fueron tomados del catalogo de la casa comercial FERRARI (Francia) con las siguientes características</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Módulo de elasticidad de la membrana</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Módulo de elasticidad en dirección de la urdimbre</td> <td><b>201 KN/m</b></td> </tr> <tr> <td>Módulo de elasticidad en dirección de la trama</td> <td><b>202 KN/m</b></td> </tr> </tbody> </table>		Módulo de elasticidad de la membrana		Módulo de elasticidad en dirección de la urdimbre	<b>201 KN/m</b>	Módulo de elasticidad en dirección de la trama	<b>202 KN/m</b>
Módulo de elasticidad de la membrana									
Módulo de elasticidad en dirección de la urdimbre	<b>201 KN/m</b>								
Módulo de elasticidad en dirección de la trama	<b>202 KN/m</b>								
Modelo	Précontraint <sup>(*)</sup> 502 serie 8000	<p>Las membranas tiene dos módulos de elasticidad de acuerdo a las dos direcciones en que esta conformado el tejido (trama y urdimbre). Este modulo de elasticidad expresa la relación entre la tensión y deformación producida en el material por efecto de este estado de tensión. En el caso de la membrana utilizada los valores son similares en ambos sentidos por la tecnología Précontraint (ver anexo 4. Materiales textiles)</p>							
Color	Blanco								
Espesor	0.60 mm								
Peso	650 grs/m <sup>2</sup>								
Resistencia rotura	280/260 daN/5 cm								
Resistencia a desgarro	28/25 daN								
Adherencia	10 daN/5 cm								
Trasmisión lumínica	22%								
Resistencia al fuego	No propaga la llama								
Uso recomendado	Estructuras móviles								

Cuadro N° II-8: Propiedades mecánica de la membrana

### Estudio de la pretensión de la membrana

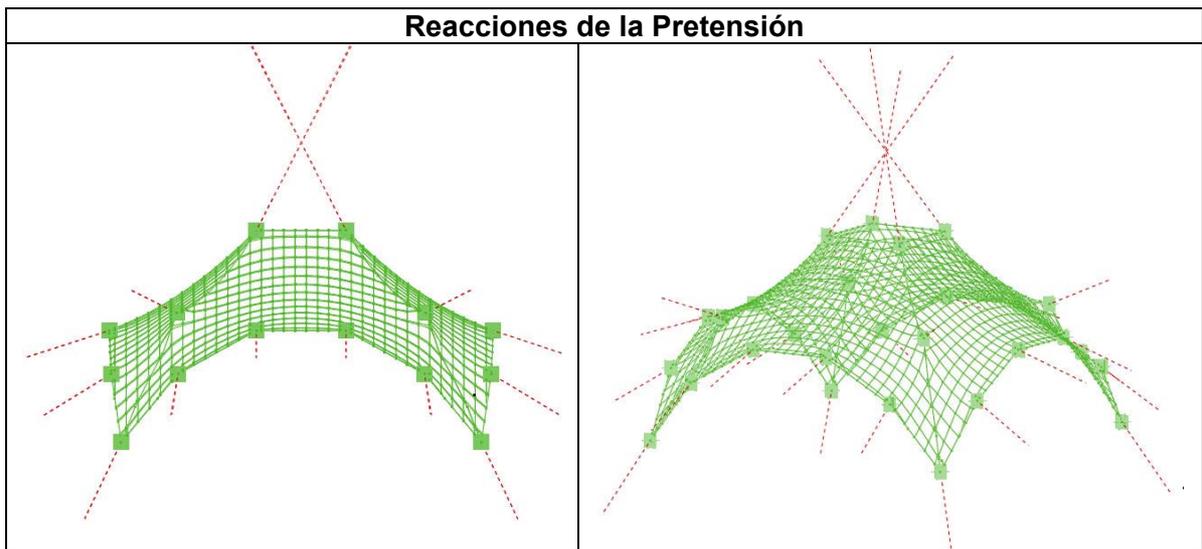
Comprobamos gráficamente la pretensión inicial, permitiendo ver la distribución de los esfuerzos iniciales de pre-tensión producidos sobre la membrana. Sabemos de antemano que este estudio es pre-liminar, ya que el verdadero comportamiento lo tendrá cuando este unida a la estructura.

En el gráfico se puede observar como las tensiones producidas por la pretensión inicial de la obtención de la forma se concentran en las cuatro esquinas, donde alcanza sus valores máximos dado que es la zona más plana de la cubierta, seguida por el punto alto de la membrana, siendo la zona central inferior sobre la clave de los arcos de borde la menos pretensada. Esta pretensión inicial proveniente del archivo **FOFIN** es sólo una pretensión geométrica, producto del método de la densidad de fuerzas. Habrá que unirla con las propiedades del material y hacerle un análisis estático para saber con precisión la pretensión en términos de fuerza.

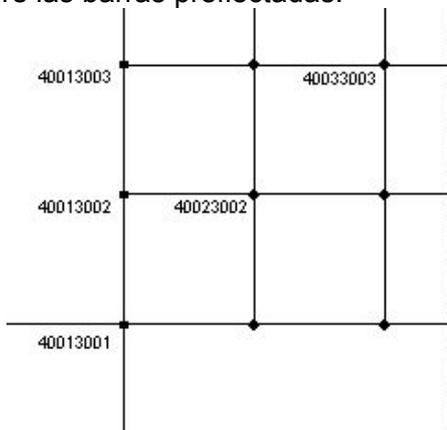


<p><b>Comprobación de la Pretensión</b></p> <p>Para comprobar la pretensión inicial se introdujo la membrana con sus propiedades asignadas del material en el sub-programa “<b>EASYBEAM</b>”, realizando un análisis estático con un valor de carga externa igual a 0, obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la tabla.</p> <p>Como se dijo antes, este estudio es preliminar, ya que los puntos de soporte de la membrana son fijos en las direcciones X,Y,Z. Mientras que al estar unida a la malla de barras estos puntos pueden modificarse.</p>	<table border="1" data-bbox="778 257 1356 638"> <tr> <td>Longitud inicial de la barra de la membrana</td> <td><b>0.125 m</b></td> </tr> <tr> <td>Longitud final de la barra de la membrana</td> <td><b>0.1368 m</b></td> </tr> <tr> <td>Extensión de la barra</td> <td><b>0.0118 m</b></td> </tr> <tr> <td>Pre-tensión de la barra de la membrana</td> <td><b>0.1368 KN</b></td> </tr> </table> <p>Estos valores nos indican que el valor de la pretensión es igual a la longitud de la barra por lo que las tensiones están balanceadas, estando de acuerdo al método de la densidad de fuerza.</p> <p>(Ver anexo N° 2. método de la Densidad de fuerza)</p>	Longitud inicial de la barra de la membrana	<b>0.125 m</b>	Longitud final de la barra de la membrana	<b>0.1368 m</b>	Extensión de la barra	<b>0.0118 m</b>	Pre-tensión de la barra de la membrana	<b>0.1368 KN</b>
Longitud inicial de la barra de la membrana	<b>0.125 m</b>								
Longitud final de la barra de la membrana	<b>0.1368 m</b>								
Extensión de la barra	<b>0.0118 m</b>								
Pre-tensión de la barra de la membrana	<b>0.1368 KN</b>								

Cuadro N° II-9: Resultado del pre-tensado de la membrana



Otro aspecto a verificar de la pretensión una vez realizado el análisis estático fueron las reacciones en los puntos fijos de la membrana que coinciden con los puntos de la malla rígida. Como la membrana es simétrica en sus dos ejes estudiaremos sólo un cuarto de ella. En las tablas se muestran las reacciones de acuerdo con la posición del nudo en la superficie, reacciones en los nudos de los arcos, en los puntos interiores de la membrana y en los nudos del punto alto. La reacción total en la superficie es de 32 Kg. por metro cuadrado, en esta pretensión hay que comprobar su efecto sobre las barras plectadas.



Numeración de los nudos de la malla que coincide con los de la membrana

Reacciones producidas por la pretensión

Nº de nudo	Reacciones arcos (KN)			
	R <sub>x</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>result.</sub>
40013001	-0.406	-0.406	-0.857	<b>1.0316</b>
40013002	-0.753	-0.080	-0.465	<b>0.8884</b>
40013003	-0.937	0.00	-0.303	<b>0.9846</b>

Total Nº de nudos del borde: 20

Nº de nudo	Reacciones puntos. interiores (KN)			
	R <sub>x</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>result.</sub>
40023002	-0.533	-0.533	0.266	<b>0.7991</b>

Total Nº de nudos interiores: 4

Nº de nudo	Reacciones puntos altos(KN)			
	R <sub>x</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>result.</sub>
40033003	1.082	1.082	2.127	<b>2.6205</b>

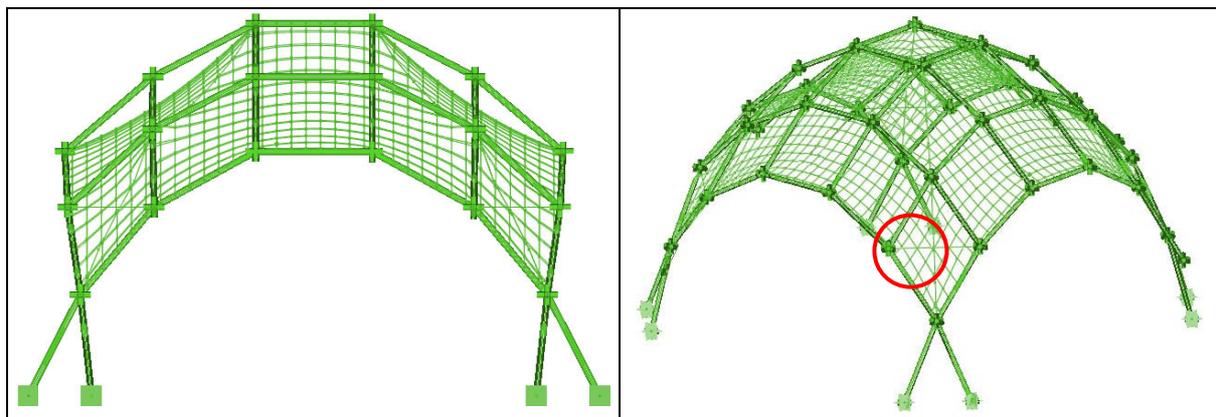
Total Nº de nudos pts altos: 4

Resumen de pretensión

TOTAL ÁREA DE SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )	<b>22.10</b>
PRETENSION (KN/ m <sup>2</sup> )	<b>3.2475</b>

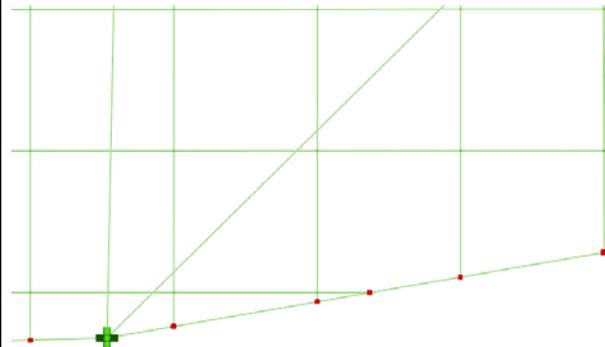
Cuadro Nº II-10 Reacciones de la pretensión geométrica de la membrana, form finding

Unión de la membrana pretensada con la malla de barras plectadas



La unión de las coordenadas de las dos mallas nos da como resultado un estructura en malla de dos capas, la capa superior trabajando a flexión y la capa inferior a tracción. Para que este proceso se produjera, era necesario la unificación de la numeración de los nudos de unión entre la membrana y la estructura de barra. Esto es posible gracias a los llamados "T Element" (en rojo), son puntos de unión entre la red y el borde repartiendo los esfuerzos a lo largo del borde.

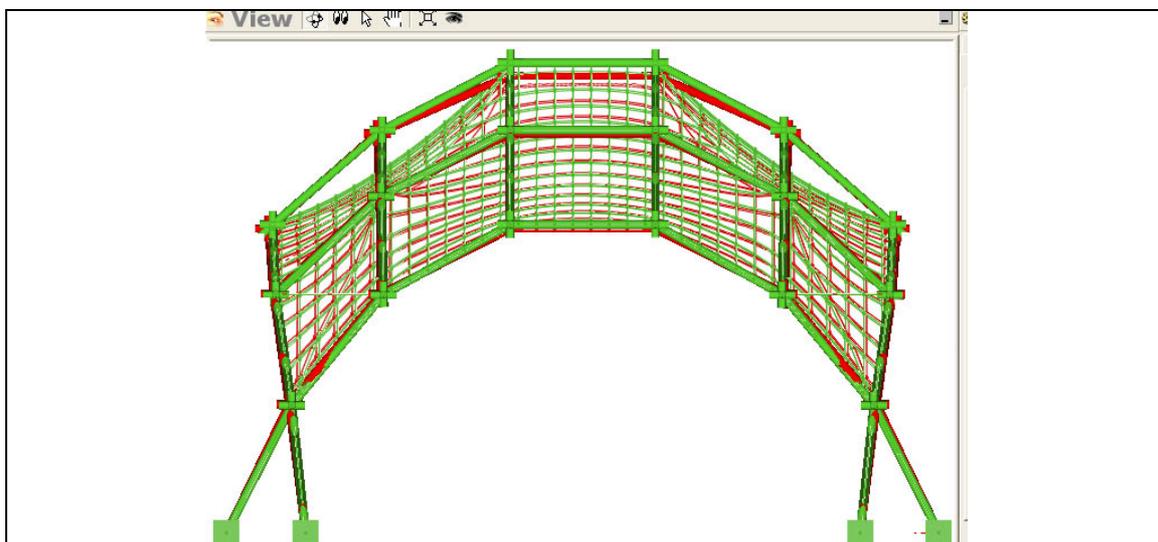
Para unir la malla pre-flectada + membrana pretensada se construyeron manualmente archivos de entrada colocando los elementos en orden numérico ascendentes. Primero los elementos de la malla y secuencialmente los elementos de la membrana.



Se produjo el quinto modelo, a partir de la cual todos los estudios se realizaron con la interacción entre la membrana y la malla.

Figura N° II-17: Unión malla de barras pre-flectadas y membrana

### Estudio del efecto de la pretensión sobre la forma de la malla rígida pre-flectada



El asentamiento de la estructura produce un desplazamiento máximo de 8 cm ubicado en los nudos del punto alto. El asentamiento de los arcos es muy reducido siendo su máximo valor 3 cm ubicado en los nudos de la clave del arco sobre el eje Z. Los nudos de las esquinas no se producen desplazamientos. En los nudos de las cuatro esquinas de la cresta de la cúpula el desplazamiento es de 8 cm en el eje Z. De esta manera podemos afirmar que la membrana contribuye notablemente a la rigidización de la estructura, además de su función de cerramiento.

Figura N° II-18: Efecto de la pretensión y el re-equilibrio de la estructura

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

## Comparación de los esfuerzos de la pre-flexión iniciales con los esfuerzos de preflexión iniciales + esfuerzos de pretensión finales

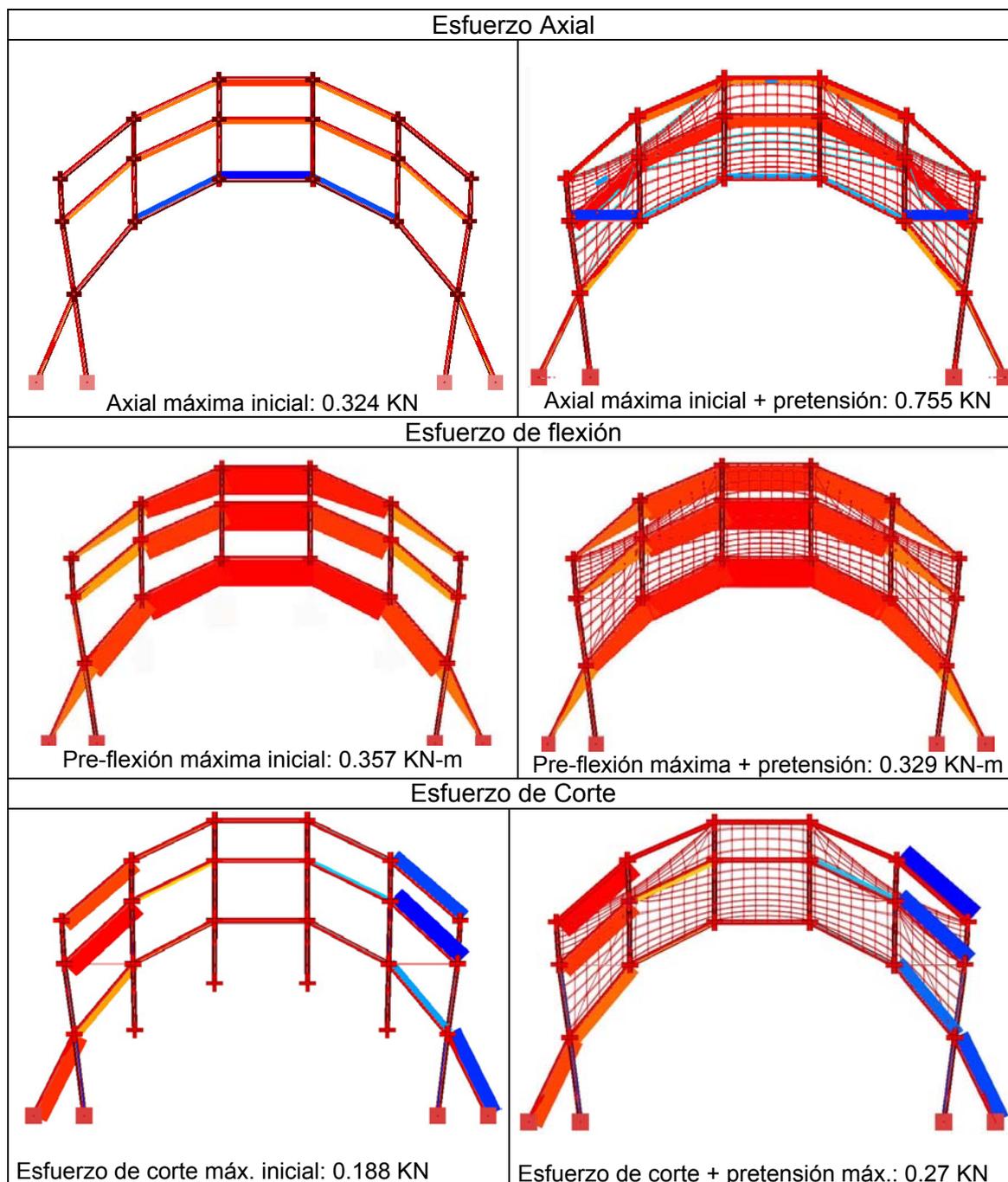


Gráfico N° II-2. Comparación entre los esfuerzos iniciales de pre-flexión y pretensión

Al comparar los esfuerzos iniciales de pre-flexión con los de pre-flexión + pretensión de la membrana, observamos cómo la fuerza axial se incrementa notablemente duplicando su valor máximo (54%), la diferencia ubicada en 0.40 KN es el aporte de la pretensión incluyendo el peso de la membrana que se ubica cerca de  $0.072 \text{ KN/m}^2$ . Este incremento se distribuye por toda la superficie desde los ejes hasta los bordes.

### CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

El comportamiento del arco perimetral es igual en los dos casos, tracción en la zona de la clave y compresión hacia los extremos.

En los esfuerzos de flexión hay una leve disminución que se ubica en un 7,8% al actuar la membrana pretensada. Como no es muy significativo, se puede afirmar que sus valores máximos están en ordenes de magnitud similares, y la deformación por flexión tiende a 0.

Respecto a los esfuerzos de corte se produce un aumento de este esfuerzo, aunque no es significativo pasa de 0.18KN a 0.20KN, concentrándose, en ambos casos, en los nudos cercanos a los arcos de borde.

(Ver apéndice E. Esfuerzos en las barras por pre-flexión + pre-tensión inicial)

### Estudio de la pre-tensión + pre-flexión

	<p>Options: Focus   Selected Objects  </p> <p>Axial Force Link: <b>1993</b></p> <p>Type of axial force link: <b>Membrane Link</b></p> <p>Coord   Load   LocCoordSys   <b>Elasticity</b></p> <p>Current length: 0.139637</p> <p>Width: 0.125100</p> <p><b>Force calculation:</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Elastic Unstressed length: 0.139384</p> <p>Extension: 0.00025299</p> <p>Material: Name E-Modulus E 2. 201.0</p> <p>Area: 0.1243781095</p> <p><input type="checkbox"/> Strut</p> <p><input checked="" type="radio"/> Force density: 0.32496370</p> <p>Force: 0.0454</p> <p>Back Help Forward</p>
<p>Para realizar esta comprobación, tomamos los datos de longitud final de barra (<math>l_{oa}</math>) y de fuerza (<math>q</math>) dadas por el análisis estático que realiza el programa. De esta manera comprobamos que la pretensión de la membrana es igual a la pretensión de la obtención de la forma inicial (form-finding).</p>	<p>Comprobación de la pretensión Dividiendo la fuerza entre la longitud final nos da como resultado la pretensión</p> <p><math>\sigma</math> pretensión: <math>\frac{q}{l_{oa}}</math></p> <p>sustituyendo:</p> <p><math>\sigma</math> pretensión: <math>\frac{0.0454 \text{ KN}}{0.139637 \text{ m}}</math></p> <p>La pretensión inicial es: <math>\sigma = 0.32 \text{ KN/m}</math></p>

Cuadro N° II-11: Estudio de la pretensión

## Estudio de las reacciones de preflexión + pretensión en los nudos de las bases

																																																																																									
<p>Tabla de reacciones en los nudos de las bases con restricción.</p>	<p>Tabla de reacciones en los nudos de las bases con cable de arriastre y unida con resorte a las bases</p>																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nº de nudo</th> <th colspan="4">Reacción (KN) Puntos de la base</th> </tr> <tr> <th><math>R_x</math></th> <th><math>R_y</math></th> <th><math>R_z</math></th> <th><math>R_{result.}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40003006</td> <td>0.17</td> <td>0.017</td> <td>0</td> <td><b>0.17</b></td> </tr> <tr> <td>40013000</td> <td>-0.017</td> <td>0.17</td> <td>0</td> <td><b>0.17</b></td> </tr> <tr> <td>40013007</td> <td>-0.017</td> <td>-0.17</td> <td>0</td> <td><b>0.17</b></td> </tr> <tr> <td>40063000</td> <td>0.017</td> <td>0.17</td> <td>0</td> <td><b>0.17</b></td> </tr> <tr> <td>40063007</td> <td>0.017</td> <td>-0.17</td> <td>0</td> <td><b>0.17</b></td> </tr> <tr> <td>40073001</td> <td>-0.17</td> <td>-0.017</td> <td>0</td> <td><b>0.17</b></td> </tr> <tr> <td>40073006</td> <td>-0.17</td> <td>0.017</td> <td>0</td> <td><b>0.17</b></td> </tr> </tbody> </table>	Nº de nudo	Reacción (KN) Puntos de la base				$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_{result.}$	40003006	0.17	0.017	0	<b>0.17</b>	40013000	-0.017	0.17	0	<b>0.17</b>	40013007	-0.017	-0.17	0	<b>0.17</b>	40063000	0.017	0.17	0	<b>0.17</b>	40063007	0.017	-0.17	0	<b>0.17</b>	40073001	-0.17	-0.017	0	<b>0.17</b>	40073006	-0.17	0.017	0	<b>0.17</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nº de nudo</th> <th colspan="4">Reacción (KN) Puntos de la base</th> </tr> <tr> <th><math>R_x</math></th> <th><math>R_y</math></th> <th><math>R_z</math></th> <th><math>R_{result.}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>40003006</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td><b>0</b></td> </tr> <tr> <td>40013000</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td><b>0</b></td> </tr> <tr> <td>40013007</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td><b>0</b></td> </tr> <tr> <td>40063000</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td><b>0</b></td> </tr> <tr> <td>40063007</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td><b>0</b></td> </tr> <tr> <td>40073001</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td><b>0</b></td> </tr> <tr> <td>40073006</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td><b>0</b></td> </tr> </tbody> </table>	Nº de nudo	Reacción (KN) Puntos de la base				$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_{result.}$	40003006	0	0	0	<b>0</b>	40013000	0	0	0	<b>0</b>	40013007	0	0	0	<b>0</b>	40063000	0	0	0	<b>0</b>	40063007	0	0	0	<b>0</b>	40073001	0	0	0	<b>0</b>	40073006	0	0	0	<b>0</b>
Nº de nudo		Reacción (KN) Puntos de la base																																																																																							
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_{result.}$																																																																																					
40003006	0.17	0.017	0	<b>0.17</b>																																																																																					
40013000	-0.017	0.17	0	<b>0.17</b>																																																																																					
40013007	-0.017	-0.17	0	<b>0.17</b>																																																																																					
40063000	0.017	0.17	0	<b>0.17</b>																																																																																					
40063007	0.017	-0.17	0	<b>0.17</b>																																																																																					
40073001	-0.17	-0.017	0	<b>0.17</b>																																																																																					
40073006	-0.17	0.017	0	<b>0.17</b>																																																																																					
Nº de nudo	Reacción (KN) Puntos de la base																																																																																								
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_{result.}$																																																																																					
40003006	0	0	0	<b>0</b>																																																																																					
40013000	0	0	0	<b>0</b>																																																																																					
40013007	0	0	0	<b>0</b>																																																																																					
40063000	0	0	0	<b>0</b>																																																																																					
40063007	0	0	0	<b>0</b>																																																																																					
40073001	0	0	0	<b>0</b>																																																																																					
40073006	0	0	0	<b>0</b>																																																																																					
	<p>Fuerza en el cable: 0.1095 KN Fuerza total en los 4 cables: 0.4380 KN</p>																																																																																								

Cuadro N° II-12: Reacciones de la pretensión + preflexión

## Estudio de los esfuerzos durante el proceso de erección y comprobación de la Tensión de la barra

Antes de entrar a estudiar las tensiones analizaremos los esfuerzos máximos que se presentan en la estructura en cada una de las flechas.

El estudio se realizará en tres posiciones distintas de la estructura durante el proceso de erección. Se medirán la carga externa aplicada a los nudos de la base y las flechas del arco perimetral, estas flechas son:

Flechas (f=m)		Cargas externas aplicadas (KN)
$F_1$	1.577	0.15
$F_2$	1.940	0.20
$f_T$	2.140	0.30

Tabla N° II-9: Flechas del arco de borde

**Esfuerzos máximos ante las flechas intermedias antes de llegar a la posición final (simulación proceso de montaje)**

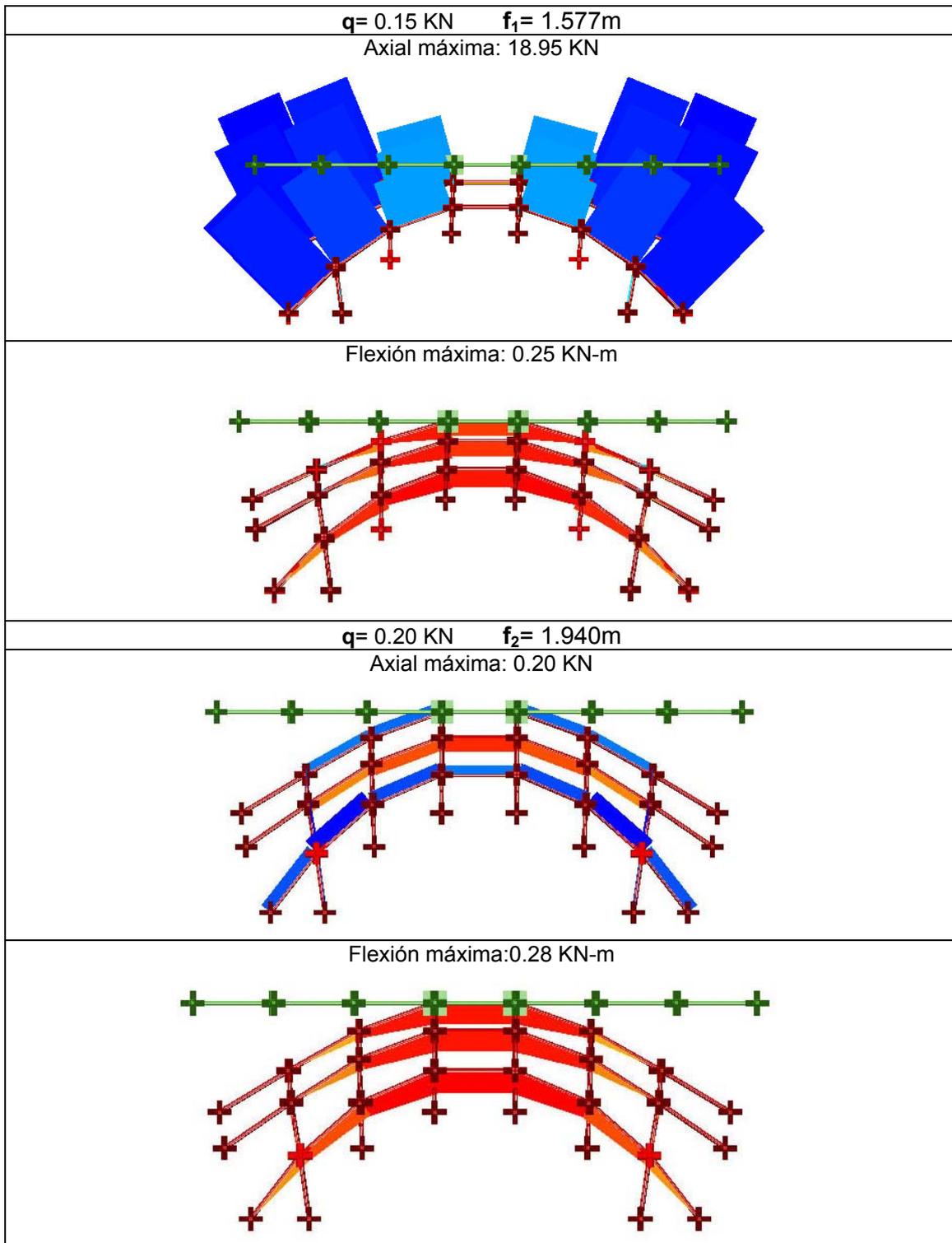


Gráfico N° II-3. Esfuerzos máximos durante el proceso e erección de la estructura

En estos gráficos se muestra claramente que cuando la malla esta a un metro y medio de flecha, es cuando se producen los mayores esfuerzos de axial. Una vez superado este máximo, entre una flecha de 1.80-1.90 m, los esfuerzos axiales disminuyen considerablemente en un 90%. Este aspecto es muy importante de considerar para la elección del mecanismo para introducir la pre-flexión durante el proceso de montaje, ya que tiene que ser un mecanismo que pueda superar el axial crítico y repartir esta carga uniformemente entre todos los componentes de la malla, para que no se presenten roturas en las barras. Este aspecto se ampliará en el tercer capítulo.

Las flexiones en ambas flechas permanecen constantes, no presentando incrementos significativos, por lo que se infiere que alcanzará sus valores máximos cuando llegue a la posición final.

## 2.5 Comprobación de la tensión inicial de la malla

Toda la malla de barras rígidas puede curvarse sin que la estructura falle, pero puede ocurrir que, durante el proceso de erección de la estructura, algunas barras se rompan cerca de los nudos por efecto de las tensiones internas que se producen. Por ello es importante verificar si, durante el proceso de montaje hasta llegar a su posición final, alguna barra se encuentra fuera del límite de rotura del material.

Para la comprobación de la tensión de las barras de sección constante se combinan los esfuerzos axial y cortante con los momentos flector y torsor. Para calcular la tensión normal y tangencial en la barras el sistema de ecuaciones es como se indica en la siguiente tabla.

Tensión Normal	Tensión Tangencial
<p>Cálculo de tensión Axial en eje x</p> $\sigma_N = \frac{N}{A}$ <p>Donde:</p> <p><math>\sigma_N</math>: Tensión Axial  N: Esfuerzo Axial en la barra en eje x  A: Área de la sección</p> <p>Cuando haya pandeo se utilizará la expresión:</p> $\sigma_N = \frac{N \cdot w}{A}$ <p>w: coeficiente de pandeo</p>	<p>Cálculo de tensión cortante en y,z</p> $\sigma_T = \sqrt{\frac{(T_y)^2 + (T_z)^2}{A}}$ <p>Donde:</p> <p><math>\sigma_T</math>: Tensión de corte  <math>T_{y,z}</math>: Esfuerzo de cortante en y,z  A: Área de la sección</p> <p>Como la sección que estamos estudiando es una sección circular el área de la tensión tangencial es igual al área para la tensión normal</p>
<p>Cálculo de tensión de flexión en ejes y,z</p> $\sigma_M = \frac{M_{y,z}}{W_{y,z}}$ <p>Donde:</p> <p><math>\sigma_M</math>: Tensión de momento de flexión  <math>M_{y,z}</math>: Esfuerzo de flexión en la barras en y,z  <math>W_{y,z}</math>: Momento resistente a flexión</p>	<p>Cálculo de tensión de torsión</p> $\sigma_{MT} = \frac{M_T}{W_T}$ <p>Donde:</p> <p><math>\sigma_T</math>: Tensión de torsor  <math>M_T</math>: Esfuerzo de torsor  <math>W_T</math>: Momento resistente a torsor</p>

Cálculo de la tensión combinada tensión normal (compresión + flexión) y tangencial (corte + torsor)

$$\sigma_{\text{COMB}} = \sqrt{(\sigma_{N_x} + \sigma_{M_{y,z}})^2 + 3(\sigma_{T_{y,z}} + \sigma_{M_T})^2}$$

Como en las barras actúan simultáneamente el esfuerzo axial y flexión, para el cálculo de la combinada suponemos que la tensión normal axial actúa sobre la sección a una distancia "y" del eje "z", entonces la tensión normal combinada es una suma simple de estas tensiones. Esta relación compresión + flexión nos dice como la dirección y la magnitud de la fuerza se relacionan con las propiedades de la sección, tal y como se comprobará mas adelante en el apartado "Estudio de la influencia de la sección de la barra en la pre-flexión inicial".

Tabla N° II-10: Sistema de ecuaciones de la tensión de la barra

El objetivo principal de este estudio fue determinar cuales son las barras críticas que pueden llegar a fallar durante el proceso de transformación de la cubierta, así como también, determinar el efecto que produce en la pre-flexión inicial de las barras la aplicación de la pretensión de la cubierta.

Utilizamos para este estudio un cuarto de la cubierta, dada la simetría en los ejes x,y,z de la cubierta. Se utilizó también los valores de los esfuerzos producidos por el programa almacenados en el archivo "BEAM3D.ELA"

Para simplificar el proceso de comprobación, se elaboraron unas tablas de cálculo donde, a partir de los esfuerzos y los momentos, se calcularon las tensiones y sus combinadas. Estas operaciones se realizaron para los puntos de inicio y final de las barras. Como en toda la malla la sección es igual, los valores del área y momentos se mantienen constantes. En la primera fila se indica el número de la barra, la ubicación del punto (inicio o final de la barra) y el número del nudo. En la primera columna se coloca la nomenclatura de cada uno de los esfuerzos y momentos, en la segunda columna los valores absolutos de los esfuerzos y en la tercera columna se calculó cada tensión (axial, flector, corte y torsor) en forma individual, aplicando las ecuaciones de la tensión normal y tangencial. En las zonas destacadas en color gris de la tabla de cálculo se ubican los valores de las tensiones combinadas, en la primera fila sombreada se calcula la combinada de la tensión normal (compresión-flexión), en la segunda fila sombreada la combinada de las tensiones tangenciales (corte-torsor) y en la última fila sombreada la combinada total, como se muestra en la siguiente tabla:

Nomenclatura de la tabla de cálculo

$\sigma_N$ : Tensión axial  
 $w$ : Coeficiente de pandeo  
 $N$ : Esfuerzo axial  
 $A$ : Área de la sección. Constante en todas las barras  
 $\sigma_M$ : Tensión de flexión  
 $M_{y,z}$ : Esfuerzo de flexión  
 $W_{y,z}$ : Momento resistente a la flexión. Constante en todas las barras

- $\sigma_T$ : Tensión cortante
- $T_{yz}$ : Esfuerzo cortante
- $\sigma_{MT}$ : Tensión torsor
- $M_t$ : Esfuerzo torsor
- $W_t$ : Momento resistente a la torsión. Constante en todas las barras
- $L_0$ : Longitud inicial
- $L_a$ : Longitud final
- $\sigma_{Total}$ : Sumatoria total de las tensiones

### Cálculo de la tensión de la barras por pre-flexión durante el proceso de erección

Tensión (KN/m<sup>2</sup>) de la malla cuando q= 0.15 KN

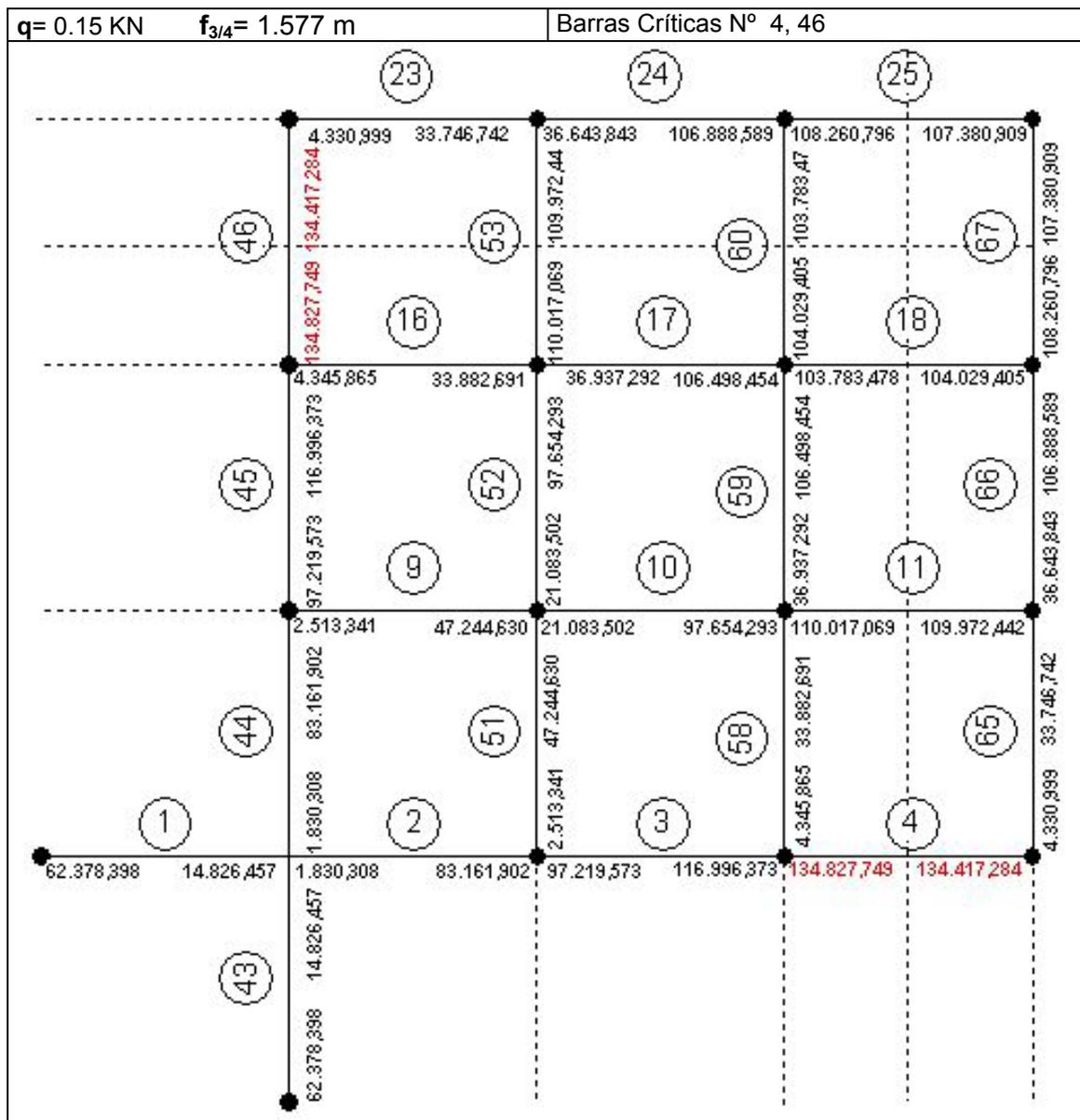


Gráfico N° II-4: Tensión (KN/m<sup>2</sup>) de la barra con una carga de 0.15 KN

En el resultado de las tensiones combinadas producidas cuando se le ha aplicado a la malla la mitad de la carga de deformación, analizaremos dos aspectos, el primero es el comportamiento del arco destacando el nudo crítico y el nudo donde aplicamos la carga de deformación y luego la malla.

En el arco es donde se presentan las tensiones máximas. A partir del nudo de intercepción de los arcos las tensiones van incrementándose hasta llegar a la clave del arco donde se encuentran las tensiones máximas, perteneciendo a las barras 4 y la 46, en el nudo **40003001** correspondiente al inicio de la barra N° 1 su comportamiento es diferente debido a que es el nudo donde aplicamos la carga de deformación.

Barra N° 1	$L_0=0$	Nudo N° 40003001	Barra N° 1	$L_a=1$	Nudo N° 40013003
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	-17,047582	-62.445,3634	N (KN)	17,047582	62.445,3634
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		A (m <sup>2</sup> )	0,000273	
<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
M <sub>y</sub> (KN-m)	0,000000	0,000000	M <sub>y</sub> (KN-m)	-0,127922	-47570,640057
M <sub>z</sub> (KN-m)	0,000000		M <sub>z</sub> (KN-m)	0,041581	
W <sub>y</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		W <sub>y</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
W <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		W <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>62.372,573435</b>		<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>14.801,933378</b>	
<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
T <sub>y</sub> (KN)	0,041581	0,134510	T <sub>y</sub> (KN)	-0,041581	0,134510
T <sub>z</sub> (KN)	0,127922		T <sub>z</sub> (KN)	-0,127922	
<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	0,000273	A (m <sup>2</sup> )	0,000273	0,000273
M <sub>t</sub> (KN-m)	0,000000		M <sub>t</sub> (KN-m)	0,000000	
W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06		W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>492,137409</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>492,137409</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>62.378,397820</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>14.826,457076</b>	

Tabla N° II-11: Discretización de las tensiones barra N° 1 con q= 0.15 KN

En el nudo **40003001** la tensión que más aporta a la combinada total es la tensión axial cuyos valores son muy similares, sólo afectada por la tensión cortante. En este punto no aparecen momentos de flexión ni momentos de torsión. Esto es debido a que en este nudo es donde se aplica la carga vertical de deformación de la malla.

Barra N° 4	$L_0=0$	Nudo N° 40033001	Barra N° 4	$L_a=1$	Nudo N° 40043001
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	-0,103729	379,516853	N (KN)	0,103729	379,516853
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		A (m <sup>2</sup> )	0,000273	
<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
M <sub>y</sub> (KN-m)	0,234371	135.207,262035	M <sub>y</sub> (KN-m)	-0,234302	134.796,795086
M <sub>z</sub> (KN-m)	0,011031		M <sub>z</sub> (KN-m)	-0,010355	
W <sub>y</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		W <sub>y</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
W <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		W <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>134.827,745182</b>		<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>134.417,278233</b>	

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
T <sub>y</sub> (KN)	0,000677	0,000681	T <sub>y</sub> (KN)	-0,000677	0,000681
T <sub>z</sub> (KN)	-0,000069		T <sub>z</sub> (KN)	0,000069	
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
M <sub>i</sub> (KN-m)	-0,000079		M <sub>i</sub> (KN-m)	0,000079	
W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	21,762739	W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	21,763286
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-19,273218</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>24,252808</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>134.827,749315</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>134.417,284797</b>	

Tabla N° II-12: Discretización de las tensiones barra N° 4 con q= 0.15 KN

La máxima tensión se produce sobre la barra 4, ubicada en la clave del arco, tanto en su punto inicial como final. Se puede observar como la tensión que más aporta a la tensión combinada es la tensión por flexión, siendo el nudo **40033001** donde se presenta el máximo valor de la tensión total combinada (normal-tangente).

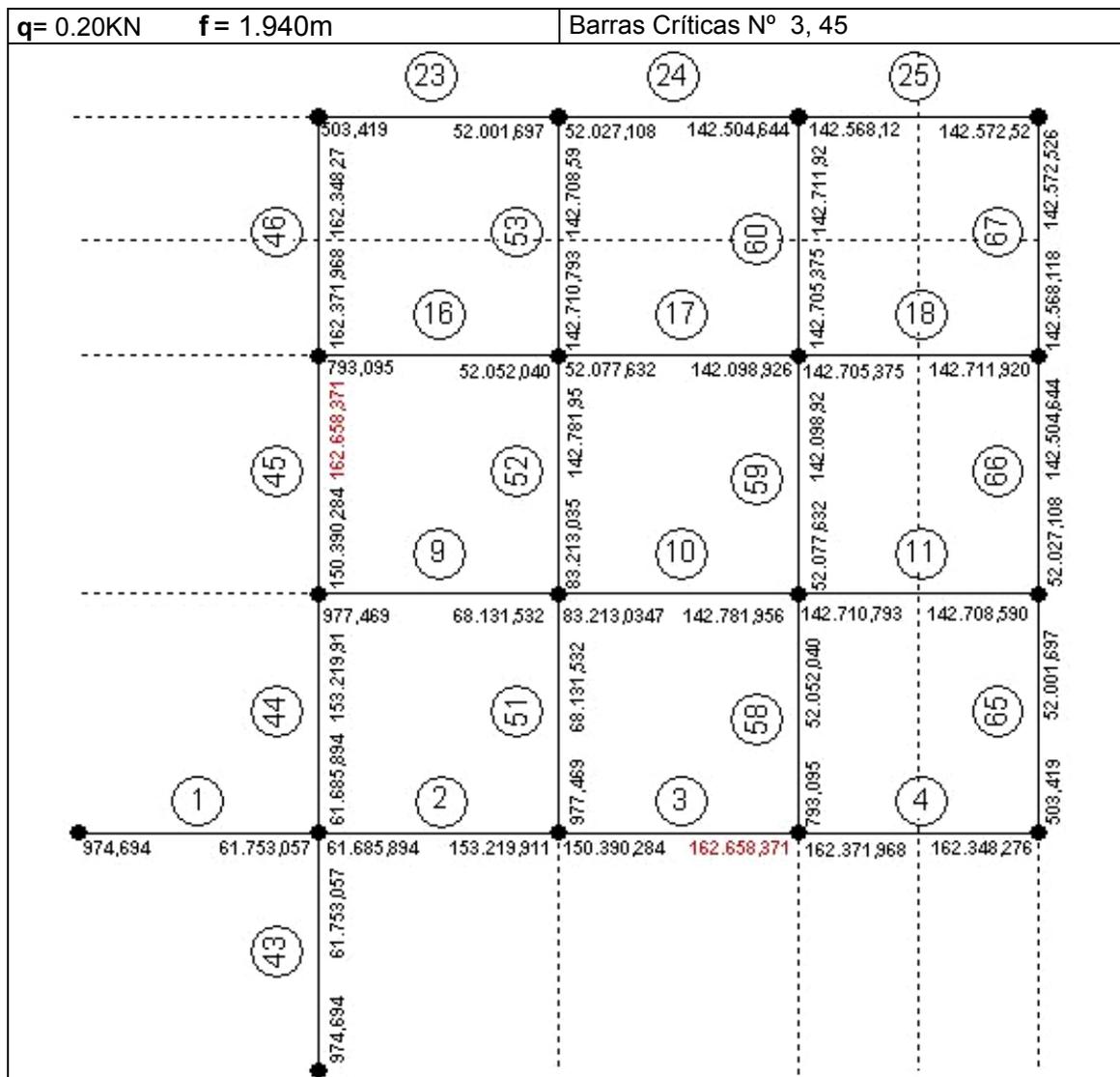


Gráfico N° II-5: Tensión (KN/m<sup>2</sup>) de la malla cuando q= 0.20 KN

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Al incrementar la carga de deformación a 0.20 KN en cada base el arco, va aumentando sus tensiones en la medida que se acerca a la clave donde se ubican los valores de máxima tensión, en los el nudos **40033001**, **40013003** asociado a las barras N° 3 y 45. Aunque el máximo valor se encuentra en el punto final de la barra 3, los valores correspondientes a la barra 4 son similares en orden de magnitud, por lo que la barra 4 y 46 pueden considerarse como barras de máxima tensión.

Con respecto al interior de la malla los valores de las tensiones combinadas tienden a ser mayores a medida que los nudos se acercan al centro de la malla.

Barra N° 3	$L_0=0$	Nudo N° 40023001	Barra N° 3	$L_a=1$	Nudo N° 40033001
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	-0,165958		N (KN)	0,165958	
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	-607,196231	A (m <sup>2</sup> )	0,000273	607,196231
<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$M_y$ (KN-m)	0,198273		$M_y$ (KN-m)	-0,282028	
$M_z$ (KN-m)	0,075763		$M_z$ (KN-m)	-0,014297	
$W_y$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		$W_y$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
$W_z$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	150.983,517897	$W_z$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	163.263,917664
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>150.376,321666</b>		<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>162.656,721432</b>	
<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$T_y$ (KN)	0,061466	(KN/m <sup>2</sup> )	$T_y$ (KN)	-0,061466	(KN/m <sup>2</sup> )
$T_z$ (KN)	0,083754	0,103888	$T_z$ (KN)	-0,083754	0,103888
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$M_t$ (KN-m)	0,002915		$M_t$ (KN-m)	-0,002915	
$W_t$ (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	803,027895	$W_t$ (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	-803,027348
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>1.183,127712</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>422,927531</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>150.390,283899</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>162.658,370920</b>	

Tabla N° II-13: Discretización de las tensiones barra N° 3 con q= 0.20 KN

La tensión máxima combinada (normal-tangente) se produce en el punto final del nudo N° **40033001**. La tensión que más aporta a la combinada es la tensión de flexión siendo incrementada en menor medida por el aporte de la tensión axial y tangente.

Las tensiones sufren un incremento del 20% con respecto a los valores de máxima tensión del cálculo anterior.

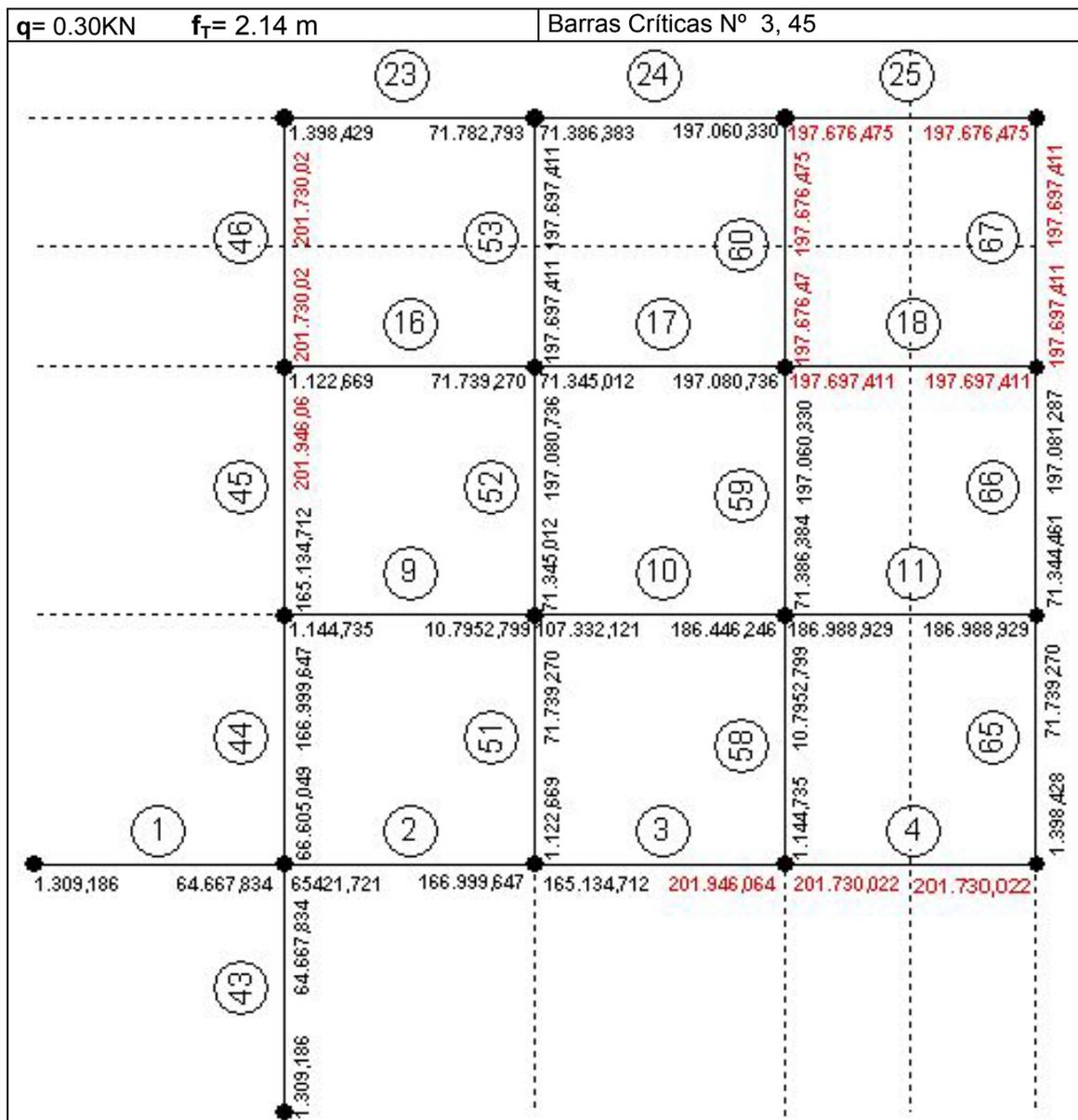


Gráfico N° II-6. Tensión (KN/m<sup>2</sup>) de la malla cuando q= 0.30 KN (forma final)

Al incrementar la carga de deformación a 0.30 KN en cada base, el arco sigue aumentando sus tensiones en la medida que se acerca a la clave, donde se ubican los valores de máxima tensión, los nudos **40013003**, **40033001** asociado a la barras N° 3, 45 al igual que el cálculo anterior. Aunque el máximo valor se encuentra en el punto final de la barra 3 los valores correspondientes a la barra 4 son similares en orden de magnitud, por lo que la barra 4 y 46 pueden considerarse igualmente como barras de máxima tensión.

Con respecto al interior de la malla los valores de las tensiones combinadas tienden a ser mayores a medida que los nudos se acercan al centro de la malla

Barra N° 3		$L_0=0$	Nudo N° 40023001	Barra N° 3		$L_a=1$	Nudo N° 40033001
$\sigma_{Normal}$			$\sigma_N$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{Normal}$			$\sigma_N$ (KN/m <sup>2</sup> )
N (KN)	-0,231859			N (KN)	0,231859		
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		-848,310482	A (m <sup>2</sup> )	0,000273		848,310482
$M_y$ (KN-m)	0,226139		$\sigma_M$ (KN/m <sup>2</sup> )	$M_y$ (KN-m)	-0,357586		$\sigma_M$ (KN/m <sup>2</sup> )
$M_z$ (KN-m)	0,075121			$M_z$ (KN-m)	-0,010486		
$W_y$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06			$W_y$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		
$W_z$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		165.982,916849	$W_z$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		-202.793,813220
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math></b> <b>(KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>165.134,606367</b>			<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math></b> <b>(KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>201.945,502737</b>		
$\sigma_{Tangencial}$			$\sigma_T$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{Tangencial}$			$\sigma_T$ (KN/m <sup>2</sup> )
$T_y$ (KN)	0,064636			$T_y$ (KN)	-0,064636		
$T_z$ (KN)	0,131447		0,146479	$T_z$ (KN)	-0,131447		0,146479
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		$\sigma_{MT}$ (KN/m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	0,000273		$\sigma_{MT}$ (KN/m <sup>2</sup> )
$M_t$ (KN-m)	0,002943			$M_t$ (KN-m)	-0,002943		
$W_t$ (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06		810,741368	$W_t$ (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06		-810,740821
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math></b> <b>(KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>1.346,6692</b>			<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math></b> <b>(KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>274,812989</b>		
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>165.151,078634</b>			<b>c Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>201.946,06369</b>		

Tabla N° II-14: Discretización de las tensiones barra N° 3 con  $q=0.30$  KN

Al igual que en cálculo anterior, la máxima tensión combinada (normal-tangente) se produce en el punto final del nudo N° **40033001**. La tensión que más aporta a la combinada es la tensión de flexión presentando un incremento del 20% con respecto a los valores de máxima tensión del cálculo anterior.

Esta tensión producida por la pre-flexión de las barras consume un 41,8% del límite de rotura del material.

## Cálculo de la tensión de las barras por pre-flexión + pre-tensión

Esta comprobación de las tensiones se realizó con la participación conjunta de las pre-flexión de las barras y la pretensión de la membrana.

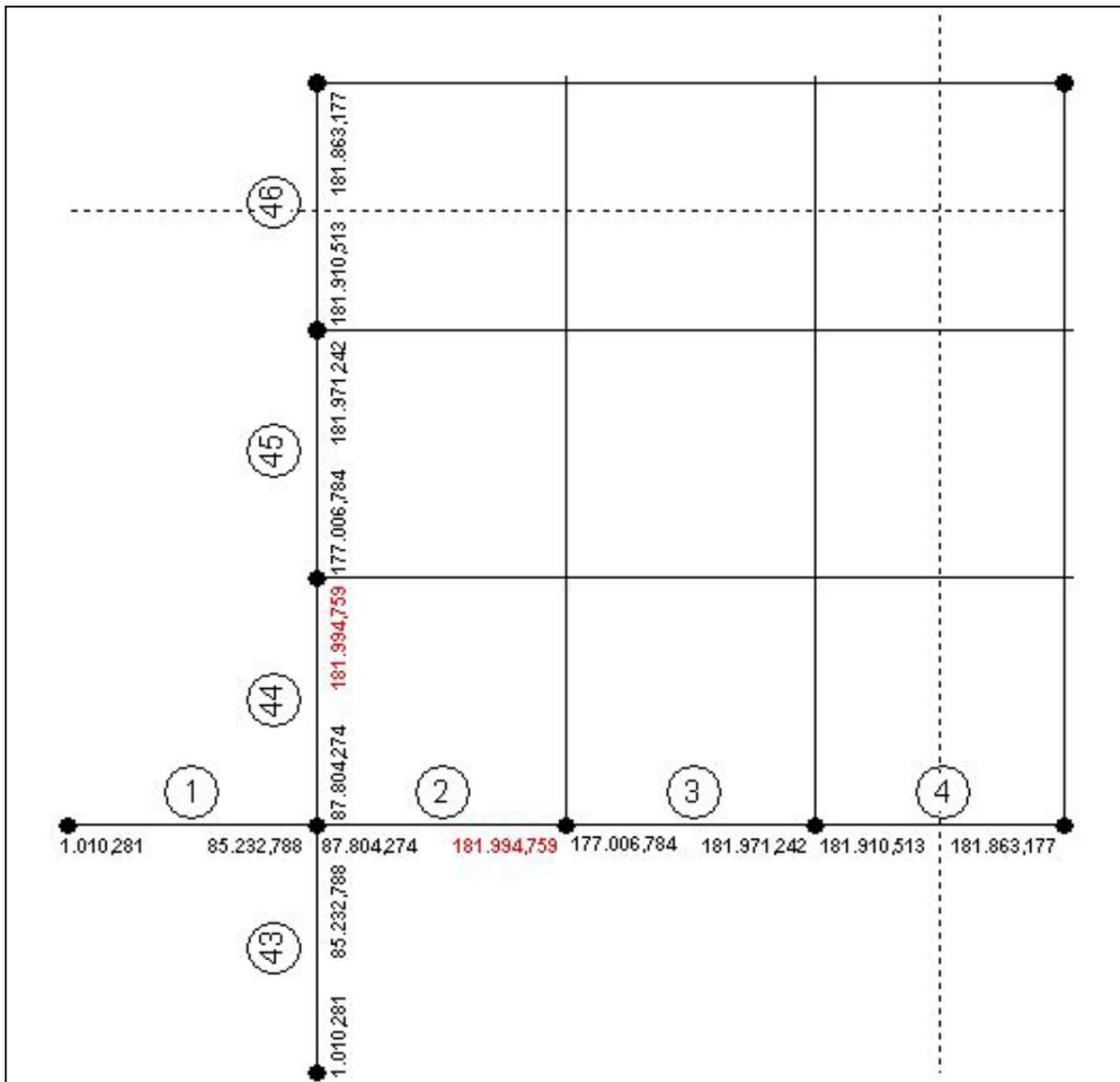


Gráfico N° II-7: Tensiones (KN/ m2) en arcos perimetrales de borde

Este cálculo de tensión toma en cuenta los esfuerzos producidos por la pre-flexión + pretensión sin considerar el pandeo. Las tensiones van aumentando su valor en la medida que se acercan a la clave del arco.

La tensión máxima se ubica en los nudos **N° 40023001, 40013002**, asociados a la barra 2, 44 y en los nudos N°, **40033001, 40043001, 40013003, 40013004** pertenecientes a las barras 3, 4, 45,46 respectivamente. Se presentan tensiones de igual orden de magnitud que a la del nudo de tensión máxima.

A continuación se presenta los esfuerzos de pre-flexión + pretensión en las barras críticas :

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Barra N° 2			Barra N° 2		
$L_0=0$		Nudo N° 40013001	$L_a=1$		Nudo N° 40023001
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	0,285407	1.045,45	N (KN)	-0,285407	-1.044,22838
A (m2)	0,000273		A (m2)	0,000273	
My (KN-m)	0,142419	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	My (KN-m)	-0,263752	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Mz (KN-m)	0,015051		Mz (KN-m)	-0,064661	
Wy (m3)	1,8150E-06	86.760,040882	Wy (m3)	1,8150E-06	-180.943,197475
Wz (m3)	1,8150E-06		Wz (m3)	1,8150E-06	
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>296.690,842783</b>		<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-181.987,425862</b>	
<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>			<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		
Ty (KN)	-0,049611	0,131084	Ty (KN)	0,049611	0,131084
Tz (KN)	0,121333		Tz (KN)	-0,121333	
A (m2)	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	A (m2)	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Mt (KN-m)	-0,001683		Mt (KN-m)	0,001683	
Wt (m3)	3,630012E-06	-463,634542	Wt (m3)	3,630012E-06	463,635089
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>15,965782</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>943,235413</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>87.804,273625</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>181.994,758856</b>	

Tabla N° II-15: Discretización de las tensiones barra N° 2 preflexión + pretensión

Barra N° 3			Barra N° 3		
$L_0=0$		Nudo N° 40023001	$L_a=1$		Nudo N° 40033001
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	-0,207927	-760,749652	N (KN)	0,207927	760,749652
A (m2)	0,000273		A (m2)	0,000273	
My (KN-m)	0,284632	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	My (KN-m)	-0,298349	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Mz (KN-m)	0,038014		Mz (KN-m)	-0,033306	
Wy (m3)	1,8150E-06	177.765,797616	Wy (m3)	1,8150E-06	-182.729,417406
Wz (m3)	1,8150E-06		Wz (m3)	1,8150E-06	
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>177.005,047964</b>		<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-181.968,667753</b>	
<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Ty (KN)	0,004708	0,014502	Ty (KN)	-0,004708	0,014502
Tz (KN)	0,013717		Tz (KN)	-0,013717	
A (m2)	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	A (m2)	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Mt (KN-m)	-0,001836		Mt (KN-m)	0,001836	
Wt (m3)	3,630012E-06	-505,783162	Wt (m3)	3,630012E-06	505,783708
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-452,722786</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>558,844084</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>177.006,784837</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>181.971,242135</b>	

Tabla N° II-16: Discretización de las tensiones barra N° 3 preflexión + pretensión

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Barra N° 4	$L_0=0$	Nudo N° 40033001	Barra N° 4	$L_a=1$	Nudo N° 40043001
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	-0,264029		N (KN)	0,264029	
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	-966,011965	A (m <sup>2</sup> )	0,000273	966,011965
$M_y$ (KN-m)	0,328940	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	$M_y$ (KN-m)	-0,328807	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$M_z$ (KN-m)	0,002982		$M_z$ (KN-m)	-0,003029	
$W_y$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	182.876,524352	$W_y$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	-182.829,141591
$W_z$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		$W_z$ (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>181.910,512387</b>		<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-181.863,129625</b>	
<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$T_y$ (KN)	-0,000047		$T_y$ (KN)	0,000047	
$T_z$ (KN)	-0,000133	0,000141	$T_z$ (KN)	0,000133	0,000141
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	A (m <sup>2</sup> )	0,000002	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$M_t$ (KN-m)	0,000008		$M_t$ (KN-m)	-0,000008	
$W_t$ (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	2,204123	$W_t$ (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	-2,203848
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>2,719951</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>75,515049</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>181.910,512448</b>		<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>182.193,392</b>	

Tabla N° II-17: Discretización de las tensiones barra N° 4 preflexión + pretensión

Si bien la tensión axial aumenta por la pretensión de la membrana, lo que más perturba la estructura es la tensión por flexión, debido como es lógico a la pre-flexión inicial, sin embargo, hay una reducción de la tensión normal con respecto a la tensión de la pre-flexión inicial en un 10 %.

La tensión combinada tangencial es un valor muy reducido confirmando que en los nudos no se presentan estas tensiones. El valor de la tensión combinada total está muy cerca del valor de la tensión de la pre-flexión, observándose una reducción de la tensión combinada con respecto a la tensión en el mismo punto en la tensión de pre-flexión inicial, pasando de un máximo de 41,8% del límite de rotura del material a 37,5 %. Es el esfuerzo de flexión el que más aporta a la tensión combinada, representando un total de 99%. El aporte de las otras tensiones resta al total de la flexión pero no pasan del 1%.

## Tensiones (KN/ m2) en el interior de la malla

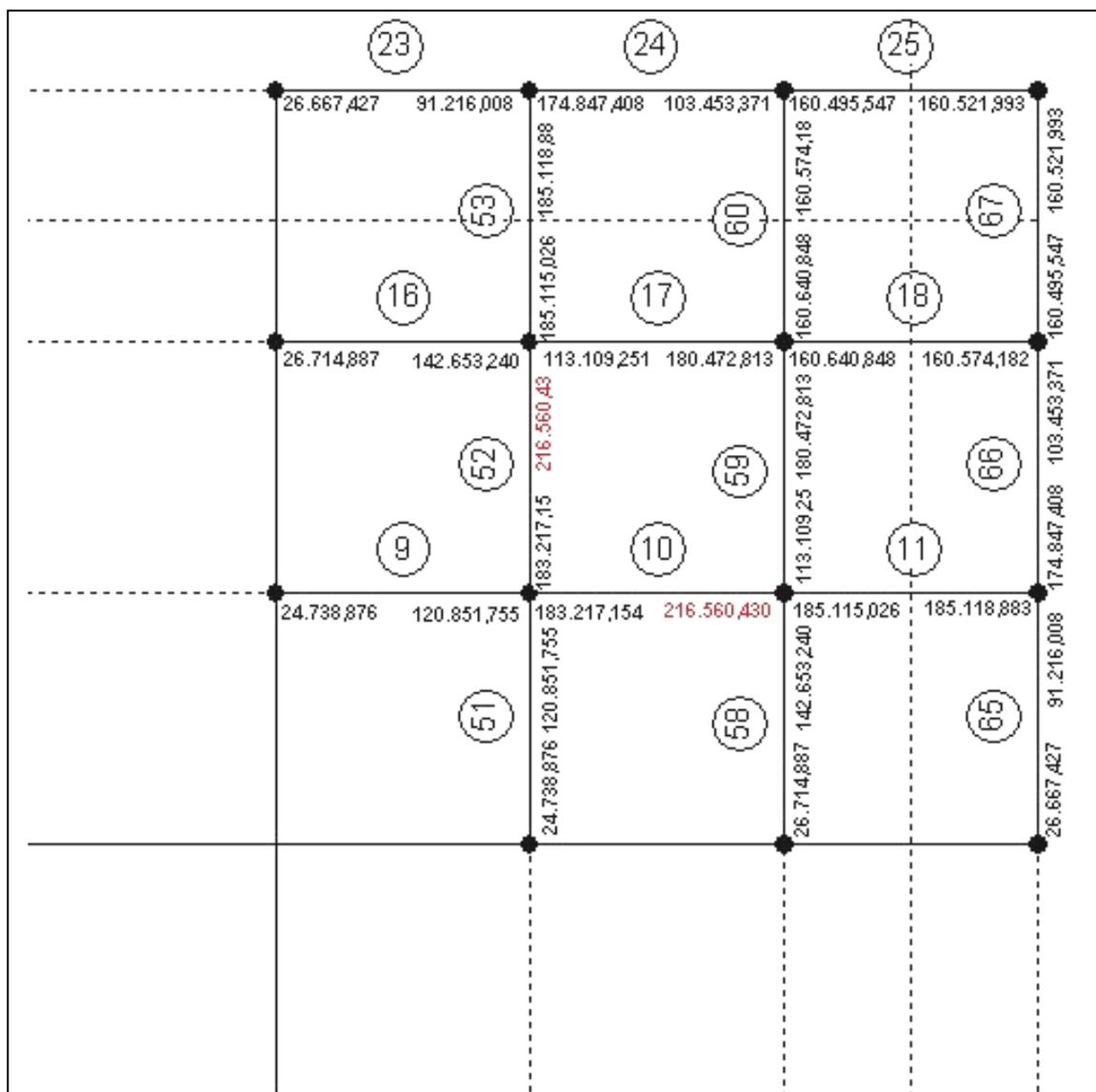


Gráfico N° II-8: Tensiones (KN/ m2) en la malla

En las barras que forman la malla, las tensiones críticas se ubican en los nudos **40033002** y **40023003** asociados a las barras 10 y 52, respectivamente. Los valores mínimos se presentan en los nudos cuyos puntos iniciales están sobre el arco y la tensión va aumentando progresivamente hasta el nudo crítico. Luego baja para permanecer constante en la zona central de la malla. En los puntos altos de la cúpula, las tensiones se mantienen en un 33% del límite elástico del material. A continuación se presenta los esfuerzos en los nudos críticos.

Barra N° 10		$L_0=0$	Nudo N° 40023003	Barra N° 10		$L_a=1$	Nudo N° 40033002
$\sigma_{Normal}$			$\sigma_N$ (KN/m <sup>2</sup> )				$\sigma_N$ (KN/m <sup>2</sup> )
w	1,000000			w	1,000000		
N (KN)	0,674492		2.467,787033	N (KN)	-0,674492		-2.467,787033
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		$\sigma_M$ (KN/m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	0,000273		$\sigma_M$ (KN/m <sup>2</sup> )
M <sub>y</sub> (KN-m)	0,238240			M <sub>y</sub> (KN-m)	-0,282643		
M <sub>z</sub> (KN-m)	0,089754		180712,344251	M <sub>z</sub> (KN-m)	-0,105931		-214089,643271
W <sub>y</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06			W <sub>y</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		
W <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06			W <sub>z</sub> (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>183.180,13128</b>			<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-216.557,430304</b>		
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math></b>			$\sigma_T$ (KN/m <sup>2</sup> )	<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math></b>			$\sigma_T$ (KN/m <sup>2</sup> )
T <sub>y</sub> (KN)	-0,195685		0,200659	T <sub>y</sub> (KN)	0,195685		0,200659
T <sub>z</sub> (KN)	0,044402			T <sub>z</sub> (KN)	-0,044402		
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		$\sigma_{MT}$ (KN/m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	0,000273		$\sigma_{MT}$ (KN/m <sup>2</sup> )
M <sub>t</sub> (KN-m)	0,005054			M <sub>t</sub> (KN-m)	-0,005054		
W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06		1392,282126	W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06		-1392,281579
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>2126,440941</b>			<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-658,122764</b>		
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>183.217,15462</b>			<b>c Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>216.560,43035</b>		

Tabla N° II-18: Discretización de las tensiones barra N° 10 preflexión + pretensión

En este punto tanto el esfuerzo axial como el flector aumentan. El esfuerzo axial se incrementa un 76% del valor de la pre-flexión inicial y la flexión también aumenta, aunque en menos proporción, incrementándose en un 11,80% del valor de la pre-flexión inicial. Esto es debido a que en el punto **40023002** ocurre un punto de suspensión de la membrana transfiriendo la pretensión a los puntos finales de las barras asociadas al nudo de suspensión.

La tensión tangencial también aumenta, siendo la tensión de torsor la que más incrementa su valor en un 21,2% respecto al esfuerzo de torsor de la pre-flexión. Sin embargo, el valor que más tensión aporta a la barra sigue siendo la flexión, la cual aporta el 98,84% del total de la tensión combinada. En este nudo, la tensión combinada consume un 44,8% del límite rotura del material.

Comparativa de las tensiones combinadas totales máximas entre la pre-flexión + pretensión, sólo la pre-flexión y la diferencia entre ambas definiendo sólo la pretensión.

N° Barra	Pre-flexión+Pretensión	Pre-flexión	Pre-tensión
	Comb $\sigma_{Total}$ (KN/m <sup>2</sup> )	Comb $\sigma_{Total}$ (KN/m <sup>2</sup> )	Comb $\sigma_{Total}$ (KN/m <sup>2</sup> )
2 en arco	181.994,759	166.999,646	1.500,113
3 en arco	181.971,243	201.946,064	-19.974,821
4 en arco	181.910,513	201.730,022	-19.819,500
10 en malla	216.560,431	186.446,247	<b>30.114,184</b>
51 en malla	83.416,706	89.924,729	-6.508,023

Tabla N° II-19: Comparativa de las tensiones combinadas totales máximas entre la pre-flexión + pretensión

De la comparación de estos datos podemos concluir que la pretensión de la membrana actúa sobre las barras pre-flectadas. En las barras ubicadas en los arcos perimetrales disminuyen las tensiones combinadas totales, pero en las barras ubicadas en el interior de

la malla, específicamente aquellas que rodean al nudo N° **40023002** donde se fija la membrana, hay un aumento de la tensión, siendo su máximo de 30.114,2 KN/m<sup>2</sup> incrementando la tensión de la barra 10 en un 16%.

### Comprobación del pandeo

Otro nivel de comprobación de la malla es el efecto de pandeo en las barras. El pandeo que se pudiera presentar en la estructura es el denominado pandeo por esbeltez, es decir el pandeo que se presenta en piezas esbeltas sometidas a compresión. Este efecto de pandeo puede definirse como una deformación lateral de la pieza y perpendicular al esfuerzo de compresión. Si el elemento tiene poca capacidad para resistir flexión es un elemento que tiende a sufrir pandeo. Estudiaremos este efecto a través del método de la carga crítica de Euler correspondiente a la barra doblemente articulada, pudiéndose expresar por la ecuación:

<p>Ecuación de Euler:</p> $P_c = \frac{\pi^2 E I}{L^2}$ <p>sustituyendo, tenemos que el valor de la fuerza de compresión crítica de la estructura es:</p> <p><b>P<sub>c</sub> = 6.583027 KN</b></p>	<p>Donde:</p> <p><b>P<sub>c</sub></b>: Carga de compresión crítica  <b>E</b>: Módulo de elasticidad  <b>I</b>: Inercia de la sección de la barra  <b>L</b>: Longitud de la barra</p>
---	--

Tabla N° II-20: Ecuación de la carga crítica de Euler

Esta ecuación nos señala que el pandeo elástico es:

1. Proporcional a la rigidez del material.
2. Proporcional a la rigidez a flexión de la sección de la barra.
3. Inversamente proporcional a la longitud de la barra, siendo ésta un indicador de la esbeltez.

Para comprobar que no haya pandeo se utiliza la siguiente expresión **P < P<sub>c</sub>**, es decir, que los valores de los esfuerzos de los elementos sometidos a compresión no deber ser mayor al valor de la compresión crítica. En el caso de la estructura en estudio consideramos los valores de compresión que incluyen la pre-flexión de las barras y la pretensión de la membrana, en este sentido tenemos que el valor máximo de compresión de la estructura es de **P = 0,75 KN**, este valor esta asociado a las barras N° 9,13,30,34,51,72,76. Por tanto podemos afirmar, dado los resultados, que el valor de P máximo es muy pequeño y no sobrepasa el valor de la compresión crítica, por tanto la flecha de pandeo tiende a 0.

Otra manera de comprobar estos resultados es comparándolo las tensiones, de compresión crítica de la sección y la máxima tensión de compresión en la estructura, que se puede expresar con la ecuación:

<p>Tensión crítica de compresión</p> $\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$ $\lambda = \frac{L}{i}$ $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$ <p>Sustituyendo, tenemos:</p> <p><b>i = 0.01032</b></p> <p><b>λ = 96.9578</b></p> <p><b>σ<sub>c</sub> = 24.146,90 KN/m<sup>2</sup></b></p>	<p>Donde:</p> <p><b>σ<sub>c</sub></b>: Tensión crítica de compresión</p> <p><b>E</b>: Módulo de elasticidad de la sección</p> <p><b>λ</b>: Esbeltez de la barra</p> <p><b>i</b>: Radio de inercia mínimo</p>
---	--

Tabla N° II-21: Tensión crítica de compresión

También podemos calcular este valor dividiendo el esfuerzo de compresión crítica entre el área de la sección de la barra y compararlo con el valor de la tensión crítica de compresión calculada anteriormente:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A}$$

Sustituyendo:

$$\sigma_c = 24.113,66 \text{ KN/m}^2$$

La tensión máxima de compresión se ubica en la barra N° 10 con un valor de **2.467,787 KN/m<sup>2</sup>**

Si comparamos los dos valores de la tensión crítica de compresión observamos que están en igual orden de magnitud. Si comparamos el valor de la tensión crítica de compresión con la máxima tensión de compresión producida en la estructura vemos que es un valor muy por debajo de la tensión crítica, lo que nos ratifica que el pandeo en la estructura tiende a **0**.

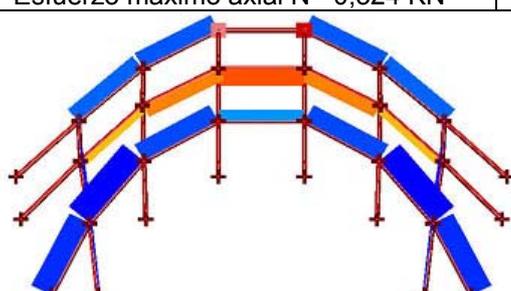
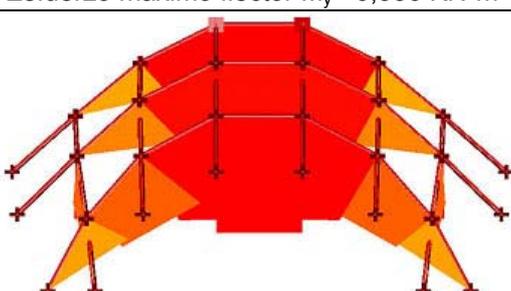
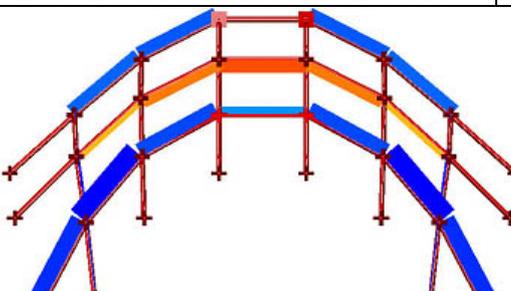
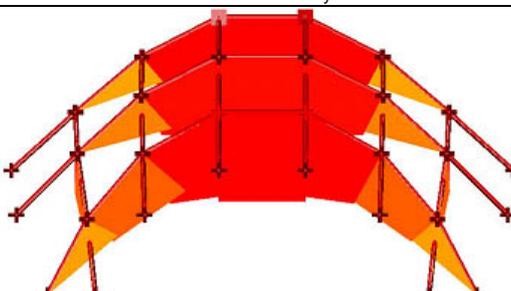
## 2.6 Estudio de la influencia de la sección de la barra en la pre-flexión inicial y la geometría final en la tensión de las barras críticas

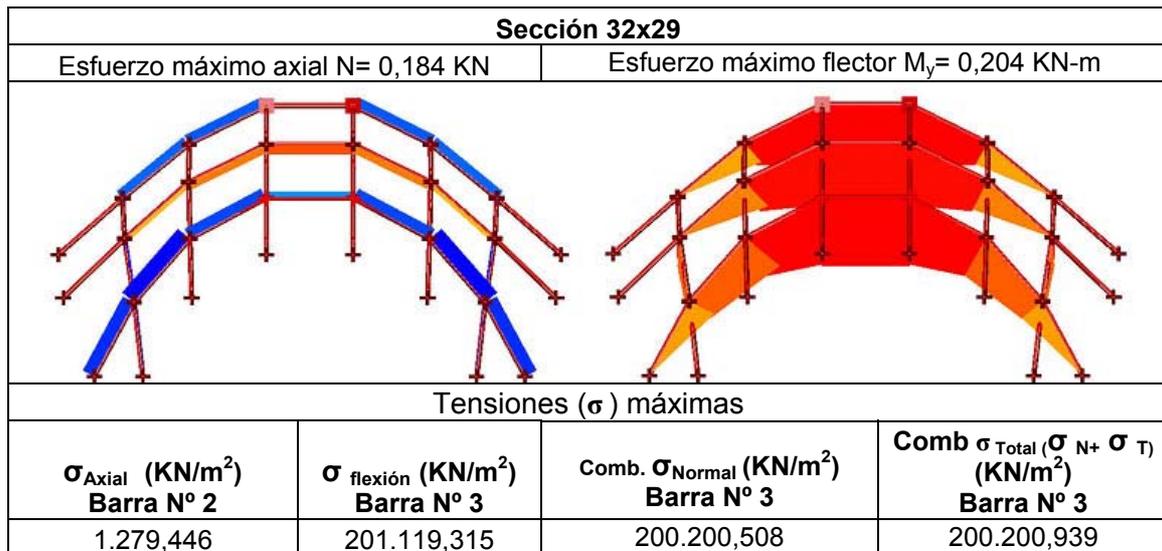
La rigidez de la malla plana depende en gran medida de la sección de las barras. A mayor sección habrá mayor inercia y, por ende, mayor oposición a curvarse. Este estudio tiene por objetivo determinar la influencia de la sección en la tensión de flexión. La prueba se realizó tomando como variable fija la geometría y como referencia la flecha del arco igual a  $f_{arc} = 2.14 \text{ m}$ . Las variables de sección de la barra y carga externa son modificables, ya que son interdependientes.

La primera parte del estudio consistió en tomar la sección de diámetro externo 32 mm y modificar su diámetro interno para ver los cambios en los esfuerzos y en las tensiones. Luego se seleccionaron dos secciones comerciales (8 mm por encima y por debajo de 32 mm) para aplicarles cargas externas y observar su comportamiento.

Diámetro externo  $\Phi_{ext} = 32 \text{ mm}$ ,  $\Phi_{int} = \text{variable}$  y  $f_{arc} = 2.14 \text{ m}$

Sección mm	Espesor mm	Carga de Deformación		$I_x \text{ (m}^4\text{)}$	$I_{y,z} \text{ (m}^4\text{)}$	$W_y \text{ (m}^3\text{)}$	$W_z \text{ (m}^3\text{)}$
		KN/base	8bases				
32x26	3	0.30	2.40	$5.80082 \times 10^{-8}$	$2.90400 \times 10^{-8}$	$1.81501 \times 10^{-6}$	$3.63001 \times 10^{-6}$
32x28	2	1,215	1,72	$4.260 \times 10^{-8}$	$2.130 \times 10^{-8}$	$1.33125 \times 10^{-6}$	$2.6625 \times 10^{-6}$
32x29	1.5	0.17	1.36	$3,3506 \times 10^{-8}$	$1,67533 \times 10^{-8}$	$1,04708 \times 10^{-6}$	$2,09416 \times 10^{-6}$

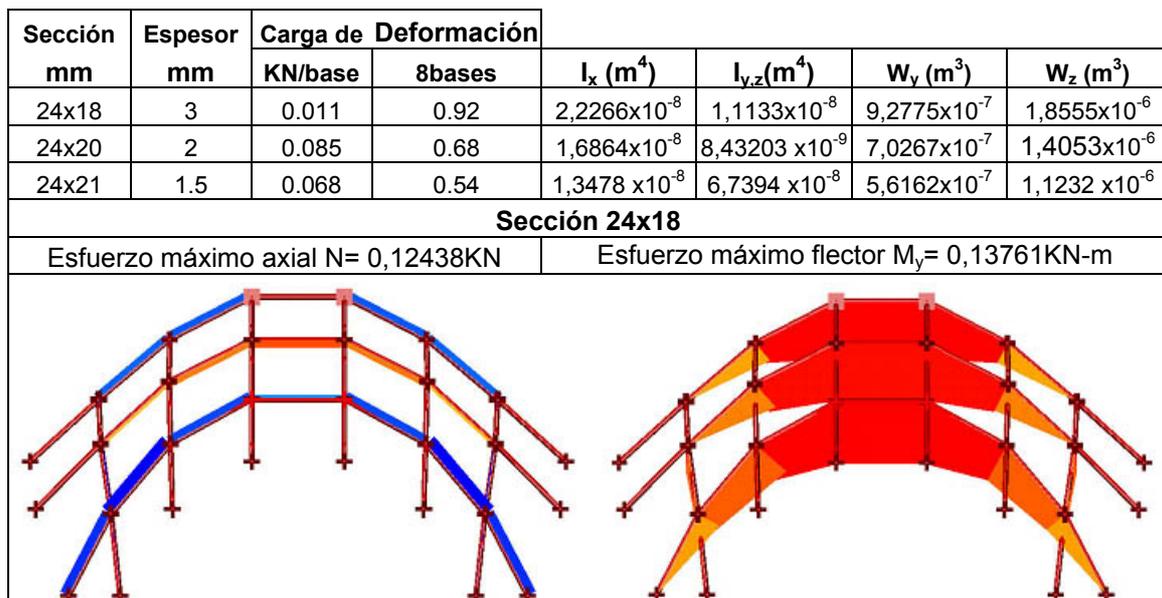
Sección 32x26			
Esfuerzo máximo axial $N = 0,324 \text{ KN}$		Esfuerzo máximo flector $M_y = 0,356 \text{ KN-m}$	
			
Tensiones ( $\sigma$ ) máximas			
$\sigma_{Axial} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 2	$\sigma_{flexión} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3	Comb. $\sigma_{Normal} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3	Comb $\sigma_{Total} (\sigma_N + \sigma_T) \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3
1.183,403	202.793,813	201.945,503	201.946,064
Sección 32x28			
Esfuerzo máximo axial $N = 0.233 \text{ KN}$		Esfuerzo máximo flector $M_y = 0.259 \text{ KN-m}$	
			
Tensiones ( $\sigma$ ) máximas			
$\sigma_{Axial} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 2	$\sigma_{flexión} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3	Comb. $\sigma_{Normal} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3	Comb $\sigma_{Total} (\sigma_N + \sigma_T) \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3
1.234,019	200.477,765	199.591,473	199.591,979



Cuadro N° II-13: Estudio de la sección de la barras en la pre-flexión

A pesar de que los valores de la carga externa de deformación van disminuyendo a medida que el espesor es menor debido a que la barra pone menos resistencia a ser flectada, los valores resultantes tanto de los esfuerzos axiales como flectores se mantienen en un orden de magnitud similar entre ellos consumiendo un 40% de la tensión de rotura. Es por esto, que al comparar los valores de las tensiones máximas podemos concluir que la variación de los espesores manteniendo el diámetro exterior constante no afecta significativamente las tensiones y, por lo tanto, la malla tendrá una rigidez final similar en cualquiera de los espesores. Como se observa, un espesor menor sólo facilitaría el proceso de deformación de la malla.

¼ Diámetro externo (8mm menos)  $\Phi_{ext}= 24$  mm,  $\Phi_{int}=$  variable y  $f_{arc}= 2.14$ m

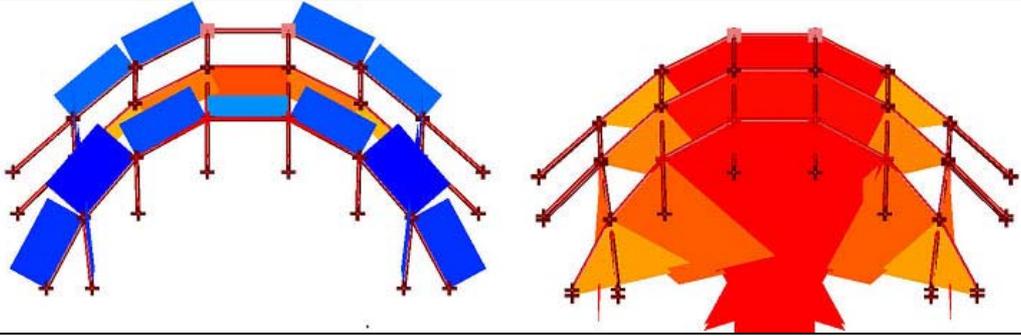
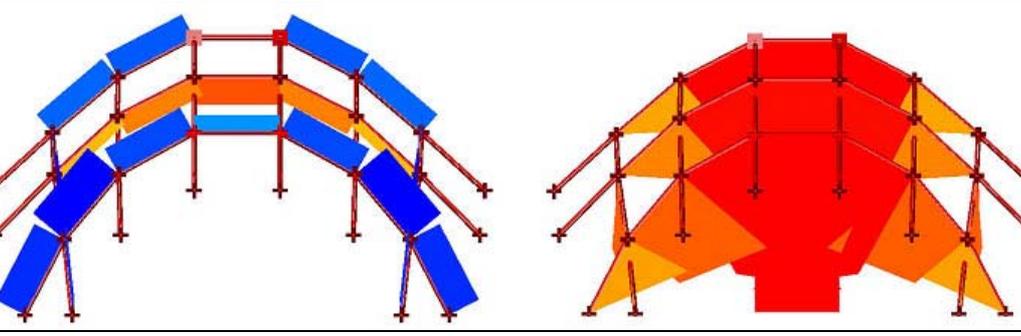


Tensiones ( $\sigma$ ) máximas			
$\sigma_{\text{Axial}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 2	$\sigma_{\text{flexión}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb. $\sigma_{\text{Normal}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb $\sigma_{\text{Total}} (\sigma_{\text{N}} + \sigma_{\text{T}})$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3
628,475	152.813,537	152.361,926	152.363,031
Sección 24x20			
Esfuerzo máximo axial N= 0.093 KN		Esfuerzo máximo flector M <sub>y</sub> = 0,102 KN-m	
Tensiones ( $\sigma$ ) máximas			
$\sigma_{\text{Axial}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 2	$\sigma_{\text{flexión}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb. $\sigma_{\text{Normal}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb $\sigma_{\text{Total}} (\sigma_{\text{N}} + \sigma_{\text{T}})$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3
666,020	149.255,079	148.775,994	148.776,970
Sección 24x21			
Esfuerzo máximo axial N= 0,074 KN		Esfuerzo máximo flector M <sub>y</sub> = 0.082 KN-m	
Tensiones ( $\sigma$ ) máximas			
$\sigma_{\text{Axial}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 2	$\sigma_{\text{flexión}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb. $\sigma_{\text{Normal}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb $\sigma_{\text{Total}} (\sigma_{\text{N}} + \sigma_{\text{T}})$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3
694,699	148.872,627	148.372,809	148.373,698

Cuadro N° II-14: Estudio de la sección de la barras en la pre-flexión

El comportamiento de esta sección es similar al de la anterior. La variación de los espesores hace que se necesite menos carga para deformar la malla y los valores resultantes tanto de los esfuerzos axiales como flectores se mantienen en un orden de magnitud similar. Aunque al ser una sección tubular de diámetro externo menor las tensiones disminuyen notablemente, consumiendo un 30% de la tensión de rotura, 10% menos que la sección anterior. Hay que tener en cuenta que al disminuir la tensión de flexión también disminuye la rigidez global de la malla y por tanto disminuye su capacidad de resistencia ante cargas externas horizontales y verticales.

¼ Diámetro externo (8 mm más)  $\Phi_{ext} = 40 \text{ mm}$ ,  $\Phi_{int} = \text{variable}$  y  $f_{arc} = 2.14 \text{ m}$

Sección mm	Espesor mm	Carga de Deformación		$I_x \text{ (m}^4\text{)}$	$I_{y,z} \text{ (m}^4\text{)}$	$W_y \text{ (m}^3\text{)}$	$W_z \text{ (m}^3\text{)}$
		KN/base	8bases				
40x34	3	0.59	4.72	$1,2013 \times 10^{-7}$	$6,0066 \times 10^{-8}$	$3,0033 \times 10^{-6}$	$6,0066 \times 10^{-6}$
40x36	2	0.44	3.52	$8,6431 \times 10^{-8}$	$4,3215 \times 10^{-8}$	$2,1607 \times 10^{-6}$	$4,3215 \times 10^{-6}$
40x37	1.5	0.34	2.72	$6,73321 \times 10^{-8}$	$3,3666 \times 10^{-8}$	$1,6833 \times 10^{-6}$	$3,3666 \times 10^{-6}$
<b>Sección 40x34</b>							
Esfuerzo máximo axial $N = 0,6402 \text{ KN}$				Esfuerzo máximo flector $M_y = 0,721 \text{ KN-m}$			
							
Tensiones ( $\sigma$ ) máximas							
$\sigma_{Axial} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 2	$\sigma_{flexión} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3	$\text{Comb. } \sigma_{Normal} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3		$\text{Comb } \sigma_{Total} (\sigma_{N+} + \sigma_{T})$ $\text{(KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3			
1.835,854	247.811,817	246.492,210		246.492,449			
<b>Sección 40x36</b>							
Esfuerzo máximo axial $N = 0,476 \text{ KN}$				Esfuerzo máximo flector $M_y = 0,529 \text{ KN-m}$			
							
Tensiones ( $\sigma$ ) máximas							
$\sigma_{Axial} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 2	$\sigma_{flexión} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3	$\text{Comb. } \sigma_{Normal} \text{ (KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3		$\text{Comb } \sigma_{Total} (\sigma_{N+} + \sigma_{T})$ $\text{(KN/m}^2\text{)}$ Barra N° 3			
1.989,952	252.025,7179	250.599,321		250.599,404			

Sección 40x37			
Esfuerzo máximo axial N= 0,368KN		Esfuerzo máximo flector My= 0,410KN-m	
Tensiones ( $\sigma$ ) máximas			
$\sigma_{\text{Axial}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 2	$\sigma_{\text{flexión}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb. $\sigma_{\text{Normal}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3	Comb $\sigma_{\text{Total}} (\sigma_{\text{N}} + \sigma_{\text{T}})$ (KN/m <sup>2</sup> ) Barra N° 3
2.026,358	251.090,394	249.636,856	249.636,922

Cuadro N° II-15: Estudio de la sección de la barras en la pre-flexión

Esta sección tiene un comportamiento similar a la anterior. La variación de los espesores hace que se necesite menos carga para deformar la malla y por tanto facilitará el proceso de deformación. Los valores resultantes tanto de los esfuerzos axiales como flectores se mantienen en un orden de magnitud similar, aunque al ser una sección tubular de diámetro externo considerable, las tensiones aumentan notablemente con respecto a las tensiones de las dos secciones anteriores, consumiendo un 50% de la tensión de rotura, 10% más de la sección inmediata inferior (32 mm). Al aumentar las tensiones también aumenta la rigidez global de la malla y por tanto, aumenta su capacidad de resistencia ante cargas externas horizontales y verticales, aunque esta sección podría comprometer la seguridad de la estructura al estar muy cerca de su límite de rotura.

## 2.7 Comprobación de la obtención de la forma con la prueba de la capacidad de flexión de la barra

Una manera de verificar experimentalmente los resultados de la obtención de la forma fue la realización de la prueba de flexión de la barra hasta hacerla coincidir con el radio de curvatura del arco perimetral. Para el cálculo de los radios aplicamos la ecuación:

<p>Cálculo del radio:  <math display="block">r = \frac{L^2 + 4 \times f_{\text{arc}}^2}{8 \times f_{\text{arc}}}</math> </p> <p>Cálculo del ángulo :  <math display="block">\alpha = \text{sen}^{-1} \frac{L}{2r}</math> </p> <p>Donde:  r: radio  L: longitud entre los extremos del arco  <math>f_{\text{arc}}</math>: flecha del arco  <math>\alpha</math>: Ángulo </p>	
--	--

Cuadro N° II-16. Cálculo del radio de curvatura

Para la realización de la prueba se dispuso de una barra de  $\Phi$  32x26 mm de 6 metros de longitud. En sus extremos se colocaron dos dispositivos que la sostenían. Estos elementos

eran uno fijo y el otro podía deslizarse a través de un riel de perfil "U". Al este último dispositivo se la aplicaba la fuerza a través de una barra roscada con un sistema de tuerca y contratuerca que iba acercando los extremos de la barra. Estos desplazamientos estaban previamente marcados sobre el riel "U" cada 200 mm. Al llegar el dispositivo a marcas señaladas en el perfil se medía experimentalmente la flecha del arco y con ayuda de una tabla de calculo se calculaba el radio por la ecuación antes indicada.

La longitud a la que se llevaron los extremos de la barra fue de 6 a 4 metros, 400 mm más de lo que el la longitud de la obtención de la forma indicaba.



Figura N° II-19: Diseño del dispositivo para la aplicación de la tensión

Este dispositivo encargado de sujetar los extremos de la barra se realizó en madera con forma de "L". En la base contaba con unos ángulos metálicos que le impedían el movimiento laterales producto del esfuerzo de la barra sobre el dispositivo. En esta misma zona se encontraba la barra roscada que unía el otro extremo y era la encargada de aplicar la fuerza para el doblado de la barras a través del sistema de tuerca y contratuerca.

En la parte alta de la "L" se encontraba un aro, también de madera unido al taco de madera a través de un eje que le permita girar e ir adaptándose a las diferentes posiciones de la barras en su doblado. A este aro se unían los extremos de la barra a través de una abrazadera doble. Un extremo era fijo y el otro se desplazaba sobre el riel.



## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

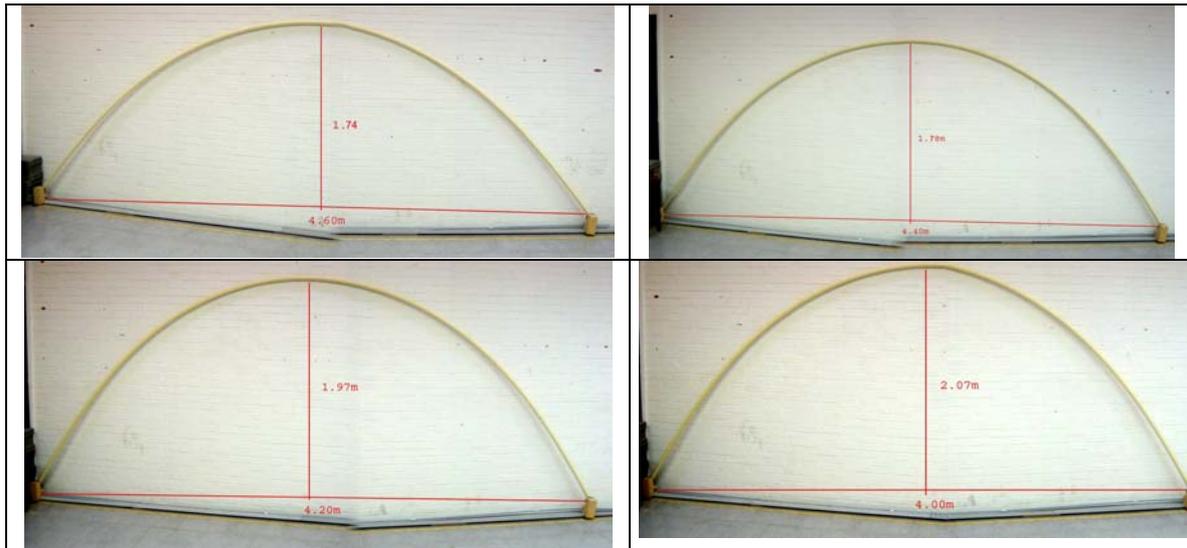


Figura N° II-20: Resultados de la prueba de la capacidad de flexión de las barras

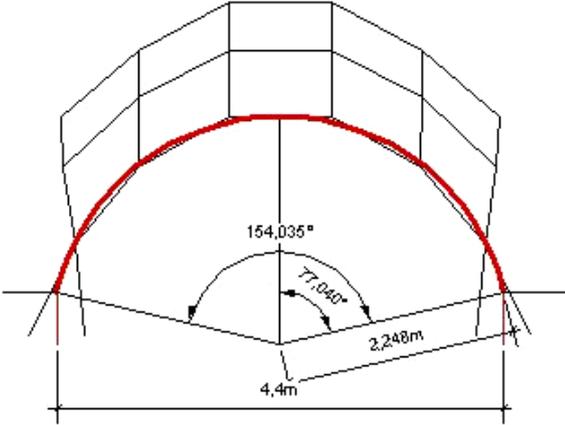
Como se puede observar las curvaturas no responden a un radio de circunferencia. A continuación se presenta un resumen del cálculo del radio en función de la longitud de los extremos y la flecha del arco (todas las unidades de las mediciones están en metros)

Material	Barra hueca de poliéster con fibra de vidrio					
Sección	32 mmx26 mm e: 3 mm					
Longitud	6000 mm (6 m)		Fecha : 30/11/2003			
Luz (L) (m)	Flecha ( $f_{arc}$ ) Medida en sitio	Cálculo del Radio (r)	Diferencia entre radios	Diferencia entre flechas	Angulo ( $\alpha$ )	Ángulo total ( $2\alpha$ )
5,8	0,665	6,655808271	0	0	25,854	51,708
5,6	0,99	4,45459596	2,201212311	0,325	38,945	77,89
5,4	1,2	3,6375	0,81709596	0,21	47,924	95,848
5,2	1,38	3,139275362	0,498224638	0,18	55,92	111,84
5	1,55	2,791129032	0,34814633	0,17	63,57	127,14
4,8	1,67	2,559550898	0,231578134	0,12	69,66	139,32
4,6	1,74	2,390114943	0,169435956	0,07	74,21	148,42
<b>4,4</b>	<b>1,78</b>	<b>2,249550562</b>	<b>0,140564381</b>	<b>0,04</b>	<b>77,95</b>	<b>155,9</b>
4,2	1,97	2,10428934	0,145261222	0,19	86,37	172,74
4	2,07	2,001183575	0,103105765	0,1	88,1	176,2

Tabla N° II-22: Datos de los resultados de la comparación del radio de curvatura calculado y el obtenido experimentalmente

### Comprobación de los cálculos y mediciones experimentales

Para comprobar que el cálculo del radio de curvatura de las barras obtenido experimentalmente estuviera en los mismos órdenes de magnitud que el radio de curvatura calculado por el modelo informático lo verificamos por dos métodos, el primero por método analítico a través de la ecuación de la longitud de las barras, ya que ésta es conocida y el segundo método por geometría reproduciendo el radio obtenido y sobreponiéndolo al arco perimetral del modelo. Tal como indicamos en los modelos previos del capítulo N° 1, sabemos que los arcos de la malla se deforman por curvas de flexión y no por radios de circunferencias de presión constante, pero la comparación entre los dos radios permite determinar diferencias con una curva conocida

Método analítico	Método descriptivo
<p>Ecuación de la longitud del arc (<math>L_{arc}</math>)</p> $L_{arc} = \frac{\pi r \alpha}{90}$ <p>Utilizamos los valores obtenidos experimentalmente cuando <math>L=4.40</math> m</p> <p><math>\alpha</math>: ángulo  <math>r</math>: radio</p> <p>Sustituyendo, tenemos.</p> <p><math>L_{arc} = 6.120</math> m</p> <p>Como la longitud del arco es igual a la longitud de la barra (6.00 m), la diferencia ubicada en 120 mm, es debido a que la barra pre-flectada no traza un arco de circunferencia, tal y como se demuestra en el gráfico</p>	 <p>El radio de curvatura obtenido experimentalmente es el representado en rojo y se observa que es tangente a los nudos del arco de la malla del modelo informático. Si comparamos los ángulos totales se observa que son parecidos</p>

Cuadro N° II-17: Comprobación del radio de curvatura de la malla

## 2.8 Simulación del comportamiento estructural ante cargas externas: Análisis Estático

El objetivo fue cargar la estructura para encontrar su nueva posición de equilibrio determinando sus deflexiones al aparecer los esfuerzos y momentos como consecuencia de las cargas aplicadas y dado que suponemos que estamos en el campo elástico del material habrá una relación lineal entre las acciones, las reacciones y deformaciones, cuya relación se denomina rigidez.

Para el análisis de la estructura se utilizó el programa comercial EASY® v8 (Technet-Stuttgart 2003). El cálculo determinó las deformaciones de la estructura, los movimientos de los nodos en coordenadas y los esfuerzos que se producen en los inicios y finales de las barras de la estructura espacial por el método matricial de equilibrio de barras en teoría elástica de segundo orden.

La malla está formada por barras continuas curvas y pre-flectadas de sección constante, unida a ésta hay una membrana anticlástica pre-tensada. La deformación de la estructura esta referida a los movimientos en los nudos por los desplazamientos que se producen en el eje X, en el eje Y, y en el eje Z, así como también los giros alrededor de los ejes X, Y, Z.

Los apoyos son nudos cuyos movimientos están totalmente restringidos. Las acciones a las que estuvo sometida la estructura son fuerzas y momentos en los nudos dirigidos según los grados de libertad correspondiente a las cargas puntuales y cargas repartidas en las barras y en la superficie de la membrana.

## Condiciones para el cálculo

El cálculo se realizó admitiendo las hipótesis básicas de la resistencia de materiales, estas fueron:

- Las cargas son estáticas.
- Como son grandes deformaciones el cálculo es no lineal, ya que éste considera los cambios de forma de la cubierta y grandes desplazamientos. En este sistema no lineal se realiza un sistema interactivo de cálculo entre las deformaciones y el modelo matemático ejecutándolo por el método de la densidad de fuerza. (ver Anexo N° 2. Método de la densidad de fuerza)
- El comportamiento de los materiales es lineal y elástico rigiéndose de acuerdo a la ley de Hook.
- Las barras son continuas, curvas, pre-flectadas, de sección constante, de igual longitud y con diferente radio de curvatura entre ellas, por lo que hay que considerar el pandeo, sobre todo cuando hay poca curvatura.
- Los nudos son considerados rígidos.
- La membrana es una superficie anticlástica continua y como acepta grandes deformaciones hay que pre-tensarla. Está unida a la estructura de barras en la cresta de la cúpula formando un punto alto, a lo largo de los cuatro arcos perimetrales inferiores de la cúpula y en los puntos intermedios n° 40023002, 40053002, 40023005 y 40053005
- No se consideraron efectos de la carga en el tiempo (cálculo dinámico), ni los efectos térmicos de dilatación y retracción de los materiales, así como tampoco se consideraron la posibilidad de empujes del terreno y sismos, esto debido a la libertad de deformación que tiene la estructura.

## Matrices de Rigidez y Esfuerzos

Esta estructura reticular espacial está formada por una serie de barras curvas pre-flectadas y unidas entre sí por puntos denominados nudos. Los nudos son los puntos que se encuentran ubicados a los extremos de cada barra, siendo necesarios por la condición de barras curvas.

La ecuación matricial de equilibrio se puede representar por la expresión:

$\mathbf{P}=\mathbf{K} \cdot \Delta_{x,y,z}$ , es decir, que las acciones (fuerza y momento) son directamente proporcionales a las deformaciones (giro y desplazamiento), siendo la K, un factor de proporcionalidad de la matriz de rigidez que depende de las características físicas de las barras de la malla.

(Ver Anexo N° 2. Método de la densidad de fuerza.)

Son incógnitas que caracterizan el comportamiento estructural de esta estructura los siguientes:

- Los desplazamientos de los nudos de la estructura, que son por cada nudo los puntos de traslación  $\Delta_x$ ,  $\Delta_y$ ,  $\Delta_z$  en las direcciones de los ejes de la estructura y tres giros o rotación  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$  alrededor de los ejes de la estructura.
- Los momentos de rigidez a flexión y a torsión.
- Las cargas que actúan sobre los nudos  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  en las direcciones de los ejes generales.
- Los tres momentos (flector, cortante y torsor),  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  alrededor de dichos ejes.

De esta estructura se conoce:

- Las dimensiones globales
- Sección de las barras
- Los módulos de elasticidad del material

En el programa de cálculo utilizado (EASY®-TECHNET) los desplazamientos  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$  se materializa de acuerdo con los TRANS POINT y los giros o rotación  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  con los ROT POINT. Se definen como punto de desplazamiento (TRANS POINT) la representación de la localización global del punto en el espacio en sus tres dimensiones medidos en coordenadas (X,Y,Z). Sea una barra rígida o una barra de membrana. Los puntos de desplazamiento pueden ser totalmente libres, estar totalmente restringido o con resortes para controlar el movimiento. A todo punto de desplazamiento le corresponde un punto de rotación

Los puntos de rotación (ROT POINT) representan un giro en un extremo de la barra localizada en el espacio, este punto también puede ser libre, fijo o con resorte en la dirección X,Y,Z y medidos en grados.

Estos puntos (TRANS y ROT) definen los nudos de la estructura llamados BEAM LINK, y son el vínculo entre los extremos de cada barra, como contienen los puntos TRANS y ROT, cada nudo tiene dos puntos al inicio y al final. En las barras se tiene un resultado de carga (fuerzas y momentos en los ejes X,Y,Z).

Las barras, denominadas en el programa como BEAM representan un objeto físico, que esta formado por varios vínculos (BEAM LINK) y contiene información sobre la sección de la barra y las propiedades del material, tales como, módulo de elasticidad, módulo cortante y momentos de inercia resistentes a la flexión y torsor.

### Procedimiento de Cálculo

Las acciones que se han tenido en cuenta para el cálculo de la estructura son:

1. Carga permanente de peso propio.
2. Carga producida por el viento sobre las barras pre-flectadas y la membrana pre-tensada.
3. Carga producida por la nieve sobre las barras pre-flectadas y la membrana pre-tensada.

### Cálculo del Peso propio

Este cálculo se hace manualmente a manera de comprobación, ya que el programa utilizado (EASY) lo calcula directamente a partir de los datos de entrada de las propiedades del material (momentos de inercias, momentos resistentes, área de la sección, modulo de elasticidad). Para método de cálculo ver anexo N° 3.

1. Tabla de peso propio de la malla de barras rígidas de PRFV:

Simbología:

D: diámetro de la barra tubular.

Lt: Longitud total de la barra.

Ln: Longitud de cada barra a eje de nudo.

Nº: Número de barras

PI: Peso lineal de la barra en Kg. Ap: Apoyo

A: Área total de la cubierta.

D (mm)	Lt (mm)	Ln (mm)	Nº (uni)	PI (grs/ml)	A (m <sup>2</sup> )
32x26	6000	1000	12	405	25.01
Peso Propio total de las barras (Kg.)			<b>29,16</b>		

Tabla N° II-23: Peso propio de las barras

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

## 2. Peso propio de los nudos

En la estructura hay un total de 36 nudos. Estos nudos son el punto de unión entre las barras verticales y horizontales de la malla, por lo que suman un total de 72 nudos. Cada punto de unión está constituido por un par de abrazaderas de acero galvanizado de 1 mm de espesor y 50 grs. de peso, vinculada por un círculo metálico con dos tornillos con tuercas y arandelas de D: 5 mm, con un peso total de 140 grs. por nudo.

Símbolos:

Nº: Número de nudos

Pa: Peso abrazadera

Pp: Peso de la plancha metálica

Pt: Peso del tornillo con tuercas y arandelas

Nº	Pa (grs.)	Pp (grs.)	Pt (grs.)
72	50	100	40
Peso Propio del nodo (Kg.)		<b>13,68</b>	

Tabla Nº II-24: Peso propio de los nudos

## 3. Peso propio de las bases:

La estructura son 8 bases articuladas formadas por una pieza de acero galvanizado en forma de U, de 4 mm de espesor y un tornillo de D: 10 mm, con un peso total de 1055 grs. por base. Un perfil metálico tubular de D 37x2 mm y 800 mm de longitud.

Nº	Pb (grs)	Pt (grs)
8	1055	
Peso Propio las bases (Kg.)		<b>8,440</b>
Peso Propio la malla de barras (Kg.)		<b>51,28</b>

Tabla Nº II-25 Peso propio de las bases

## 4. Peso de la membrana:

Según catálogo, la membrana de la casa comercial Ferrari modelo Précontraint 502, Serie 8000, con un hilo de 1100 Dtex tiene un peso de 570 grs/m<sup>2</sup>.

Superficie total de membrana del módulo: 22.10 m<sup>2</sup>

Peso del tensor: 225 grs c/u

Aro metálico de esquina: 200 grs c/u

Peso Propio de la membrana (kg) **16,054**

## 5. Tabla resumen del peso total

<b>Peso Propio Total Cubierta</b>	<b>67,334 Kg</b>	<b>6,733 KN</b>
<b>Peso Propio por cada nudo</b>	<b>1,870 Kg/nudo</b>	<b>0.187 KN/nudo</b>
<b>Peso Propio por m<sup>2</sup></b>	<b>2,804 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>0.280 kN/m<sup>2</sup></b>

Tabla Nº II-26: Peso propio total de la estructura

Como se puede apreciar en estas tablas la cubierta es bastante ligera debido al poco peso propio, lo que representa un problema a la hora de resistir cargas horizontales de viento, ya

que pudieran presentarse efectos de desprendimiento de la cubierta de su lugar o efecto de volteo o derribo de la estructura.

## 2.9 Comportamiento de la estructura ante cargas externas de viento

El viento produce sobre una construcción, tanto en su orientación a barlovento como a sotavento, unas zonas de presión y de succión que dependerán de la forma global y orientación de la edificación. Las superficies con pendiente o curvas pueden verse sometidas a ambos tipos de presiones a la vez, en la medida que el viento cambia de dirección. Las superficies ubicadas frente al viento y perpendiculares a su trayectoria reciben un efecto de impacto directo de la masa de aire en movimiento denominadas “Presión positiva directa” y las superficies ubicadas al lado opuesto al viento (sotavento) “Presión Negativa”, por lo regular, ésta es un efecto de succión que consiste en una presión hacia fuera sobre la superficie de la edificación. Como el viento no se detiene después de impactar con el edificio sino que se mueve alrededor de él, como un fluido, se presenta un efecto de arrastre aerodinámico pudiendo generar oscilaciones, vibraciones o desprendimiento por efecto de fricción de las masas de aire (J. Ambrose, 1998)

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo de realizar estas simulaciones fue determinar las deformaciones de la estructura, los movimientos de los nudos y los esfuerzos que se producen en las barras, así como también las tensiones de las barras críticas para comprobar que la estructura no haya superado su límite de rotura y entre en colapso. Por tratarse de un tema central en este trabajo lo desarrollaremos a través de unas tablas comparativas de las diferentes hipótesis de vientos, las cuales fueron:

Hipótesis de viento con una edificación con laterales cerrada:

Hipótesis N° 1: dirección de viento a 90° con respecto a la fachada. (Ver apéndice F. Coeficientes por Ensayo de túnel de Viento a 90°).

Hipótesis N° 2: dirección de viento a 45° con respecto a la fachada. (Ver apéndice F. Coeficientes por Ensayo de túnel de Viento a 45°).

Para el diseño las hipótesis consideramos los datos teóricos tomados de la normativa vigente (AE-88. Acciones en la edificación) De acuerdo esta norma, la presión dinámica según la altura del edificio es la siguiente:

Altura edificio m	Situación de exposición	Velocidad viento Km/h	Presión Dinámica (w) kg/m <sup>2</sup>
De 0 a 10	normal	102	50
La presión dinámica (w) viene determinada por la ecuación: <b>W= V<sup>2</sup>/16</b>		Donde: <b>V</b> : velocidad	
La sobrecarga del viento (p), medida en Kg/m <sup>2</sup> , es considerada una fuerza normal a la superficie donde incide y viene determinada por la ecuación: <b>P= C.W</b>		Donde: <b>C</b> : coeficiente eólico <b>W</b> : presión dinámica	

Tabla N° II-27: Datos de la normativa española AE-88

El coeficiente eólico (C) es positivo para las presiones y negativo para las succiones.

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Según la norma española el coeficiente eólico de sobrecarga total sobre una construcción cerrada esférica es de 0.4. Para el método de cálculo ver anexo N° 3

### 2.9.1. Hipótesis de viento a 90° con laterales cerrados

#### Introducción de los datos de carga

La carga de viento actúa solamente perpendicular a los componentes. En este caso, se introdujo los datos sobre un área de la membrana en una relación fuerza/Área. Está calculada sobre la triangulación de la membrana que se realizó durante el proceso de búsqueda de la forma (ver apéndice D). Esta carga actúa sobre la superficie de acuerdo a un factor de carga (Loadfactor), que es el producto entre la presión dinámica (50 Kg/m<sup>2</sup>) y el coeficiente de presión indicada en el ensayo de túnel de viento. Esta carga, como ya se dijo, es normal a la superficie y la dirección normal es definida por el sentido de los triángulos, por tanto la dirección X,Y,Z es igual a 0. Si la carga es de presión el numero es positivo y si es de succión es negativo.

Se introdujeron 17 casos de cargas de acuerdo a los resultados del ensayo de túnel de viento. (Ver apéndice F. Ensayo de túnel de viento a 90°) y para método de cálculo ver anexo N° 3

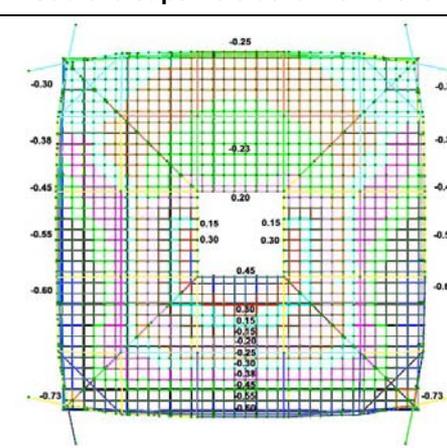
Tabla de cargas							Distribución de las áreas de presión sobre la superficie de la membrana
IK	MODE OF LOAD	LOAD FACTOR	X-DIR	Y-DIR	Z-DIR	IM <sup>(*)</sup>	
1	WIND	0.2250	0.0000	0.0000	0.0000	2	
2	WIND	0.1500	0.0000	0.0000	0.0000	2	
3	WIND	0.0750	0.0000	0.0000	0.0000	2	
4	WIND	-0.0750	0.0000	0.0000	0.0000	2	
5	WIND	-0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	2	
6	WIND	-0.1150	0.0000	0.0000	0.0000	2	
7	WIND	-0.1250	0.0000	0.0000	0.0000	2	
8	WIND	-0.1500	0.0000	0.0000	0.0000	2	
9	WIND	-0.1900	0.0000	0.0000	0.0000	2	
10	WIND	-0.2250	0.0000	0.0000	0.0000	2	
11	WIND	-0.2700	0.0000	0.0000	0.0000	2	
12	WIND	-0.3000	0.0000	0.0000	0.0000	2	
13	WIND	-0.3650	0.0000	0.0000	0.0000	2	
14	WIND	0.4000	0.0000	0.0000	0.0000	2	
15	WIND	-0.2000	0.0000	0.0000	0.0000	2	
17	WIND	-0.2000	0.0000	0.0000	0.0000	2	

Tabla N° II-28: Datos de la carga de viento del archivo LOADGEN del programa EASY®-TECHNET

(\*) **IM** indica que el programa aplica la carga sobre una superficie y no sobre una barra, marcado con el N° 2

El programa procesó la siguiente información:

Total de puntos TRANS: 1842  
 Total de puntos ROT: 60  
 Total de elementos: 2918  
 Número total de sub-matrices: 24182  
 Número de los T-elements: 488  
 Número de interacciones: 200

(ver apéndice H. Acciones sobre la estructura bajo carga externa de viento a 90°)

### Deflexión en la malla

Se entiende como deflexión la distancia de separación de los componentes de la estructura a partir de sus posiciones originales sin cargas externas.

La deformación global de la estructura se orienta hacia la misma dirección de la carga de viento. En la figura N° II-26 se muestra a la derecha, el modelo sin carga y a la izquierda se representa la deformada al aplicarle la carga perpendicular a la superficie de la membrana

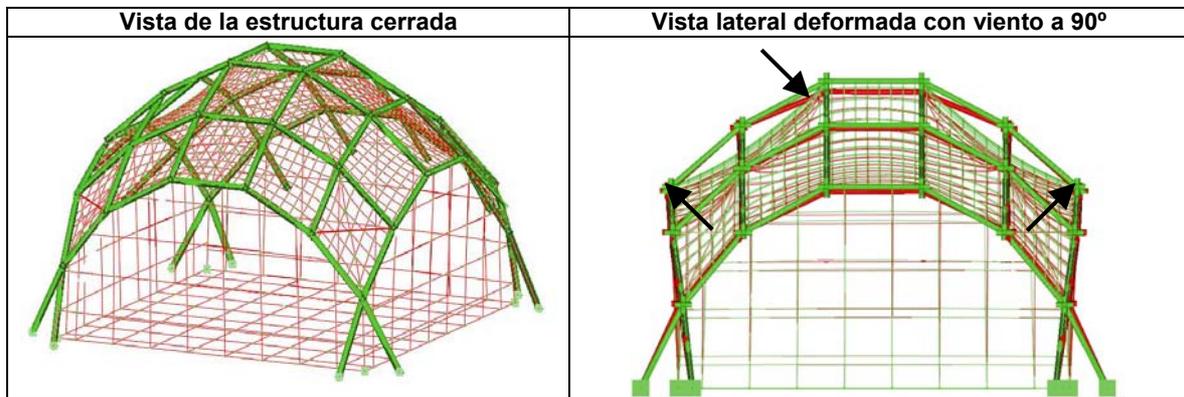
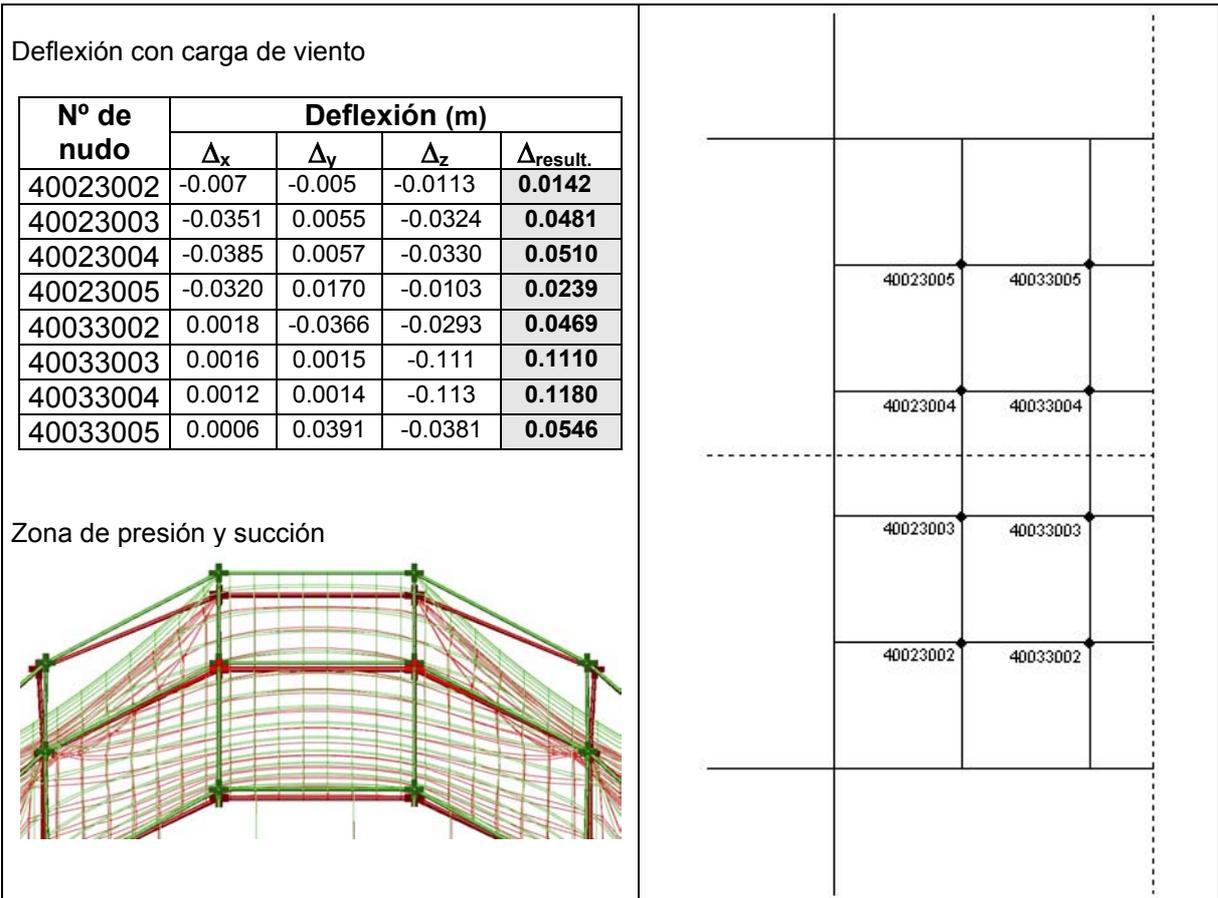


Figura N° II-21: Estructura cerrada

Para estudiar las deformaciones se tomó la mitad de la estructura, ya que la carga se distribuye simétricamente sobre la superficie.

(Ver apéndice C. Tabla de Coordenadas finales apartado: Coordenadas bajo carga externa de viento a 90)



Cuadro N° II-18: Resultado de la deflexión en la malla

La deflexión máxima en el eje **X** sucede en los nudos **40023003** y **40023004** con 3 centímetros de desplazamiento siendo ambos valores negativos indicando que sucede una presión. En los nudos **40033002**, **40033003** y **40033004** ocurre un desplazamiento de 1 centímetro con signo positivo sobre el mismo eje, indicando que su posición sube con respecto a la posición original debido a la succión.

La máxima deflexión en el eje **Z** ocurre en los nudos superiores de la malla **40033003** y **40033004** con 11 centímetros de desplazamiento respectivamente. Ambos valores negativos indicando presión. Como resultado tenemos unos desplazamientos máximos en los nudos superiores **40033003**, **40033004** con un total de 11 centímetros respectivamente y en el nudo **40023004** y **40033005** con 5 centímetros.

**Deflexión de los arcos de borde**

Los arcos perimetrales sufren de un sólo tipo de deflexión causa por la succión y sólo hay una deflexión por presión ubicada en la cresta de la cúpula

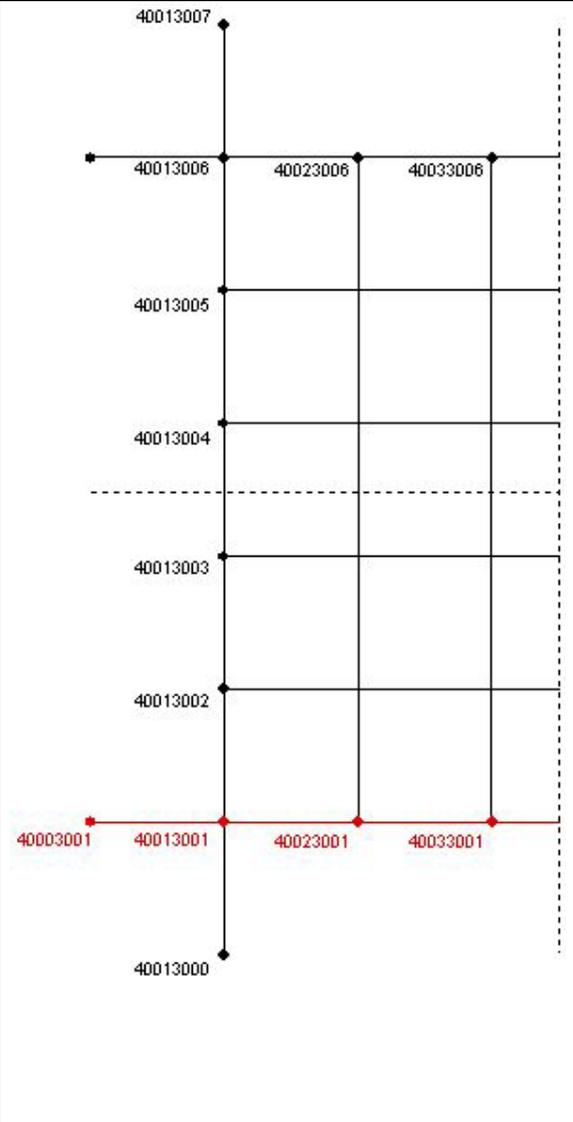
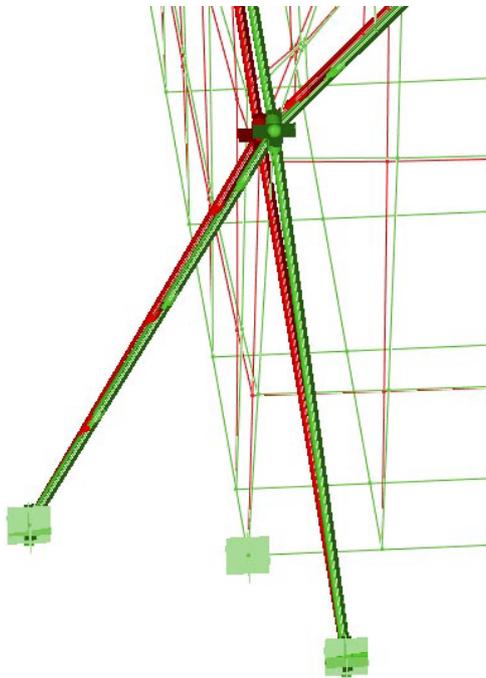
Para el estudio de las deflexiones, se tomó la mitad de la cubierta cuyos puntos pertenecen al arco del borde marcado en rojo

## Arco a barlovento

Deflexión del arco con carga de viento a 90° por succión en el arco frontal

N° de nudo	Deflexión (m)			
	$\Delta_x$	$\Delta_y$	$\Delta_z$	$\Delta_{result.}$
40003001	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
40013001	-0.0291	-0.0291	0.010	<b>0.0423</b>
40023001	-0.0203	-0.0189	0.0037	<b>0.0283</b>
40033001	0.0022	-0.256	-0.0412	<b>0.0485</b>

Deflexión nudo **40013001**



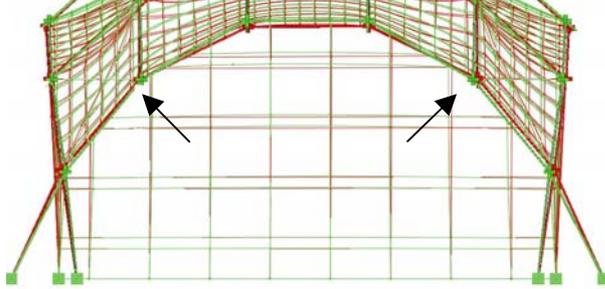
Cuadro N° II-19: Resultado de la deflexión en el arco a barlovento

En este arco el desplazamiento máximo se encuentra en el nudo **40013001** y **40033001** con 4.2 y 4.8 cm respectivamente. En el nudo **40003001** de la base su movimiento es igual cero porque tiene restricciones de traslación y rotación.

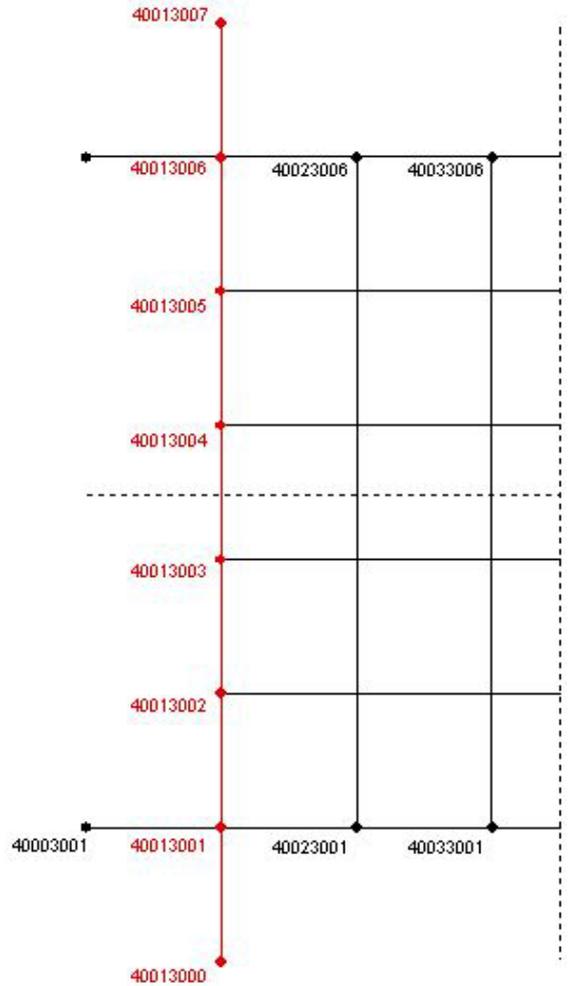
Deflexión con carga de viento a 90° por succión en el arco lateral

N° de nudo	Deflexión (m)			
	$\Delta_x$	$\Delta_y$	$\Delta_z$	$\Delta_{result.}$
40013000	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
40013001	-0.0291	-0.0291	0.010	<b>0.0423</b>
40013002	-0.0172	-0.0158	-0.0003	<b>0.0234</b>
40013003	-0.0202	0.0089	-0.0487	<b>0.0534</b>
40013004	-0.0297	0.0087	-0.0422	<b>0.0525</b>
40013005	-0.0322	0.0350	0.0104	<b>0.0493</b>
40013006	-0.0393	0.0394	0.0133	<b>0.0573</b>
40133007	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>

Arco deformado por succión



Este plano es paralelo a la dirección del viento



Cuadro N° II-20: Resultado de la deflexión en el arco lateral por succión

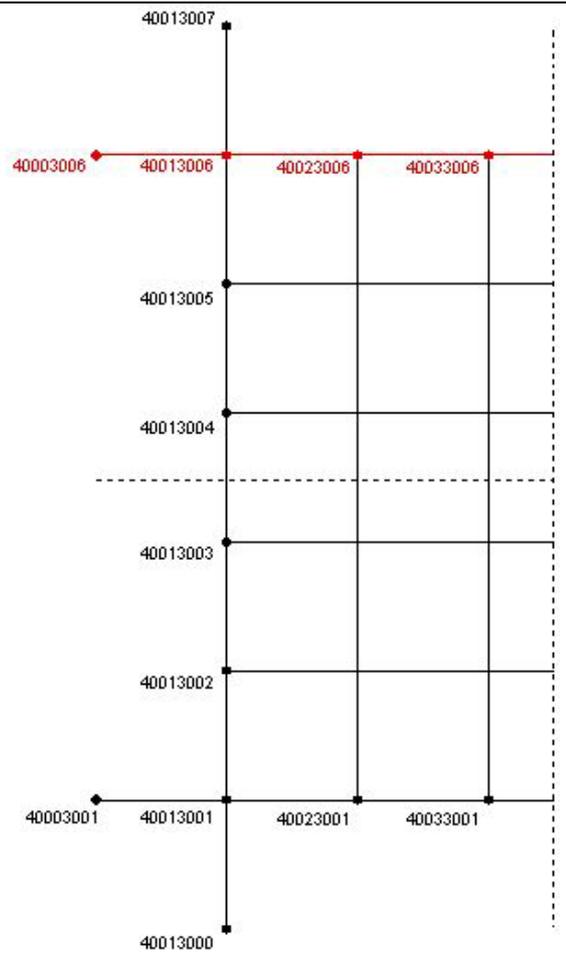
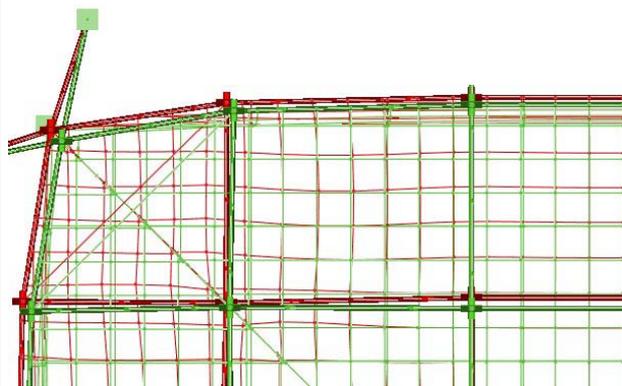
El arco lateral ubicado entre la zona de barlovento y sotavento es donde sucede el mayor desplazamiento de los arcos, éstos se deforman por succión.

Tanto en el eje **X** como en el **Y** la deflexión máxima se localiza en el nudo **40013006** con 4 centímetros, y en el eje **Z** la máxima es en el nudo **40013003** con 4.8 centímetros. El desplazamiento resultante máximo se encuentra en el nudo **40013003** con 5 centímetros seguido por el nudo **40013004** con un desplazamiento de 4 cm.

Deflexión con carga de viento a 90° por succión en el arco posterior

N° de nudo	Deflexión (m)			
	$\Delta_x$	$\Delta_y$	$\Delta_z$	$\Delta_{result.}$
40003006	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
40013006	-0.0393	0.0394	0.0133	<b>0.0573</b>
40023006	-0.0266	0.0296	0.0032	<b>0.0399</b>
40033006	0.0006	0.0282	-0.0499	<b>0.0573</b>

Deformación del arco por succión



Cuadro N° II-21: Resultado de la deflexión en el arco a sotavento por succión

En el arco a sotavento las deflexiones en el eje **X** son despreciables, ya que no alcanzan valores significativos para la estructura estando en valor promedio de 3 milímetros. En el eje **Y** la deflexión máxima se encuentra en el nudo **40013006** con 4 centímetros y en el eje **Z** no se presentan valores significativos de desplazamientos.

En las deflexiones resultantes, los valores máximos se encuentran localizados en los nudos **40013006** y **40033006** con 5,7 centímetros.

## Esfuerzos en las Barras

### Esfuerzo Axial:

La fuerza axial máxima en toda la estructura es de 1.04KN y la mínima es de -0.71 KN. Esta fuerza perpendicular a la superficie comprime toda la malla (representado en la zona naranja-roja) y el resto de los arcos perimetrales entran en tracción (zona azul).

Por otra parte, la membrana está en tracción lo que nos indica que cumple su función de rigidizar la estructura de barras

(Ver apéndice G: Esfuerzos en las barras pre-flectadas y membrana con carga externa de viento a 90°. Hipótesis N° 1)

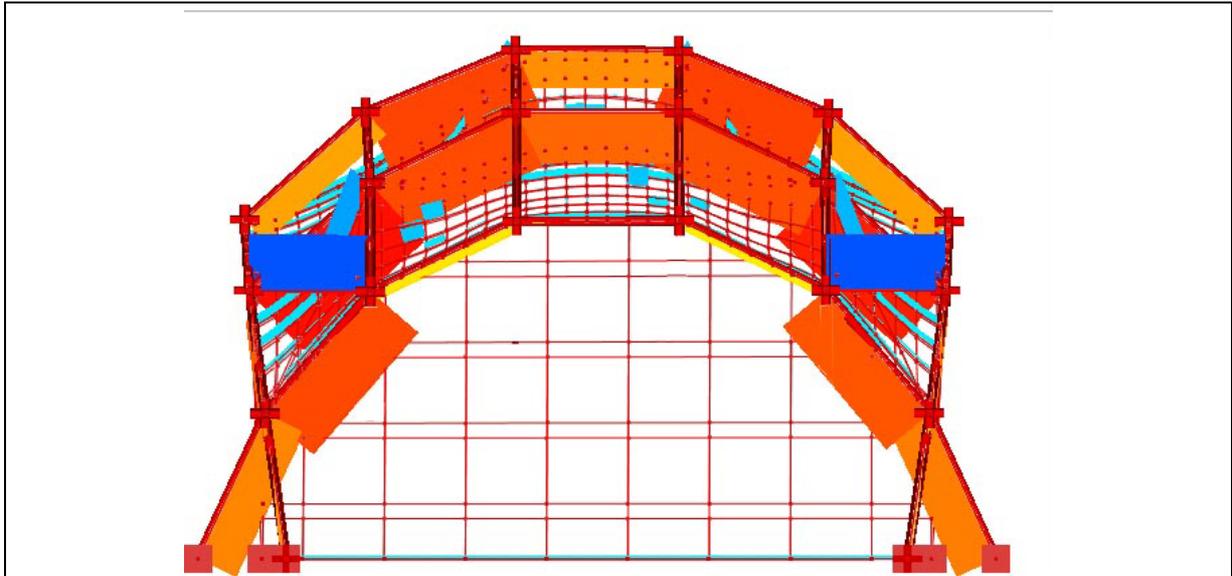
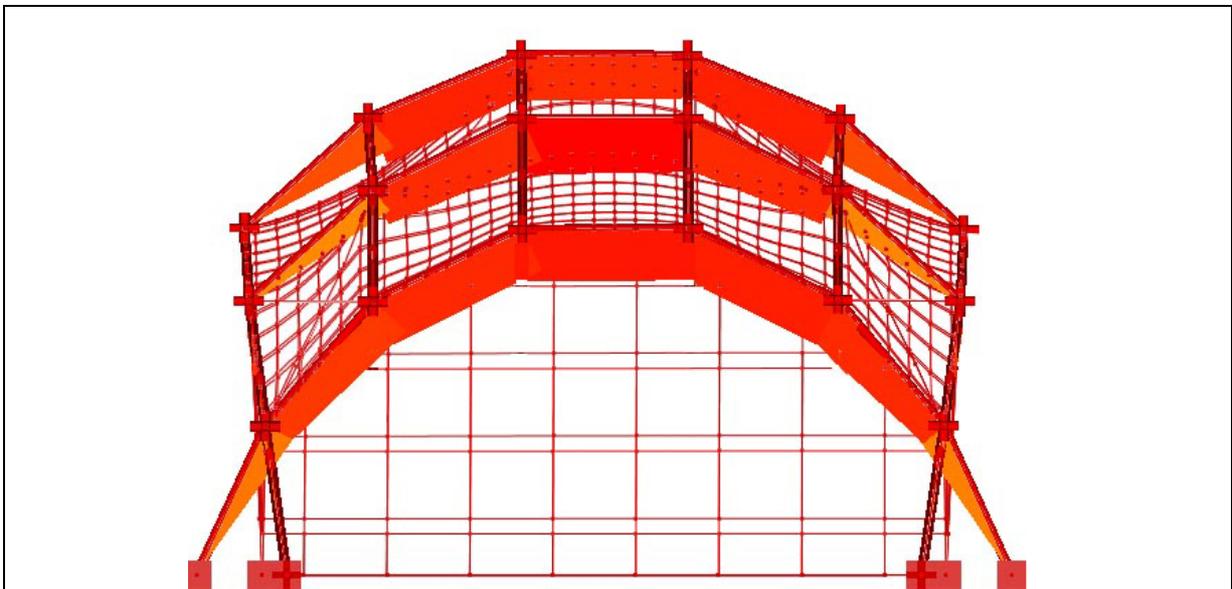


Figura N° II-22: Esfuerzo axial

### Esfuerzo de Flexión

El momento de flexión se sitúa paralelo al eje longitudinal de las barras. El máximo valor del esfuerzo de flexión con carga exterior de viento se ubica en 0.342 KN-m. Lo que indica que con respecto a la pre-flexión inicial ubicada en 0.31KN-m una diferencia de 0.032KN-m, este incremento no es significativo. Es decir, la pre-flexión esta actuando como rigidización global de la estructura. Otro aspecto a destacar es que este valor de la flexión demuestra que el material está trabajando por debajo de su límite de rotura, por lo que se infiere que el comportamiento global de la estructura es elástico.



Flexión Máxima 0.342 KN-m

Figura N° II-23: Esfuerzo de flexión

## Esfuerzo cortante

Por definición una pieza sometida a flexión implica también que esta sometida a esfuerzo cortante. Al actuar la carga de viento el esfuerzo cortante tiende a concentrarse hacia los nudos de los arcos perimetrales. El valor máximo de esfuerzo de corte es de 0.25 KN y como valor mínimo  $-0.25$  KN, presentándose un aumento con respecto a la cortante inicial ubicada en 0.18 KN

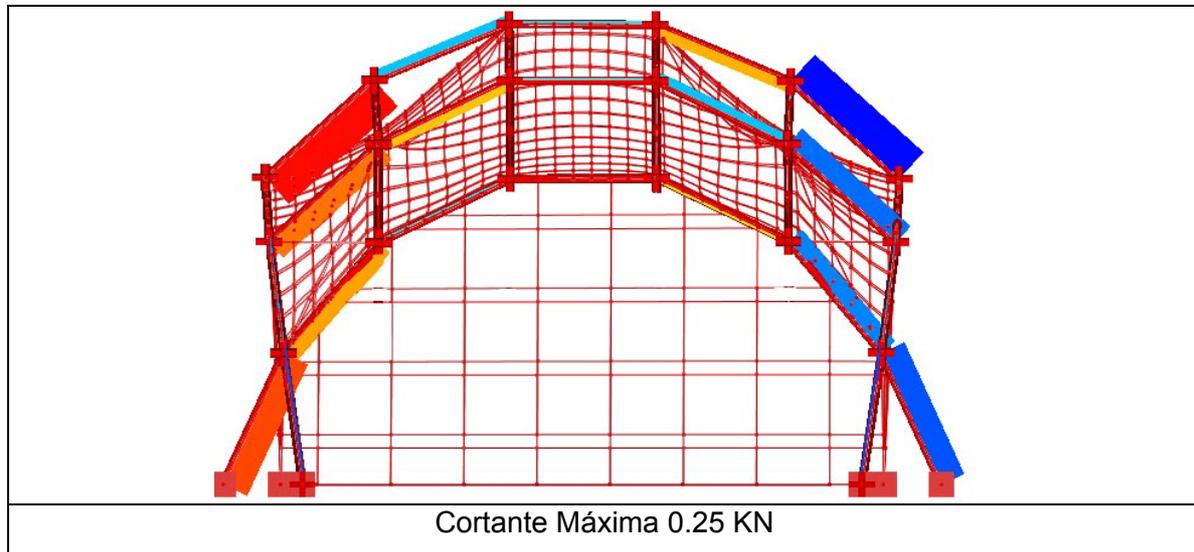


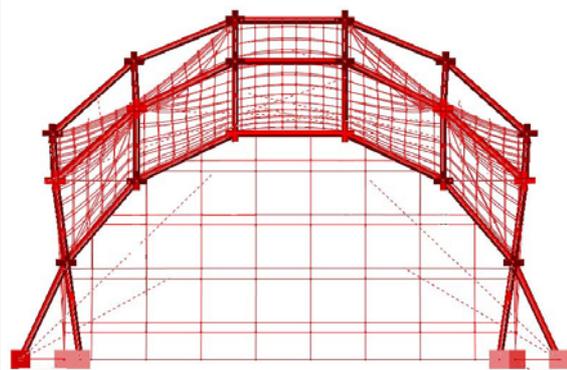
Figura N° II-24: Esfuerzo de corte

Según el cálculo realizado esfuerzos de torsión que se producen en la estructura son despreciables. (Ver Apéndice G. Esfuerzo en las barras preflectadas y membrana bajo carga de viento a  $90^\circ$ . Hipótesis N° 1)

## Reacciones de los nudos de la base

Reacciones en los nudos con carga de viento

N° de nudo	Reacción (KN)			
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_{result.}$
40003001	0.348	-0.046	0.342	<b>0.490</b>
40073001	0.347	-0.041	0.335	<b>0.484</b>
40003006	0.274	0.0187	0.152	<b>0.313</b>
40013007	-0.056	-0.374	0.410	<b>0.557</b>
40013000	-0.049	0.377	0.376	<b>0.387</b>
40073006	-0.282	0.019	0.170	<b>0.329</b>
40063000	0.049	0.377	0.376	<b>0.387</b>
40063007	0.056	-0.378	0.413	<b>0.562</b>
$\Sigma$ Reacción vertical $R_z$ (KN)			2.425	



**Comprobación**

$\Sigma$  Acciones sobre la estructura. 2.41 KN

Como se aprecia la sumatoria de las acciones verticales y la sumatoria de las reacciones verticales ( $R_z$ ) tiene el mismo orden de magnitud. (Ver apéndice N° H Acciones sobre la estructura con carga externa de viento a 90°. Hipótesis N° 1)

Cuadro N° II-22: Reacciones con una carga externa de viento

La reacción máxima se localiza en el nudo **40063007** con 0.56 KN, muy seguido del nudo **40013007** con 0.55 KN, estos nudo tienen carga de succión. El nudo **40003001 y 40073001** con 0.4 KN producto de la carga de presión a barlovento. También hay que apuntar que todas las componentes verticales de las reacciones son positivas

**Comprobación de la tensión de la barra crítica bajo una carga externa de viento a 90° obtenida por ensayo de túnel de viento.**

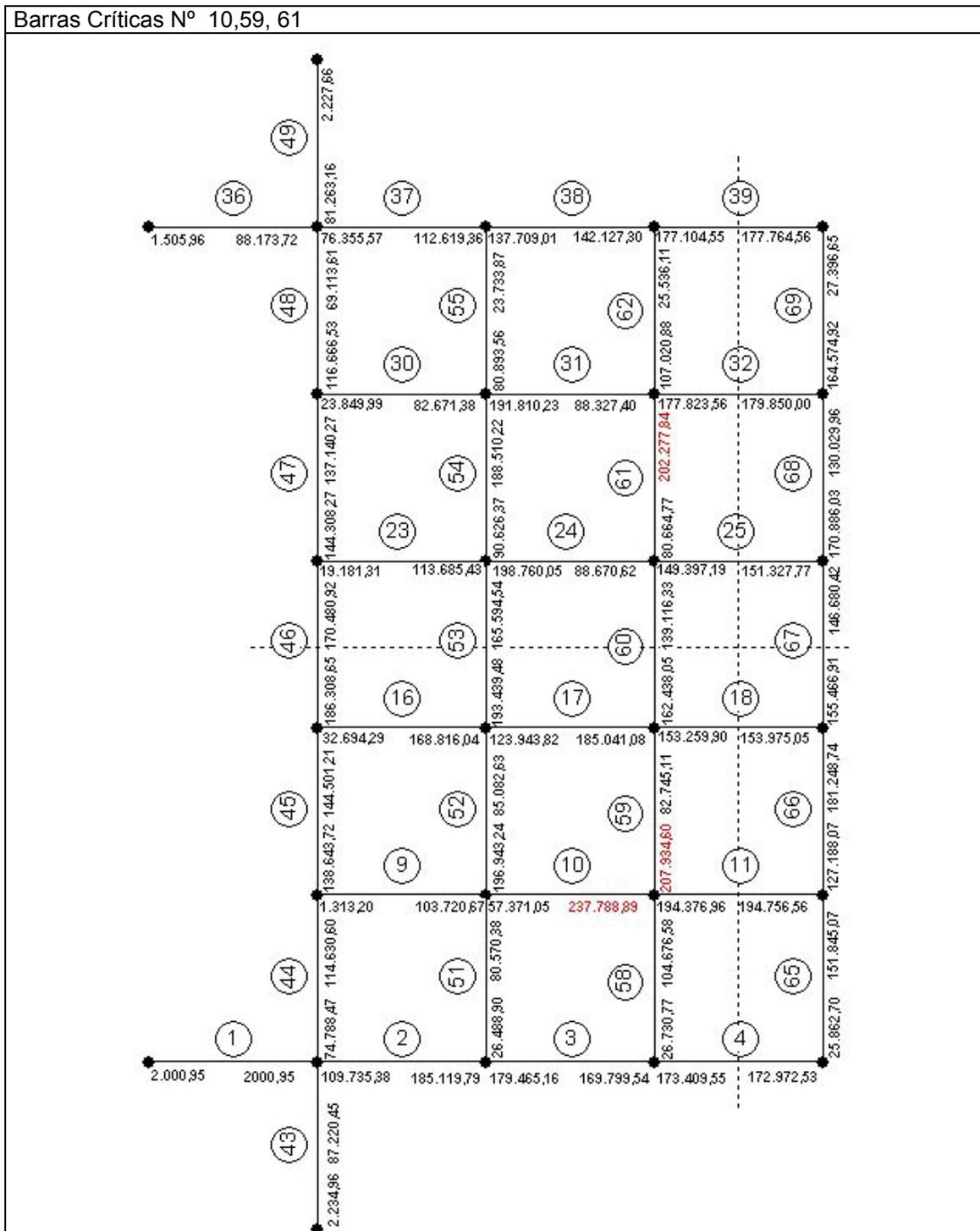


Gráfico N° II-9: Comprobación de la tensión en las barras críticas con carga externa de viento a 90°

En términos generales, la cubierta tiene una zona de presión ubicada en la cresta de la cubierta a barlovento y el resto de la cubierta es una zona de succión. Se puede observar una relajación de todas las barras dado que la mayor parte de la cubierta está en succión con respecto a la misma zona cuando es presión, comentada en el primer caso.

**CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL**

El nudo crítico es el **40033002** que presenta la tensión máxima sobre la malla incrementándose un 21.59% con respecto al valor inicial de pre-flexión pasando de 186.446,24 KN/m<sup>2</sup> a 237.788,89 KN/m<sup>2</sup>.

En los arcos no se presentan nudos críticos porque todos están en succión observándose una relajación, sobre todo en barra N° 3 el nudo 40033001 que pasa en preflexión inicial de 201.946,06 KN/m<sup>2</sup> a 169.799,54 KN/m<sup>2</sup> presentando una reducción de la tensión inicial del 15.9%.

A continuación se presenta una discretización de los esfuerzos en los nudos donde se presentan las tensiones máximas y mínimas para estudiar el aspecto referido al relajamiento de las barras con respecto a sus tensiones iniciales de pre-flexión.

En la discretización de la tensión combinada de este punto se observa como es la flexión es el esfuerzo que más aporta, como se presenta en la siguiente tabla de cálculo:

Tabla comparativa entre los nudos críticos <b>40033002</b> y <b>40033005</b>					
Zona de succión			Zona de succión		
Barra N° 10	L <sub>0</sub> =1	Nudo N° 40033002	Barra N° 61	L <sub>0</sub> =1	Nudo N° 40033005
<b>σ<sub>N</sub>Normal</b>		<b>σ<sub>N</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>σ<sub>N</sub>Normal</b>		<b>σ<sub>N</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	-0,759683	-2.779,478269	N (KN)	-0,778792	(KN/m <sup>2</sup> )
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		A (m <sup>2</sup> )	0,000273	-2849,393023
My (KN-m)	-0,287562	<b>σ<sub>M</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	My (KN-m)	-0,297619	<b>σ<sub>M</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Mz (KN-m)	-0,138980		Mz (KN-m)	-0,064283	
Wy (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	-235.008,5816	Wy (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	-199.394,3755
Wz (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	2	Wz (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
<b>Comb. σ<sub>N</sub>Normal (KN/m<sup>2</sup>)</b>			<b>Comb. σ<sub>N</sub>Normal (KN/m<sup>2</sup>)</b>		
<b>Comb σ<sub>T</sub>Tangencial</b>		<b>σ<sub>T</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>σ<sub>T</sub>Tangencial</b>		<b>σ<sub>T</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
T <sub>y</sub> (KN)	0,265861	0,272963	T <sub>y</sub> (KN)	0,144981	0,163723
T <sub>z</sub> (KN)	-0,061862		T <sub>z</sub> (KN)	-0,076065	
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b>σ<sub>MT</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b>σ<sub>MT</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
M <sub>t</sub> (KN-m)	-0,004948	-1.363,080575	M <sub>t</sub> (KN-m)	-0,009956	-2.742,6902
W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06		W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	
<b>Comb σ<sub>T</sub>Tangencial (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-364,380551</b>		<b>Comb σ<sub>T</sub>Tangencial (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>-2.143,669887</b>	
<b>Comb σ<sub>Total</sub></b>	<b>237.788,8975</b>		<b>Comb σ<sub>Total</sub></b>	<b>202.277,8482</b>	

Tabla N° II-29: Discretización de las tensiones de las barras N° 10 y 61

En la tabla se puede observar como el momento flector es la tensión que más aporta a la tensión combinada de estos puntos críticos de la estructura, seguido por la tensión axial y el torsor.

Tanto del primer caso de estudio con viento a 90° y zonas de presión y succión como el segundo caso donde la predomina la succión sobre la cubierta se puede decir que ninguna de las barras supera su límite de rotura, por lo que no se deberán presentar roturas en las barras siempre y cuando el viento en exposición directa no sobrepase los 100Km/h.

Las tensiones producidas en las membrana se encuentran en el apéndice G.

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

### 2.9.3. Hipótesis N° 2 Carga de viento a 45° con laterales cerrados

Como en el caso anterior, se introdujo los datos sobre el área de la membrana en una relación fuerza / Área). Esta carga actúa sobre la superficie de acuerdo a un factor de carga (Loadfactor), que es el producto entre la presión dinámica ( $50 \text{ Kg/m}^2$ ) y el coeficiente de presión indicada en el ensayo de túnel de viento. Esta carga, como ya se dijo, es normal a la superficie y la dirección normal es definida por el sentido de los triángulos, por tanto la dirección X,Y,Z es igual a 0. Si la carga es de presión el numero es positivo y si es de succión es negativo.

Se introdujeron 10 casos de cargas de acuerdo a los resultados del ensayo de túnel de viento. (Ver apéndice F. Ensayo de túnel de viento a 45°)

Tabla de cargas							Distribución de las áreas de presión sobre la superficie de la membrana
IK	MODE OF LOAD	LOAD FACTOR	X-DIR	Y-DIR	Z-DIR	IM <sup>(*)</sup>	
1	WIND	0.3000	0.000	0.000	0.000	2	
2	WIND	0.2250	0.000	0.000	0.000	2	
3	WIND	0.1500	0.000	0.000	0.000	2	
4	WIND	0.1400	0.000	0.000	0.000	2	
5	WIND	0.0750	0.000	0.000	0.000	2	
6	WIND	-0.0750	0.000	0.000	0.000	2	
7	WIND	-0.1500	0.000	0.000	0.000	2	
8	WIND	-0.1300	0.000	0.000	0.000	2	
9	WIND	0.4000	0.000	0.000	0.000	2	
10	WIND	-0.4000	0.000	0.000	0.000	2	

Tabla N° II-30: Datos de la carga de viento del archivo LOADGEN del programa EASY®-TECHNET

(ver apéndice J: Acciones sobre la estructura bajo carga externa de viento a 45°)

#### Deflexión en la malla

El desplazamiento global de la estructura se orienta hacia la misma dirección de la carga de viento

En línea verde, el modelo sin carga, en línea roja se representa la deformada al aplicarle la carga a 45° con respecto al plano de la fachada.

(Ver apéndice C: Tabla de Coordenadas finales apartado Coordenadas bajo carga externa de viento a 45°)

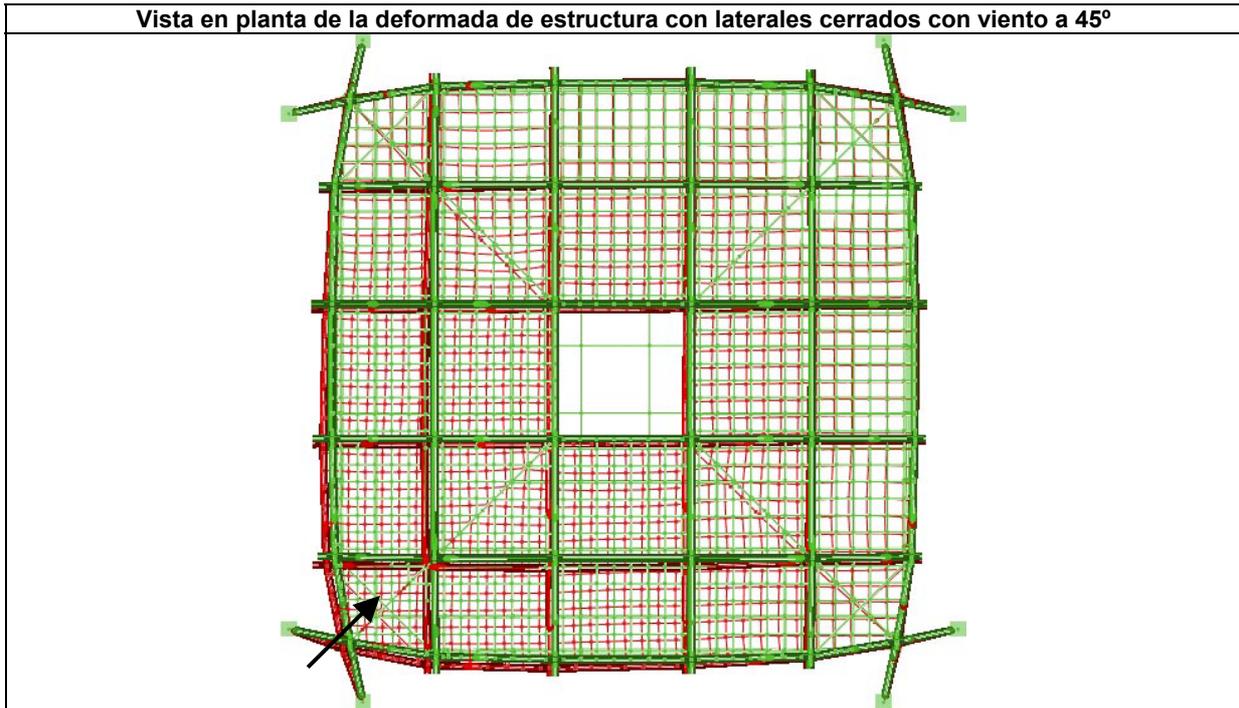


Figura N° II-25: Planta de la malla deformada con carga externa de viento a 45°

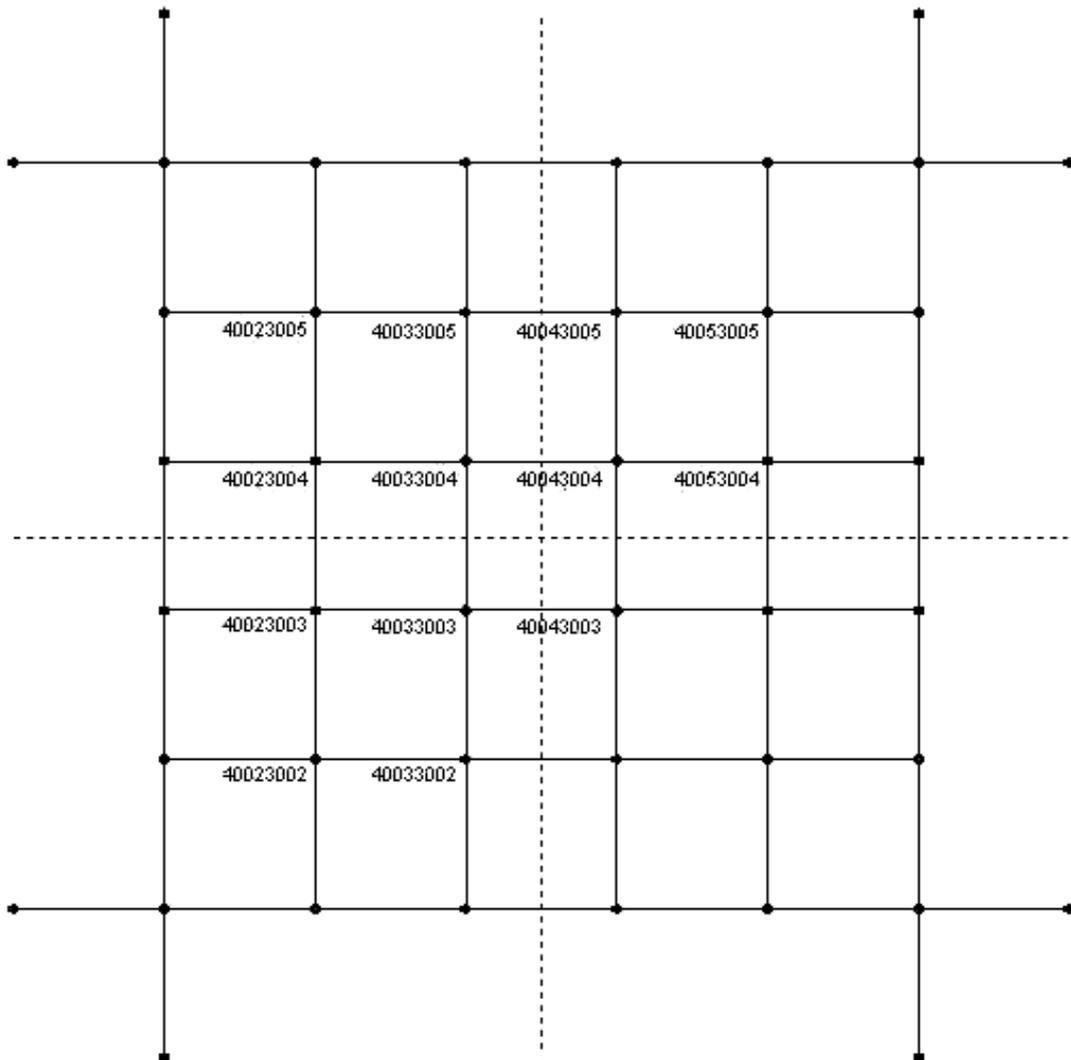
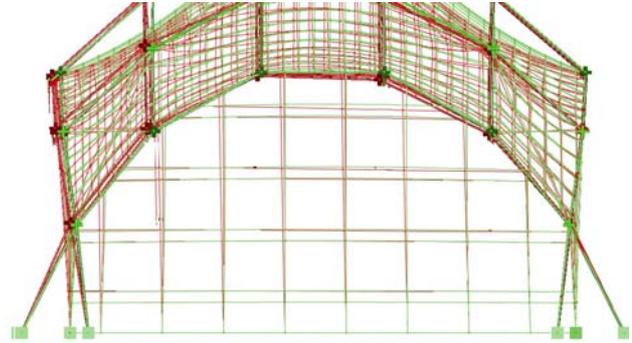
En términos generales, la cubierta tiene una zona de presión ubicada a barlovento y una zona de succión a sotavento. Los dos arcos laterales ubicados a barlovento se encuentran sometidos mayoritariamente bajo una carga a presión y en su extremo opuesto a la incidencia de cargas a succión, los arcos laterales ubicados a sotavento se encuentran sometido a cargas de succión.

Para estudiar las deflexiones de la estructura se tomó la mitad en diagonal de la estructura, ya que la carga se distribuye simétricamente sobre la superficie.

Deflexi en la malla con carga de viento 45°

N° de nudo	Deformación (m)			
	$\Delta_x$	$\Delta_y$	$\Delta_z$	$\Delta_{result.}$
40023002	-0.062	-0.063	0.0235	<b>0.0914</b>
40023003	-0.0766	-0.0437	-0.0156	<b>0.0896</b>
40023004	-0.0651	-0.0437	-0.0350	<b>0.0859</b>
40023005	-0.0231	-0.0319	-0.0100	<b>0.0406</b>
40033002	-0.0426	-0.0779	-0.0159	<b>0.0902</b>
40033003	-0.0425	-0.0439	-0.0878	<b>0.1070</b>
40033004	-0.0328	-0.0441	-0.1030	<b>0.1168</b>
40033005	-0.0165	-0.0069	-0.0230	<b>0.0292</b>
40043003	-0.0428	-0.0342	-0.1028	<b>0.1165</b>
40043004	-0.0330	-0.0344	-0.1142	<b>0.1238</b>
40043005	-0.0164	0.0033	-0.0330	<b>0.0337</b>
40053004	0.0045	-0.0176	-0.0334	<b>0.0381</b>
40053004	-0.0076	-0.0087	-0.0159	<b>0.0197</b>

Zona de presión y succión



Cuadro N° II-23 Resultado de la deflexión en la malla con carga de viento 45°

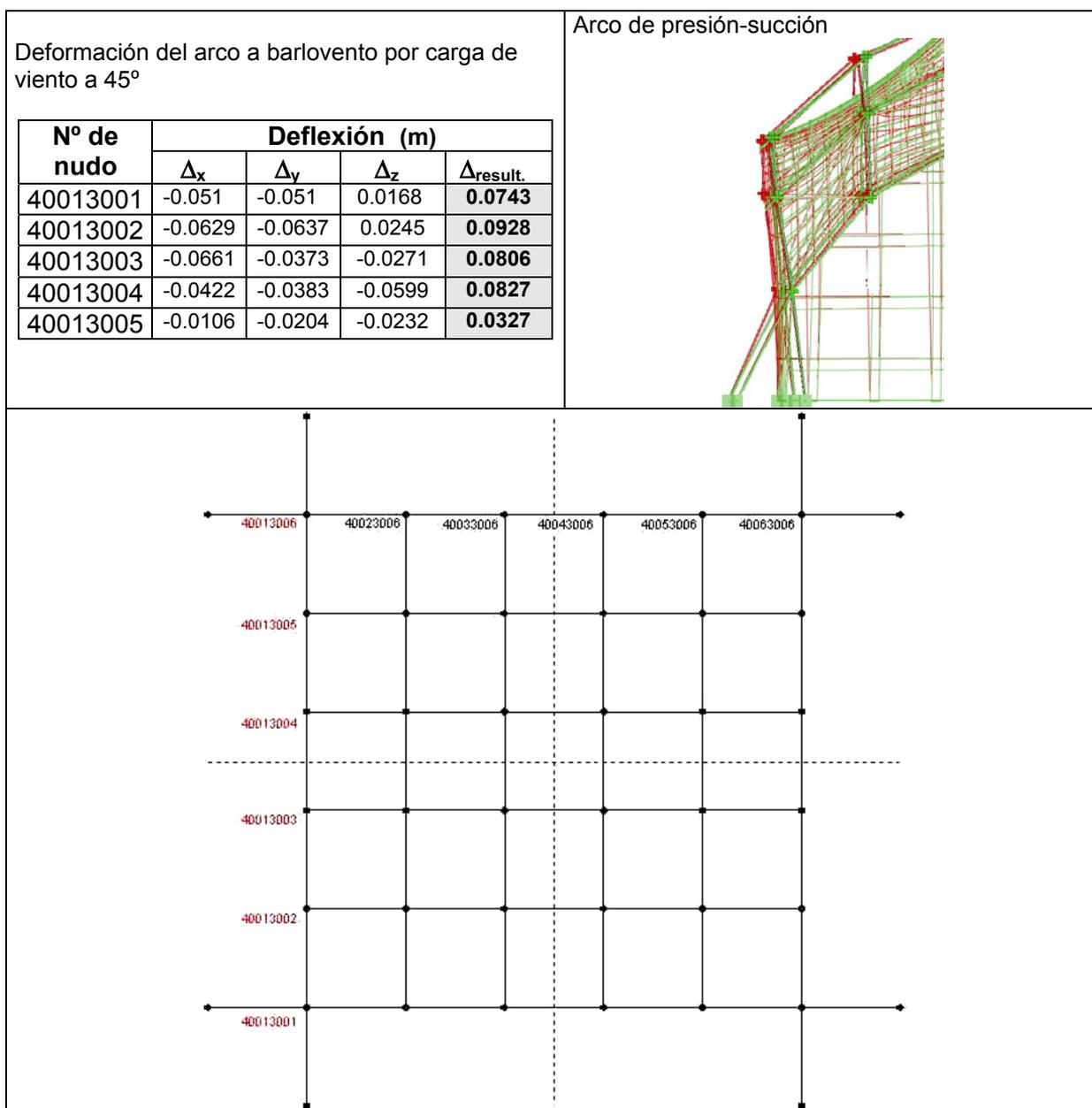
## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Las máximas deflexiones resultantes que se presentan en el interior de la malla bajo una carga externa de viento a 45° se ubican en la cresta, siendo nudo **40043004** el de mayor deformación resultante con 12,38 cm, este nudo tiene un desplazamiento horizontal de 3 cm en el eje **X** e **Y**, y 11 cm en el eje **Z**.

En la zona de presión directa las máximas deflexiones resultantes están ubicadas en los nudos **40023002** y **40033002** con una deformación de 9 cm cada uno. Sin embargo, el máximo desplazamiento horizontal se ubica en el nudo **40023003** con un desplazamiento en **X** de 7cm y en **Y** de 4cm.

### Deflexiones en los arcos

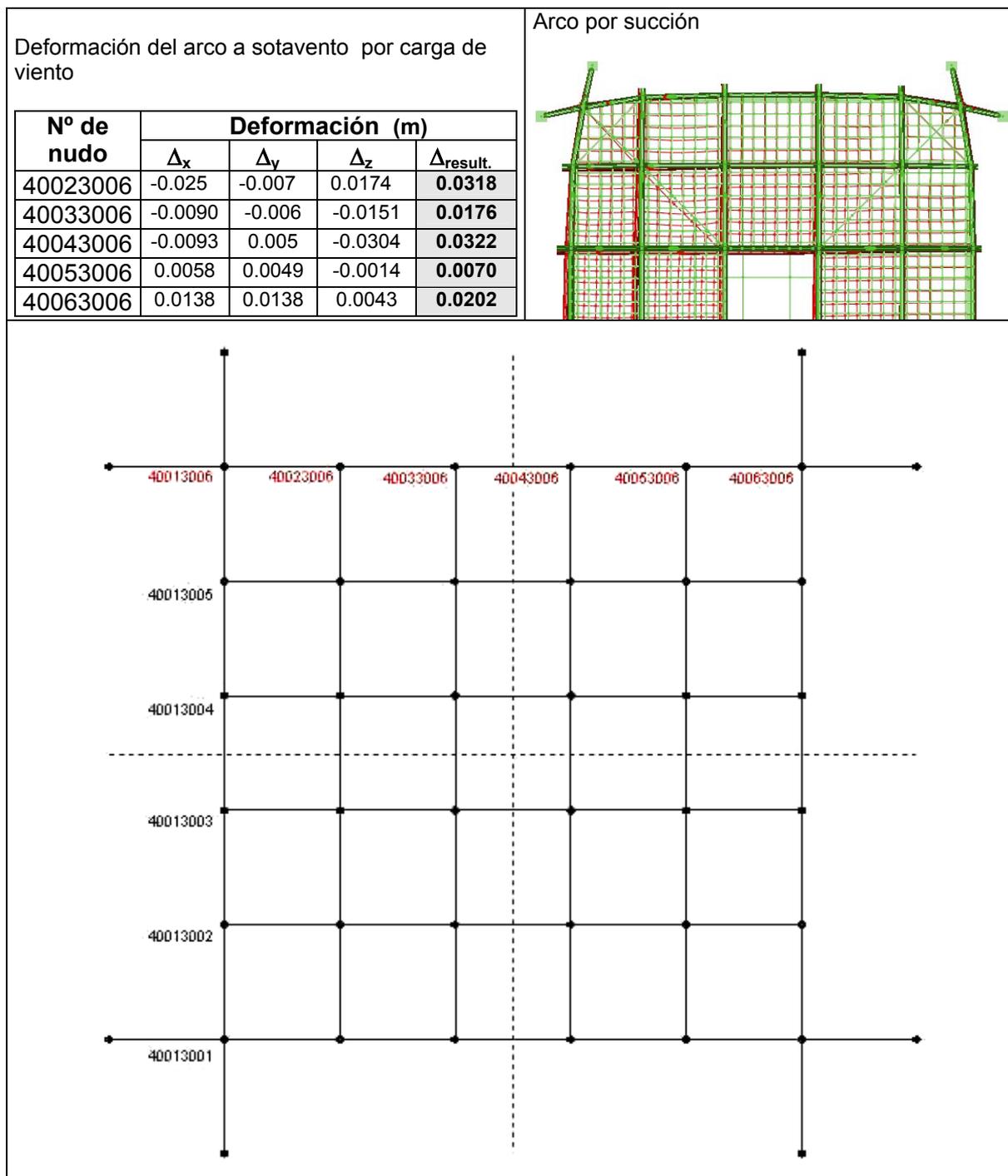
La deformación en este arco lateral, marcado en rojo, es por presión-succión



Cuadro N° II-24: Resultado de la deflexión del arco lateral con carga de viento 45°

En este arco lateral la mayor deformación se presenta en el nudo 40013002, con una deformación resultante de 9cm, siendo a su vez el nudo que más desplazamiento horizontal tiene con 6cm tanto en el eje X como en el Y.

El nudo **440023005** tiene el menor desplazamiento resultante con un valor de 3,27cm sometido a succión con un desplazamiento máximo horizontal de 2cm en el eje Y



Cuadro Nº II-25: Resultado de la deformación del arco a sotavento con carga de viento 45°

El arco a sotavento sometido a una fuerza de succión tiene en el nudo **40043006** la máxima deformación resultante con 3,2 cm, seguido por el nudo **40023006** con una deformación resultante de 3,18cm, teniendo a su vez el máximo desplazamientos horizontales en el eje **X** con 2 cm.

### Esfuerzos en las Barras

(ver apéndice I: Esfuerzos en las barras pre-flectadas y membrana con carga externa de viento a 45°. Hipótesis N° 2)

#### Esfuerzo Axial:

Esta fuerza perpendicular a la superficie comprime toda la malla (representado en la zona naranja-roja) y el resto de los arcos perimetrales entran en tracción (zona azul) La fuerza axial máxima en toda la estructura es de 1.04KN y la mínima es de  $-0.77$  KN. El cual se observa un incremento significativo en un 72% de este esfuerzo ubicado, tal y como lo muestra la figura el cuadrante de la malla expuesta directamente a la dirección del viento.

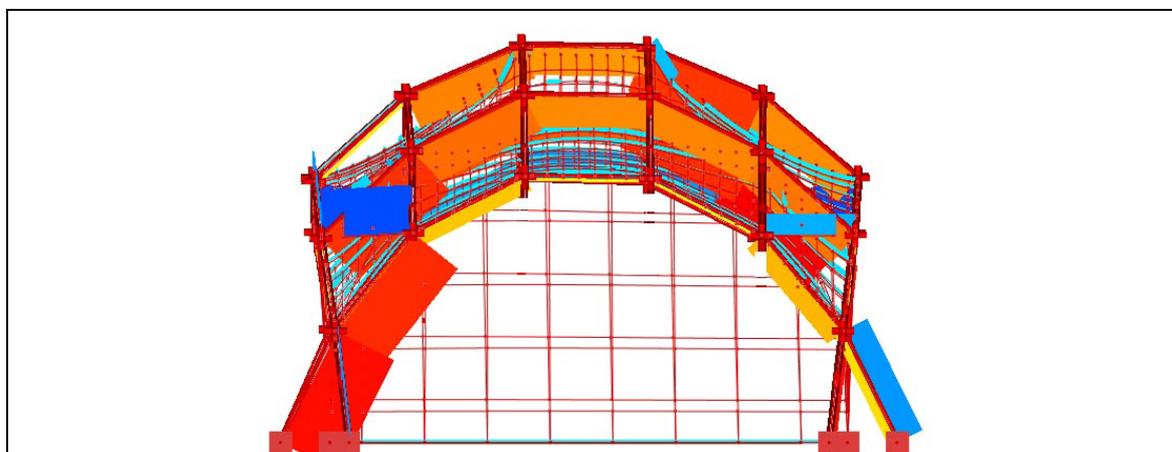


Figura N° II-26: Esfuerzo axial

#### Esfuerzo de Flexión

El momento de flexión se sitúa paralelo al eje longitudinal de las barras. El máximo valor del esfuerzo de flexión con carga exterior de viento se ubica en 0.37KN-m, lo que indica que con respecto a la pre-flexión inicial ubicada en 0.329KN-m no presenta aumentos significativos. Es decir la pre-flexión esta actuando como rigidización global de la estructura.

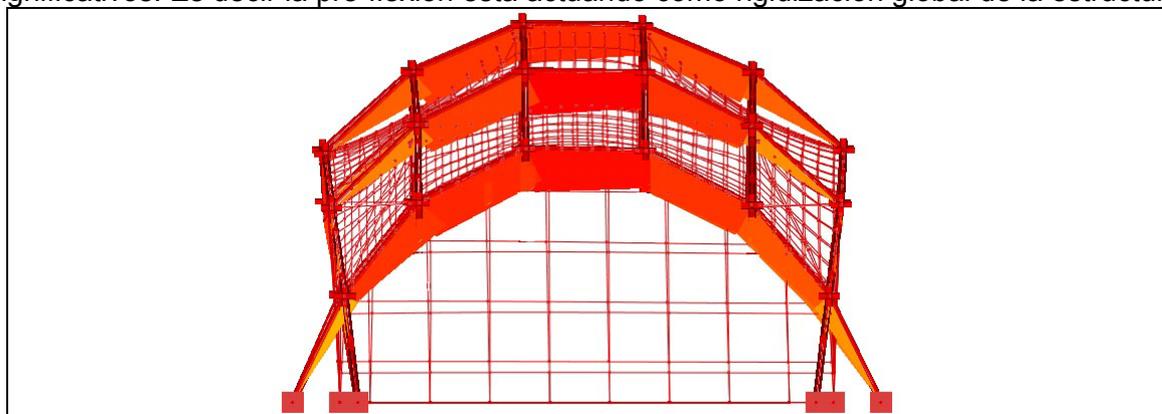


Figura N° II-27: Esfuerzo de flexión

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

### Esfuerzo cortante

El valor máximo de esfuerzo de corte es de 0.23 KN y como valor mínimo  $-0.23$  KN, concentrándose mayoritariamente en los nudos del arco perimetral. El esfuerzo de corte al igual que el flector no presenta aumentos significativos con respecto a los esfuerzos iniciales de preflexión siendo este de 0.20 KN

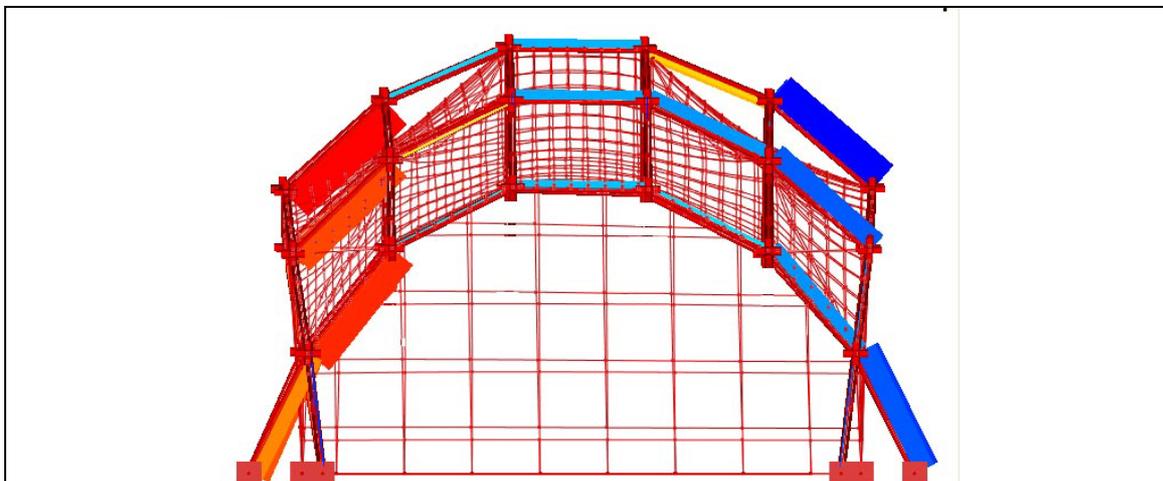


Figura N° II-28: Esfuerzo de corte

Según el cálculo realizado esfuerzos de torsión que se producen en la estructura son despreciables. (ver Apéndice I. Esfuerzo en las barras preflexadas y membrana bajo carga de viento a  $45^\circ$ . Hipótesis N° 2)

### Reacciones de los nudos de la base

Para el estudio de las reacciones se tomó los nudos de la base marcados en rojo.

Reacciones en los nudos con desplazamientos y giros impedido con carga de viento				
N° de nudo	Reacción (KN)			
	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$R_{result.}$
40003001	0.133	0.006	-0.107	<b>0.171</b>
40003006	0.553	0.105	0.858	<b>1.026</b>
40013000	0.002	0.144	-0.079	<b>0.164</b>
40013007	0.023	0.028	-0.485	<b>0.486</b>
40063007	0.022	-0.206	0.064	<b>0.216</b>
40073006	-0.206	0.022	-0.068	<b>0.218</b>
40073001	0.033	0.026	-0.499	<b>0.500</b>
40063000	0.106	0.557	0.858	<b>1.057</b>
$\Sigma$ Reacción vertical Total de pre-flectado + carga externa (KN)			<b>0.542</b>	

**Comprobación:**  
 $\Sigma$  Acciones sobre la estructura: 0.517 KN  
 como se observa la acción es y la reacción es de igual orden de magnitud ( ver apéndice J)

Cuadro N° II-26: Reacciones con carga externa de viento a  $45^\circ$

La reacción máxima se encuentra en el nudo **40063000** con un valor de 1.057 KN, seguido del nudo **40003006** con 1.026 KN y, **40063007** y **40073007** con un valor de 0,21 KN cada uno. (Ver apéndice J. Acciones sobre las barras bajo carga externa de viento a 45° Hipótesis N° 2)

**Comprobación de la tensión de la barra crítica bajo una carga externa de viento a 45° obtenida por ensayo de túnel de viento.**

Para la comprobación de las tensiones de la barra se trabajó con la mitad de la estructura ya que es simétrica por la diagonal de la estructura. Se estudiaron un total de 47 barras de las 68 que componen la estructura

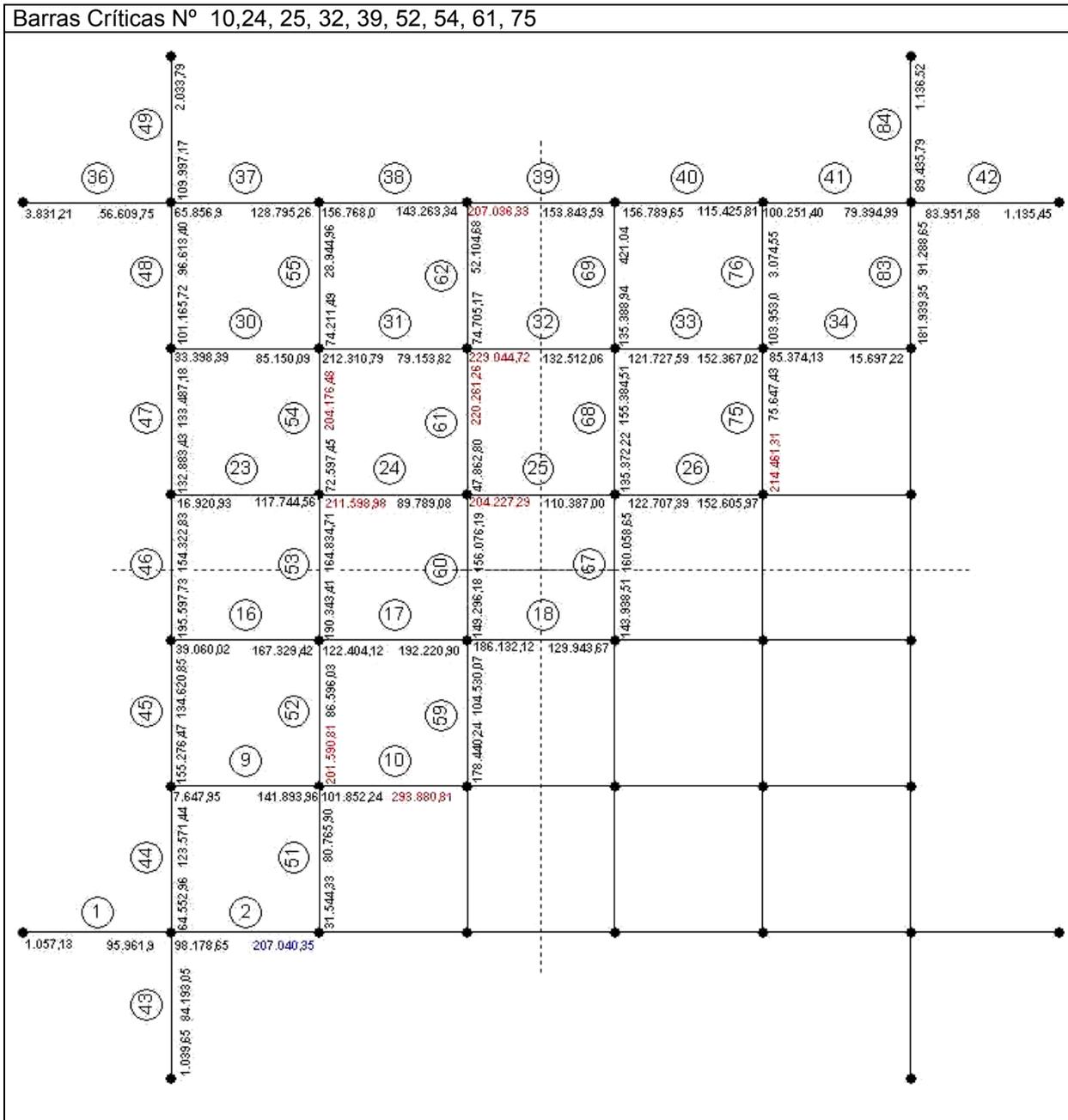


Gráfico N° II-10: Comprobación de la tensión en las barras críticas con carga externa de viento a 45°

**CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL**

Hay que destacar que esta hipótesis es la que más barras críticas presenta con un total de 9 barras críticas. La tensión máxima de estas barras se presentan la barra N° 10 en el nudo **4003302** con un valor de 293.880,81 KN/m<sup>2</sup>, seguida por la barra N° 32 en el nudo **40033005** con un valor de 229.044,72 KN/m<sup>2</sup>

En los arcos presenta una tensión máxima en la barra N° 2 en el nudo **40023001** con un valor 207.040,35 KN/m<sup>2</sup>, el resto de los arcos se mantienen con una tensión promedio entre 125.000 a 154.000 KN/m<sup>2</sup>. A continuación se presenta una discretización de los nudos de máxima tensión.

Tabla comparativa entre los nudos críticos <b>40033002</b> y <b>40033005</b>					
Zona de presión			Zona de succión		
<b>Barra N° 10</b>	<b>L<sub>0</sub>=1</b>	<b>Nudo N° 40033002</b>	<b>Barra N° 32</b>	<b>L<sub>0</sub>=0</b>	<b>Nudo N° 40033005</b>
<b>σ<sub>Normal</sub></b>		<b>σ<sub>N</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>σ<sub>Normal</sub></b>		<b>σ<sub>N</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
N (KN)	-0,772628	-2.826,840585	N (KN)	0,509948	(KN/m <sup>2</sup> )
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		A (m <sup>2</sup> )	0,000273	1865,764252
My (KN-m)	-0,270631	<b>σ<sub>M</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	My (KN-m)	0,372632	<b>σ<sub>M</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Mz (KN-m)	-0,118554		Mz (KN-m)	0,039697	
Wy (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	-214.426,282	Wy (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	227.177,7538
Wz (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06		Wz (m <sup>3</sup> )	1,8150E-06	
<b>Comb. σ<sub>Normal</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>			<b>Comb. σ<sub>Normal</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>229.043,5180</b>	
<b>Comb σ<sub>Tangencial</sub></b>		<b>σ<sub>T</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>σ<sub>Tangencial</sub></b>		<b>σ<sub>T</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
T <sub>y</sub> (KN)	0,208821	0,208822	T <sub>y</sub> (KN)	0,098182	0,124792
T <sub>z</sub> (KN)	-0,000696		T <sub>z</sub> (KN)	-0,077028	
A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b>σ<sub>MT</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	A (m <sup>2</sup> )	0,000273	<b>σ<sub>MT</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
M <sub>t</sub> (KN-m)	-0,002874		M <sub>t</sub> (KN-m)	-0,000101	
W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	-791,732892	W <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	-27,8233
<b>Comb σ<sub>Tangencial</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>114.261,4146</b>		<b>Comb σ<sub>Tangencial</sub> (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>428,7568</b>	
<b>Comb σ<sub>Total</sub></b>	<b>293.880,8118</b>		<b>Comb σ<sub>Total</sub></b>	<b>229.044,7220</b>	

Tabla N° II-31: Discretización de las tensiones de las barras N° 10 y 32

### Tabla comparativa de las tensiones de las barras críticas de las hipótesis de viento

Hipótesis de viento Tensión (KN/m <sup>2</sup> )	Hipótesis viento N° 1 90° (Túnel de viento)		Hipótesis viento N° 2 45° (Túnel de viento)	
	<b>σ<sub>combinada</sub></b>	<b>σ<sub>M</sub> (Flexión)</b>	<b>σ<sub>combinada</sub></b>	<b>σ<sub>M</sub> (Flexión)</b>
Interna en la malla	<b>237.788,8975</b>	<b>235.008,582</b>	<b>293.880,8118</b>	<b>214.426,282</b>
En el arco	<b>185.119,7975</b>	<b>182.586,1672</b>	<b>207.040,3529</b>	<b>206.060,469</b>

Tabla N° II-32: Comparación de las tensiones máximas bajo cargas de viento.

De esta tabla comparativa se puede mencionar varias conclusiones importantes. La máximas tensiones están siempre ubicadas en el interior de la malla siendo la mayor tensión la registrada en la hipótesis de viento con una dirección a 45° con respecto a la estructura (marcada en la tabla en rojo). Esta tensión máxima combinada en uso (normal + flexor + torsor + cortante + sobrecarga de viento) consume un 45% del valor del límite de

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

rotura del material (PRFV) otorgado por el fabricante ( $650.000 \text{ KN/m}^2$ ) y según el valor calculado experimentalmente, a principio de este capítulo, se ubica en un 41% ( $700.000 \text{ KN/m}^2$ ), en todo caso, la tensión combinada nunca llega a valores críticos que puedan comprometer el uso de la estructura teniendo un margen, en promedio, de un 60%.

Otro aspecto aparentemente obvio pero no menos importante es el hecho que en todos los casos la tensión que más aporta a la tensión crítica combinada es la tensión del momento flector ( $\sigma_M$ ), que en el caso, de la tensión máxima combinada representa entre un 73% a 98% de la tensión total combinada.

## 2.10 Comportamiento de la estructura ante cargas externas de nieve

La carga de nieve y su distribución sobre la superficie ha sido estudiada por diferentes autores Bagnold (1941), Mellor (1965), Hobayashi (1973), Kind (1981), Schimidt (1986), Majowiecki (1990) entre otros. Sin embargo, a pesar que hay teoría sobre el tema lo más cercano al comportamiento real sigue siendo los ensayos de laboratorio sobre todo cuando se combina la carga de nieve con el viento.

La carga de nieve reduce la pretensión de la membrana y produce compresiones en la malla de barras por lo que se hace necesario el estudio del efecto que produce. Para diseñar esta carga tomamos como referencia la bibliografía encontrando un rango de sobrecarga para la nieve que oscila entre  $0.35 \text{ KN/m}^2$  a  $0.40 \text{ KN/m}^2$ , considerada ésta como una carga que se distribuye uniformemente sobre la superficie.

Autor	Carga ( $\text{KN/m}^2$ )	Descripción
T. Herzog (1977)	0.35	Carga aplicada a las construcciones temporales.
k. Yamamoto (1997)	0.40	Estudios experimentales sobre la optimización de las formas.
Normativa Española(AE-88)	0.40	.

Tabla N° II-33: Sobre carga de nieve

Para efectos de nuestra investigación hemos tomado una sobrepresión de  $0.35 \text{ KN/m}^2$  aplicada para construcciones temporales, Herzog (1977), que es la aplicación que estudiamos en este trabajo, considerando también que estamos desarrollando esta aplicación para climas tropicales húmedos como se dijo en la introducción, por lo que el cálculo bajo una carga de nieve es, a los efectos prácticos de este trabajo, de carácter referencial.

(Ver apéndice K: Acciones sobre la estructura bajo carga externa de Nieve)

### Análisis de los desplazamientos de los nudos

#### Deflexión en la malla:

La deformación global de la estructura sometida a una carga de nieve tiende a achatar la estructura, producto del desplazamiento de los arcos de borde.

(Ver apéndice C: Tabla de Coordenadas finales apartado Coordenadas bajo carga externa de nieve)

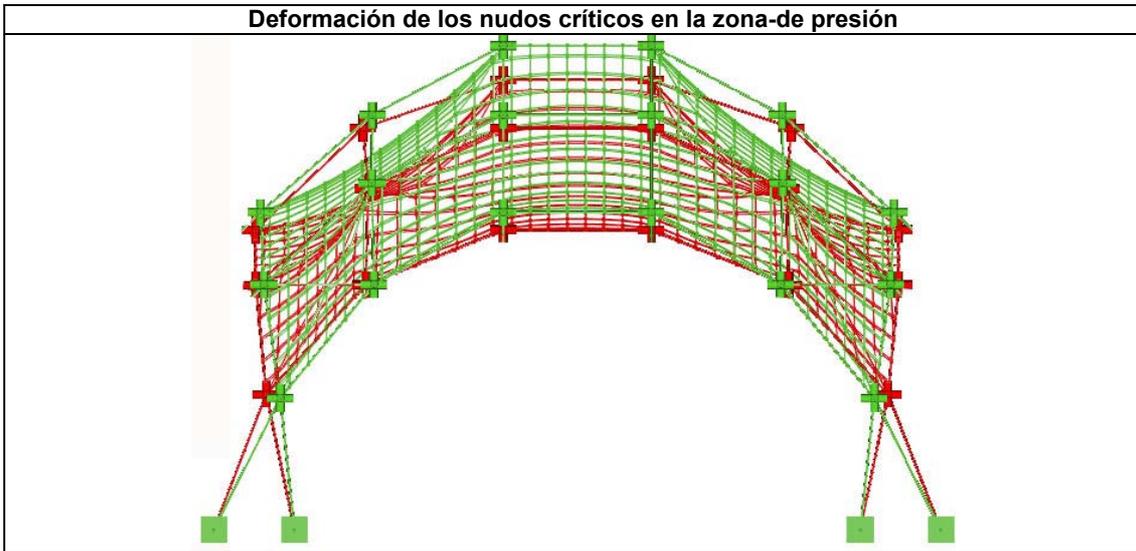
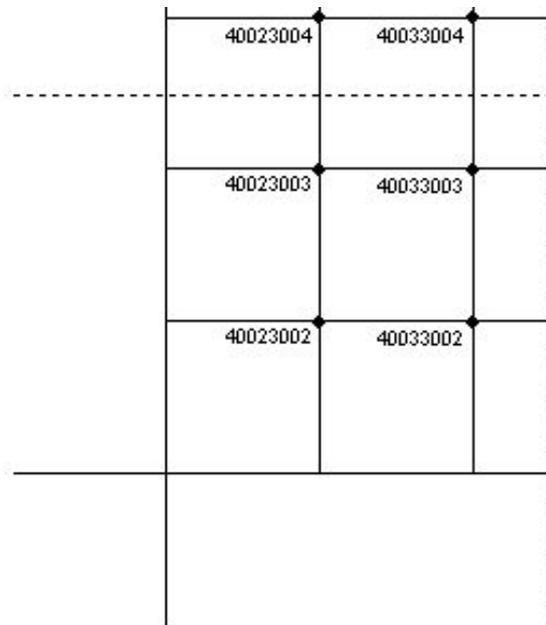
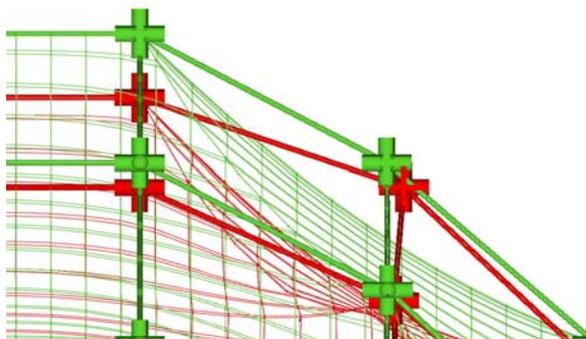


Figura N° II-29: Deformación bajo carga de nieve

Para el estudio de las deformaciones se tomó un cuarto de la cubierta cuyos puntos pertenezcan al interior de la malla.

Deflexión con carga de nieve

N° de nudo	Deformación (m)			
	$\Delta_x$	$\Delta_y$	$\Delta_z$	$\Delta_{result.}$
40023002	-0.024	-0.024	-0.0385	<b>0.0515</b>
40023003	-0.0622	-0.0007	-0.0883	<b>0.1080</b>
40023004	-0.0620	-0.0006	-0.0885	<b>0.1.80</b>
40033002	-0.0007	-0.0622	-0.0883	<b>0.1080</b>
40033003	-0.0007	-0.0007	-0.2318	<b>0.2318</b>
40033004	-0.0007	-0.0007	-0.2318	<b>0.2318</b>



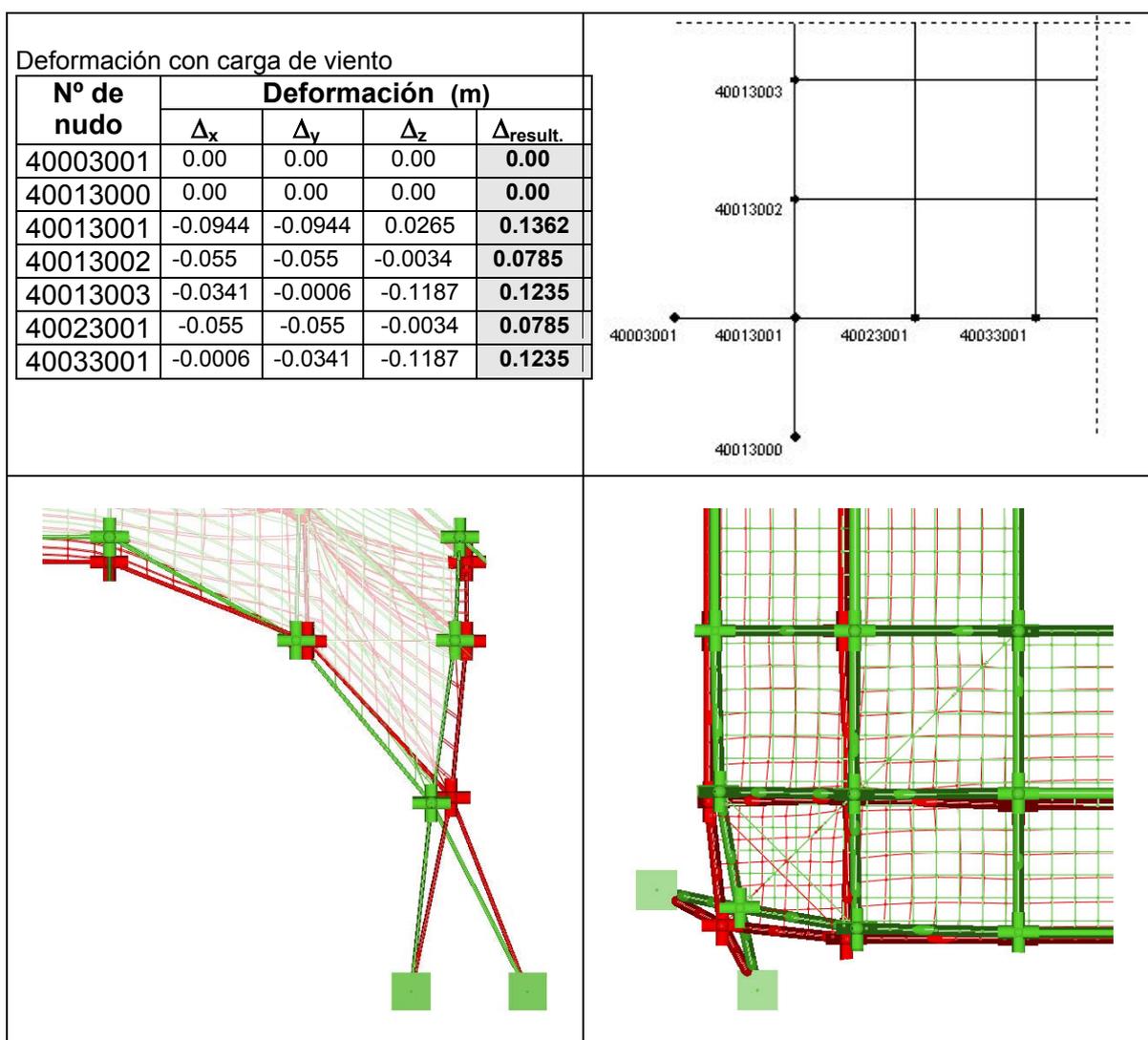
Cuadro N° II-27: Resultado de la deflexión en la malla por carga de nieve

## CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

El máximo desplazamiento se localiza en los nudos **40033003**, **40033004** con 0.23 cm desplazado en el eje z, estos puntos conforman la cumbre de la cúpula. El resto de los desplazamientos se mantienen en el eje z siendo estos de menor valor oscilando entre 3 a 8 centímetros.

### Análisis de los desplazamientos de los arcos de borde

Para el estudio de las deformaciones se tomó un cuarto de la cubierta



Cuadro N° II-28: Resultado de la deflexión en los arcos por carga de nieve

En los arcos de borde el máximo desplazamiento en los ejes x, y, es en el nudo **40013001** de 9.4 cm siendo ambos valores negativos lo que indica que este nudo sale por fuera de la estructura, este nudo de la intercepción de los dos arcos, en el eje z, el valor es de 2 cm lo que indica que sube ligeramente, dando como máximo desplazamiento resultante en este nudo de 13.6 cm. Los nudos **40013003**, **40033001** tienen un desplazamiento de 12.3 cm siendo en la componente z donde alcanza su máximo valor.

## Reacciones de los nudos de la base:

Coordenadas de los nudos de base				
Nº de nudo	Coordenadas (m)			
	x	y	Z	
40003001	1.545	2.095	0.00	
40013000	2.089	1.545	0.00	

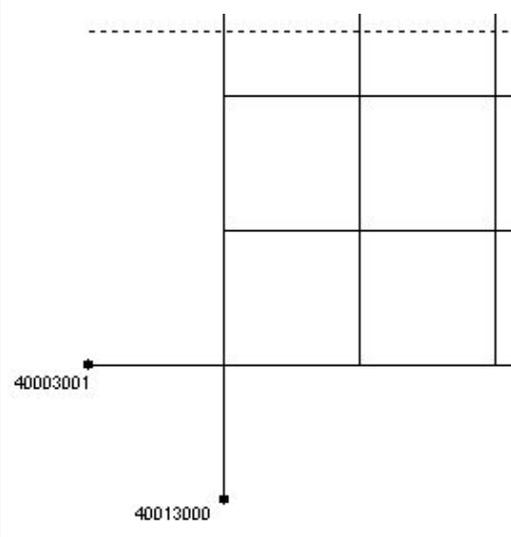
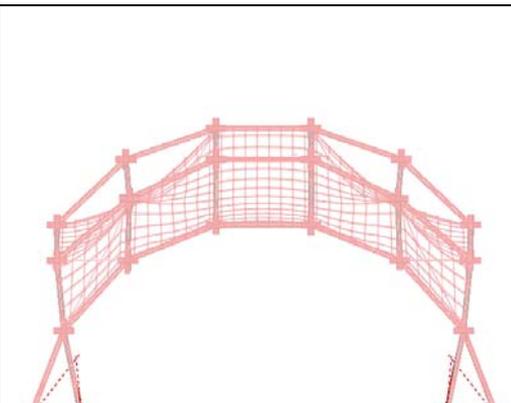
  

Reacciones en los nudos con desplazamientos y giros impedido con carga de nieve.				
Nº de nudo	Reacción (KN)			
	R <sub>x</sub>	R <sub>y</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>result.</sub>
40003001	-0.574	-0.070	0.734	<b>0.9344</b>
40013000	-0.070	0.574	0.734	<b>0.9345</b>
Σ Reacción vertical (KN) 8 bases			5.87	

Comprobación:  
 $R_T = q \cdot a$   
 Donde:  
 $a = \text{área proyectada (16.75m}^2\text{)}$   
 Sustituyendo:  
 $R_T = 0.35\text{KN} \cdot 16.75\text{m}^2 \quad .R_T = 5.87\text{KN/ m}^2$

En este caso la sumatoria total de las acciones es igual a la sumatoria de la componente vertical de las reacciones, siendo igual a 5.87KN. (Ver anexo N° K. Acción sobre la estructura con carga externa de nieve)

Cuadro N° II-29: Reacciones bajo carga de nieve

Como la carga de nieve es una carga uniforme las reacciones son iguales en todos los nudos de base teniendo un valor de 0.93 KN por base.

## Esfuerzos en las barras

### Esfuerzo Axial

Esta fuerza directa perpendicular a la superficie alcanza un valor máximo de 1.66 KN y un valor mínimo de -1.78 KN. En el gráfico se observa como la zona superior del arco de borde entra en tensión (representada en color azul) y los extremos en dirección hacia las bases entran en compresión. En el resto de las barras en el interior de la malla este esfuerzo las comprime.

Un aspecto importante de destacar es la tensión que se produce en el tensor de los rombos de las esquinas, ya que al relajarse la membrana es el responsable de evitar la deformación de la malla rígida.

(ver apéndice L. Esfuerzos en las barras pre-flectadas y membrana con carga externa de Nieve.)

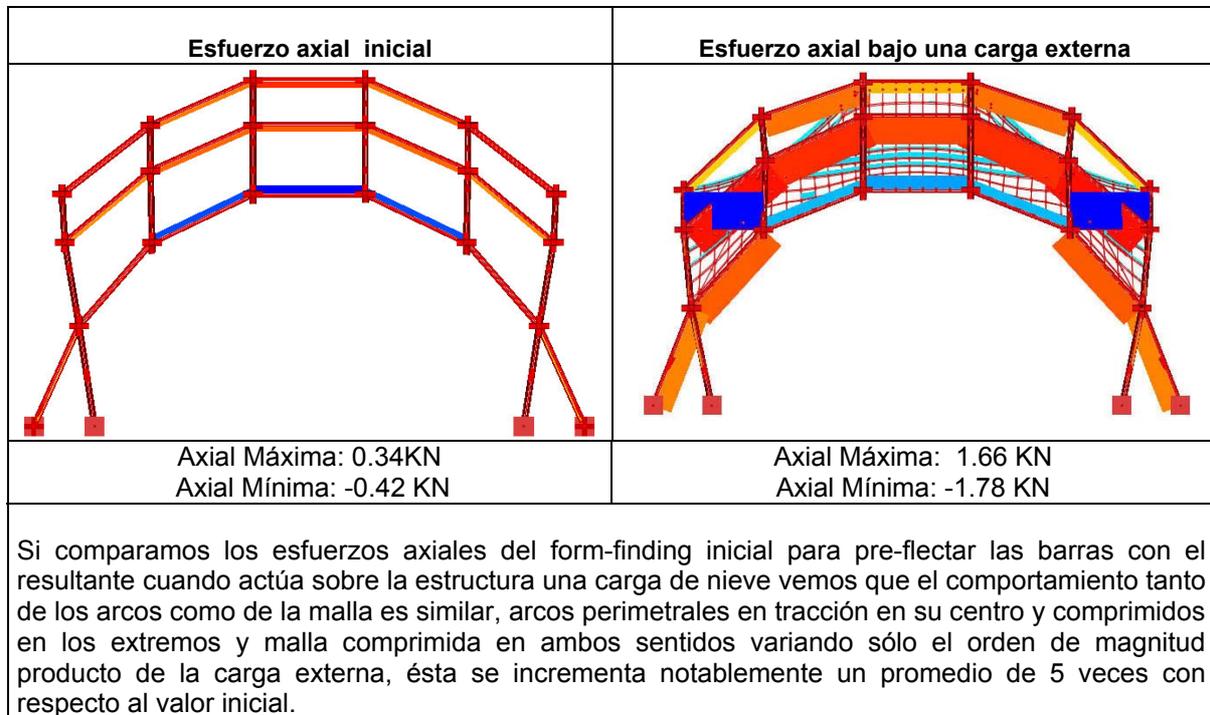


Figura N° II-30: Comparativa esfuerzo Axial inicial y bajo carga externa de nieve

### Tensión de la membrana

Dado que la carga de nieve achata la estructura es importante estudiar cual es el efecto de este desplazamiento en la membrana. La membrana se relaja en las zonas centrales (representadas en azul) teniendo una destensión de  $-2.81$  KN

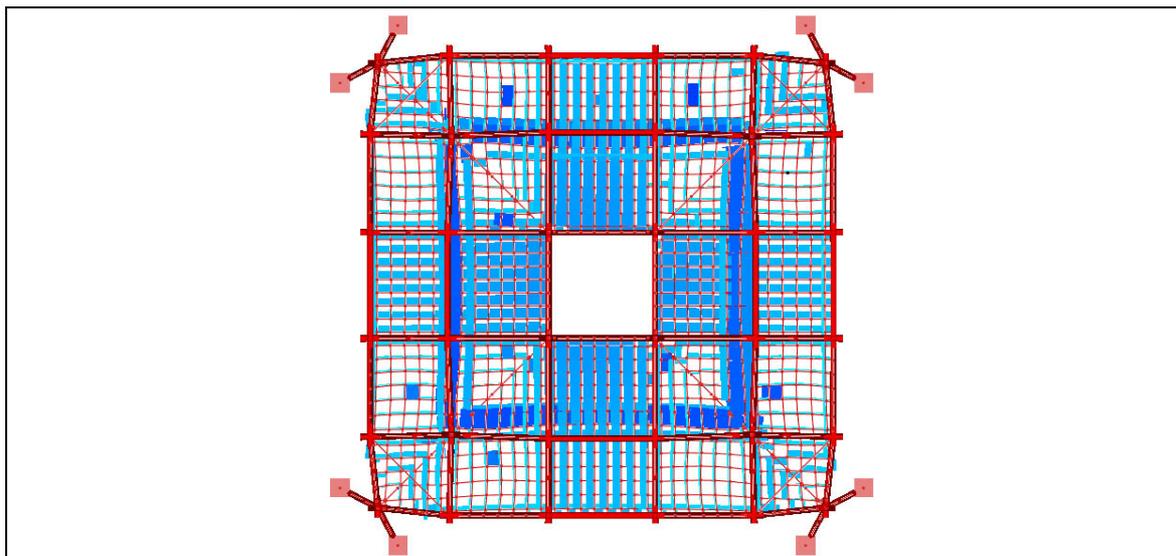


Figura N° II-31: Tensión de la membrana

## Esfuerzo de Flexión

Al igual que en el caso del viento el momento de flexión se sitúa paralelo al eje longitudinal de las barras y no presenta aumentos significativos con respecto a la de la pre-flexión inicial de las barras. Por lo que se infiere que el material se encuentra trabajando por debajo del límite de rotura, por lo que el comportamiento de la estructura sigue siendo en estado elástico por tanto la estructura podría volver a su estado inicial sin presentar deformaciones en las barras. Debido a este efecto se consideró incluir en los cuatro ramos de las esquinas de la cúpula tirantes o tensores que contribuya a la rigidización en caso de destensión de la membrana.

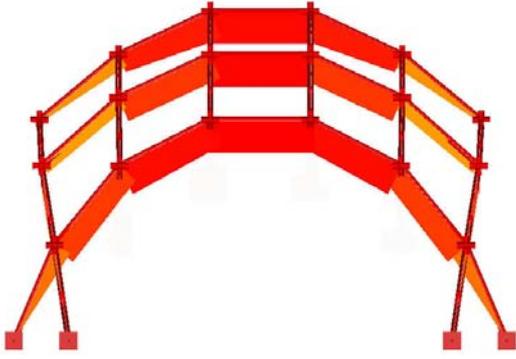
Esfuerzo de Pre-flexión inicial	Esfuerzo de flexión bajo una carga externa de nieve
	
Flexión Máxima: 0.31KN-m	Flexión Máxima:0.42KN-m
<p>La estructura presenta un aumento de 11 KN-m en la flexión con respecto a la pre-flexión inicial bajo una carga externa de nieve, repartida uniformemente sobre la superficie. Sin embargo, por la flexión inicial le otorga rigidez a la estructura y la mantiene en el rango elástico del material, no presentándose roturas en las barras.</p>	

Figura N° II-32: Comparativa de los esfuerzos de flexión iniciales y bajo carga de nieve



Punto final de la barra			Punto inicial de la barra		
<b>Barra N° 1</b>		<b><math>L_a=1</math></b>	<b>Nudo N° 40013001</b>		
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>			<b><math>\sigma_N</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		
N (KN)	-0,888831		1,139023		(KN/m <sup>2</sup> )
A (m <sup>2</sup> )	0,000273		0,000273		4167,382548
<b>My (KN-m)</b>			<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		
	-0,262326		0,253067		(KN/m <sup>2</sup> )
<b>Mz (KN-m)</b>			<b>Mz (KN-m)</b>		
	-0,119814		0,137895		(KN/m <sup>2</sup> )
<b>Wy (m<sup>3</sup>)</b>			<b>Wy (m<sup>3</sup>)</b>		
	1,8150E-06		1,8150E-06		
<b>Wz (m<sup>3</sup>)</b>			<b>Wz (m<sup>3</sup>)</b>		
	1,8150E-06		1,8150E-06		215.405,341357
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b>-213.796,7480</b>	<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b>219.572,7239</b>
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math></b>			<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		
<b><math>T_y</math> (KN)</b>	0,119814		0,095250		(KN/m <sup>2</sup> )
<b><math>T_z</math> (KN)</b>	-0,262326		0,047539		0,106454
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>			<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		
	0,000273		0,000273		(KN/m <sup>2</sup> )
<b><math>M_t</math> (KN-m)</b>			<b><math>M_t</math> (KN-m)</b>		
	0,000000		0,000000		(KN/m <sup>2</sup> )
<b><math>W_t</math> (m<sup>3</sup>)</b>			<b><math>W_t</math> (m<sup>3</sup>)</b>		
	3,630012E-06		3,630012E-06		0,000273
<b>Comb. <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b>1055,15</b>	<b>Comb. <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>		<b>389,488019</b>
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>		<b>213.804,5591</b>	<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>		<b>219.573,7602</b>

Tabla N° II-34: Comprobación de tensión crítica barras N° 1 y 2

En la tabla de cálculo observamos como son las tensiones de axial y flexión las que aumentan y caracterizan el incremento del nudo, destacándose, como es constante en esta estructura, la tensión de flexión aportando un promedio de 90% de la tensión final combinada, sin embargo, en la tensión axial crece su valor tres veces con respecto a la tensión axial de la preflexión.

En la malla ocurren las tensiones máximas de este caso de carga, observándose barras críticas N° 10 y 52, dado que tanto los puntos finales como iniciales de estas barras aumentan considerablemente. Pero las tensiones máximas se presentan en los nudos **40063002** , **40033006**, asociadas a las barras 24 , 66 respectivamente, siendo la más alta tensión que se registra de todos las hipótesis de cargas hasta este momento estudiadas, observemos su discretización por tensiones:

Punto inicial de la barra		
Barra N° 66	$L_0=1$	Nudo N° 40063002
<b><math>\sigma_{Normal}</math></b>		
N (KN)	1,006935	(KN/m2)
A (m2)	0,000273	-3.251,996490
My (KN-m)	0,427217	<b><math>\sigma_M</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
Mz (KN-m)	0,104592	
Wy (m3)	1,8150E-06	(KN/m2)
	1,8150E-06	293.006,735135
<b>Comb. <math>\sigma_{Normal}</math> (KN/m2)</b>	<b>-213.796,7480</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Tangencial}</math></b>		
$T_v$ (KN)	-0,235220	<b><math>\sigma_T</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$T_z$ (KN)	-0,286823	
A (m2)	0,000273	<b><math>\sigma_{MT}</math> (KN/m<sup>2</sup>)</b>
$M_t$ (KN-m)	0,016806	
$W_t$ (m <sup>3</sup> )	3,630012E-06	4.629,736881
<b>Comb. <math>\sigma_{Tangencial}</math> (KN/m2)</b>	<b>5986,904550</b>	
<b>Comb <math>\sigma_{Total}</math></b>	<b>296.872,00149</b>	

En la tabla se puede observar como la tensión axial se incrementa y por consecuencia aumenta la tensión por flexión, sin embargo, es ésta última la que aporta casi la totalidad del valor de la tensión combinada al sumarse el incremento a la tensión inicial de pre-flexión.

Esta tensión máxima llega a consumir un 45,67% del límite de rotura del material (según datos del fabricante), por lo que se puede afirmar que es esta pre-flexión inicial la que no permite que el material deforme significativamente, que comprometa su equilibrio llegando al colapso.

Tabla N° II-35: Comprobación de tensión crítica barras N° 66

En este capítulo se avanzó en el conocimiento del comportamiento estructural de las mallas pre-flectadas, por lo que se puede mencionar los siguientes puntos:

La deformación deseada de la malla como hemos demostrado, es debida principalmente a la flexión y a la distorsión de la diagonal de los cuadrados de la malla convirtiéndose rombos.

El comportamiento a flexión de los miembros de la malla depende de tres factores:

- El valor del módulo de elasticidad.
- Las propiedades geométricas de la sección transversal de las barras, sobre todo de su diámetro exterior.
- La rigidez de las uniones de la estructura a las fuerzas de corte horizontal.

Se producen básicamente dos tipos de esfuerzos y dos tipos de tensiones:

- Fuerza axial producida sobre las barras cuyo valor es muy bajo aunque tiende a aumentar al sumarse la pretensión de la membrana.
- Tensión axial producida en las diagonales del cuadrado.
- Esfuerzos de corte producidos en las uniones de las barras cuyo valor es muy reducido.
- Esfuerzo de flexión que son los mayores valores y son los que otorgan la rigidez global a la malla.

La rigidez de la fuerza axial de las barras y de las diagonales depende de sus secciones transversales y de los valores del módulo de elasticidad. Las barras transmiten fuerzas de compresión y las diagonales de tracción por lo que usar una membrana anticlástica para sustituir las diagonales funciona correctamente.

El comportamiento de los miembros de la malla a las fuerzas de corte depende de la rigidez a la flexión sobre el eje normal de las barras, del espaciado entre las barras y de la rigidez de las uniones de la estructura.

Todos los estudios aquí realizados parten del supuesto que cuando la malla es curvada, actúa sobre ella cargas de igual magnitud y sentido, para que la malla pueda repartirla uniformemente en todas las barras que la forman siendo el incremento desde los ejes de simetría hacia el perímetro. Las grandes deformaciones en las barras y sus respectivos giros y movimientos de los nudos suceden durante el proceso de erección donde las barras son sometidas a curvatura, si estos giros y movimientos son impedidos por alguna razón constructiva o por fricción entre las piezas, pueden ocurrir tensiones de compresión excesivas sobre la barra que pueden causar que la estructura colapse. Es por esto, que los nudos durante el proceso de erección tienen que girar libremente y sujetar bien la barra dado que ésta se encuentra en un estado muy inestable y muy susceptible ante cualquier fuerza externa, como por ejemplo una ráfaga de viento. Lo cual puede generar un proceso de erección desbalanceado o desigual apareciendo tensiones muy peligrosas que pueden causar daños a la malla.

En cualquiera de las secciones estudiadas la magnitud de las deformaciones está dentro de la región elástica del material por lo que no se deberán presentar roturas durante el proceso de montaje y erección, aunado a esto que el material seleccionado tiene una amplia capacidad para ser flectado.

En las comprobaciones numéricas de las deformaciones y las tensiones de las barras de la estructura se pudo comprobar que al actuar sobre la estructura una carga bien sea de viento o de nieve la pre-flexión inicial otorga una rigidez global. Las deformaciones implican en las barras unos estados de tensión, que en todos los casos esta por debajo del límite de rotura y en ningún caso se produce un curvado de las barras que no sea recuperable (estado plástico), por lo que la condición de estructura transformable es cumplida.

1. Los desplazamientos de los nudos por cargas externas están acompañados por cambios en la longitud de la diagonal entre los nudos de los rombos.
2. La flexión producida bajo una carga externa de viento y de nieve se mantiene en orden de magnitud similares a la pre-flexión inicial, es decir su aumento en términos globales no es significativo aunque en determinados puntos se concentren las tensiones.
3. El comportamiento estructural global de la malla a flexión depende de la sección de la barra, el valor del módulo de elasticidad y de la rigidez de las uniones.
4. La rigidez del esfuerzo axial de las barras y de la membrana depende de sus secciones transversales y de los valores del módulo de elasticidad. Las barras transmiten fuerzas de compresión y la membrana de tracción.

## Índice de figuras al final del capítulo

- Figura N° II-1: Características del modelo físico
- Figura N° II-2: Primera transformación de la malla
- Figura N° II-3: Prueba de flecha del arco
- Figura N° II-4: Segunda transformación de la malla. Proceso de form finding de la malla
- Figura N° II-5: Resultados geométricos
- Figura N° II-6: Form finding de la membrana
- Figura N° II-7: Fundamento geométrico
- Figura N° II-8: Numeración de los nudos
- Figura N° II-9: Numeración de las barras
- Figura N° II-10: Ángulos de los rombos de la malla
- Figura N° II-11: Flexión inicial producto de la deformación
- Figura N° II-12: Pérdida de la geometría
- Figura N° II-13: Proceso de re-equilibrio de la estructura
- Figura N° II-14: Proceso de re-equilibrio de la estructura con tensores en las esquinas
- Figura N° II-13: Comparación de coordenadas obtenidas por los dos modelos
- Figura N° II-14: Retorno de la estructura a su posición inicial plano
- Figura N° II-15: Prueba de la malla con nudos bloqueados y anclajes sin restricciones
- Figura N° II-16: Comparación de los esfuerzos iniciales con los cables de arriostre.
- Figura N° II-17: Unión malla de barras pre-flectadas y membrana
- Figura N° II-18: Efecto de la pretensión y el re-equilibrio de la estructura
- Figura N° II-19: Diseño del dispositivo para la aplicación de la tensión
- Figura N° II-20: Esfuerzo de corte
- Figura N° II-21: Estructura cerrada
- Figura N° II-22: Esfuerzo axial
- Figura N° II-23: Esfuerzo de flexión
- Figura N° II-24: Esfuerzo de corte
- Figura N° II-25: Planta de la malla deformada con carga externa de viento a 45°
- Figura N° II-26: Esfuerzo axial
- Figura N° II-27: Esfuerzo de flexión
- Figura N° II-28: Esfuerzo de corte
- Figura N° II-29: Deformación bajo carga de nieve
- Figura N° II-30: Comparativa esfuerzo Axial inicial y bajo carga externa de nieve
- Figura N° II-31: Tensión de la membrana
- Figura N° II-32: Comparativa de los esfuerzos de flexión iniciales y bajo carga de nieve

## Índice de Cuadros

- Cuadro N° II-1. Datos del ensayo de límite de rotura
- Cuadro N° II-2. Resultados del ensayo de límite de rotura
- Cuadro N° II-3 Aplicación de cargas para la deformación
- Cuadro N° II-4: Resultado geométrico del form finding simulado por computadora
- Cuadro N° II-5: Reacciones iniciales
- Cuadro N° II-6: Reacciones iniciales después del re-equilibrio de la estructura
- Cuadro N° II-7: Reacciones iniciales igual a 0
- Cuadro N° II-8: Propiedades mecánicas de la membrana
- Cuadro N° II-9: Resultado del pre-tensado de la membrana
- Cuadro N° II-10: Reacciones de la pretensión geométrica de la membrana, form finding
- Cuadro N° II-11: Estudio de la pretensión
- Cuadro N° II-12: Reacciones de la pretensión + preflexión
- Cuadro N° II-13: Estudio de la sección de las barras en la pre-flexión
- Cuadro N° II-14: Estudio de la sección de las barras en la pre-flexión
- Cuadro N° II-15: Estudio de la sección de las barras en la pre-flexión
- Cuadro N° II-16. Cálculo del radio de curvatura

## CAPÍTULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL

Cuadro Nº II-17: Comprobación del radio de curvatura de la malla  
 Cuadro Nº II-18: Resultado de la deflexión en la malla  
 Cuadro Nº II-19: Resultado de la deflexión en el arco a barlovento  
 Cuadro Nº II-20: Resultado de la deflexión en el arco lateral por succión  
 Cuadro Nº II-21: Resultado de la deflexión en el arco a sotavento por succión  
 Cuadro Nº II-22: Reacciones con una carga externa de viento  
 Cuadro Nº II-23: Resultado de la deflexión en la malla con carga de viento 45°  
 Cuadro Nº II-24: Resultado de la deflexión del arco lateral con carga de viento 45°  
 Cuadro Nº II-25: Resultado de la deformación del arco a sotavento con carga de viento 45°  
 Cuadro Nº II-26: Reacciones con carga externa de viento a 45°  
 Cuadro Nº II-27: Resultado de la deflexión en la malla por carga de nieve  
 Cuadro Nº II-28: Resultado de la deflexión en la malla por carga de nieve  
 Cuadro Nº II-29: Reacciones bajo carga de nieve

### **Incide de Tablas**

Tabla Nº II-1. Propiedades mecánicas de los plásticos compuestos  
 Tabla Nº II-2. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio  
 Tabla Nº II-3. Propiedades mecánicas de las resinas  
 Tabla Nº II-4. Propiedades mecánicas de los plásticos compuestos fabricados por NIOGLAS  
 Tabla Nº II-5. Comparativa de los módulos de elasticidad entre el acero y PRFV (KN/m<sup>2</sup>)  
 Tabla Nº II-6. Resultados ensayo límite de rotura  
 Tabla Nº II-7: Condición de los nudos  
 Tabla Nº II-8. Propiedades de la barra  
 Tabla Nº II-9: Flechas del arco de borde  
 Tabla Nº II-10: Sistema de ecuaciones de la tensión de la barra  
 Tabla Nº II-11: Discretización de las tensiones barra Nº 1 con  $q= 0.15$  KN  
 Tabla Nº II-12: Discretización de las tensiones barra Nº 4 con  $q= 0.15$  KN  
 Tabla Nº II-13: Discretización de las tensiones barra Nº 3 con  $q= 0.20$  KN  
 Tabla Nº II-14: Discretización de las tensiones barra Nº 3 con  $q= 0.30$  KN  
 Tabla Nº II-15: Discretización de las tensiones barra Nº 2 preflexión + pretensión  
 Tabla Nº II-16: Discretización de las tensiones barra Nº 3 preflexión + pretensión  
 Tabla Nº II-17: Discretización de las tensiones barra Nº 4 preflexión + pretensión  
 Tabla Nº II-18: Discretización de las tensiones barra Nº 10 preflexión + pretensión  
 Tabla Nº II-19: Comparativa de las tensiones combinadas totales máximas entre la pre-flexión + pretensión  
 Tabla Nº II-20: Ecuación de la carga crítica de Euler  
 Tabla Nº II-21: Tensión crítica de compresión  
 Tabla Nº II-22: Datos de los resultados de la comparación del radio de curvatura calculado y el obtenido experimentalmente  
 Tabla Nº II-23: Peso propio de las barras  
 Tabla Nº II-24: Peso propio de los nudos  
 Tabla Nº II-25: Peso propio de las bases  
 Tabla Nº II-26: Peso propio total de la estructura  
 Tabla Nº II-27: Datos de la normativa española AE-88  
 Tabla Nº II-28: Datos de la carga de viento a 90° del archivo LOADGEN del programa EASY®-TECHNET  
 Tabla Nº II-29: Discretización de las tensiones de las barras Nº 10 y 61  
 Tabla Nº II-30: Datos de la carga de viento a 45° del archivo LOADGEN del programa EASY®-TECHNET  
 Tabla Nº II-31: Discretización de las tensiones de las barras Nº 10 y 32  
 Tabla Nº II-32: Comparación de las tensiones máximas bajo cargas de viento.  
 Tabla Nº II-33: Sobre carga de nieve  
 Tabla Nº II-34: Comprobación de tensión crítica barras Nº 1 y 2  
 Tabla Nº II-35: Comprobación de tensión crítica barras Nº 66

## **CAPITULO 2 DESARROLLO TÉCNICO EXPERIMENTAL**

## **Índice de Gráficos**

- Gráfico N° II-1. Resultados del ensayo de límite de rotura
- Gráfico N° II-2. Comparación entre los esfuerzos iniciales de pre-flexión y pretensión
- Gráfico N° II-3. Esfuerzos máximos durante el proceso e erección de la estructura
- Gráfico N° II-4: Tensión ( $\text{KN/m}^2$ ) de la barra con una carga de 0.15 KN
- Gráfico N° II-5: Tensión ( $\text{KN/m}^2$ ) de la malla cuando  $q= 0.20 \text{ KN}$
- Gráfico N° II-6. Tensión ( $\text{KN/m}^2$ ) de la malla cuando  $q= 0.30 \text{ KN}$  (forma final)
- Gráfico N° II-7: Tensiones ( $\text{KN/ m}^2$ ) en arcos perimetrales de borde
- Gráfico N° II-8: Tensiones ( $\text{KN/ m}^2$ ) en la malla
- Gráfico N° II-9: Comprobación de la tensión en las barras críticas con carga externa de viento a  $90^\circ$
- Gráfico N° II-10: Comprobación de la tensión en las barras críticas con carga externa de viento a  $45^\circ$
- Gráfico N° II-11: Comprobación de la tensión en las barras críticas con carga externa de nieve