

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

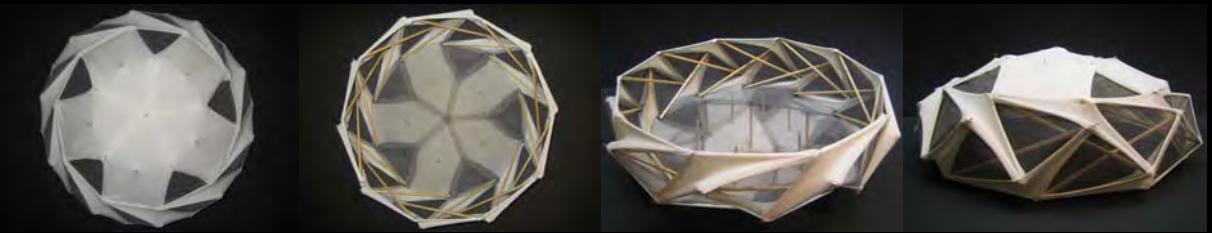
WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

**APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS DEL TENSEGRITY A
LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATIRANTADAS**

Fuller: "Islas pequeñas de compresión en un mar de tensión"

Universidad Politècnica de Catalunya
Doctorado: Construcción, Restauración
y Rehabilitación Arquitectónica
Doctorando: **Diana Maritza Peña**
Tutor: Dr. Josep Ignasi de Llorens
Codirector: Ramon Sastre





APLICACIÓN DE LOS PRINCIPIOS DEL **TENSEGRITY** A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATIRANTADAS

Tesis doctoral para obtener el título de doctor
otorgado por la Universidad Politécnica de Cataluña
al arquitecto **Diana Maritza Peña Villamil**
bajo la tutoría del Dr. Josep Ignasi de Llorens
y del Dr. Ramon Sastre



Doctorado en **Construcción, Restauración y Rehabilitación Arquitectónica**
Departamento de **Construcciones Arquitectónicas I**
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Barcelona, Febrero de **2012**

Agradecimientos

....A toda mi familia por su amor y apoyo, en especial a mis padres **Fidelia y Joaquín** que con su humildad y sencillez me han enseñado que se pueden llegar a hacer grandes cosas.

....A mi compañero **Darren** por su amor y total asistencia con el inglés.

....Doy mi particular agradecimiento a **Josep Ignasi Llorens** mi tutor y apoyo en la UPC, a **Ramon Sastre** por su colaboración en todo momento y su generosidad para usar su software, a **Daniel Crespo** y **Joshua Martinez** por su trabajo y colaboración en la prueba del túnel de viento.

....a mis amigos de Colombia y Barcelona.

.....y a **Dios** por estar allí siempre

“Es pues la fe la certeza de lo que se espera, la convicción de lo que no se ve”

ABSTRACT

The purpose of this document is to study **the application of Tensegrity principles on tensile textile constructions**. This work studies the basic concept of Tensegrity unit, its classification according a previous researcher (Anthony Pugh) and the author's contribution, focused on new generations of forms. Through the geometry and computer software, another typology and a constructive simple method is developed, bearing in mind, some aspects as important as system pretension to find its balance.

Keywords: *tensegrity unit, formfinding, continuous membrane pattern, diamond pattern, single layer, double layer, constructive method, pretension.*

TENSEGRITY DESIGN AND MODELING

The following tensegrity models were obtained through intuitive and experimental methods during the development of this thesis. We demonstrated the importance of physical models in studying spatial structures. Almost 70 scale models were built using bars, tendons, and membranes of various materials. Bars of various diameters and lengths were made from balsa wood and plastic. Tendons were made from thread or elastic bands, each with differing qualities and stiffness. Membranes were made from latex, plastic mesh and lycra. Formfinding was based on the geometry of Archimedean and Platonic (polyhedra) solids, which resulted in new forms that have been classified and proposed for architectural use.

ANALYSIS USING SOFTWARE - AutoCAD and WinTess

An electronic version of the proposed model was created using AutoCAD software and then tested using WinTess software. During structural analysis testing, the model was tested against its own weight and against that of external wind and snow loads. As a result, we were able to obtain the equilibrium of the tensegrity structure.

ARCHITECTURAL APPLICATION - Sports Arena

Based on results of the formfinding, geometry, and the use of software, we propose a new tensegrity ring with a central cable dome system can be used architecturally as a sports arena. This idea is the principal objective of this doctoral thesis "The Application of Tensegrity Principles on Tensile-Textile Constructions".

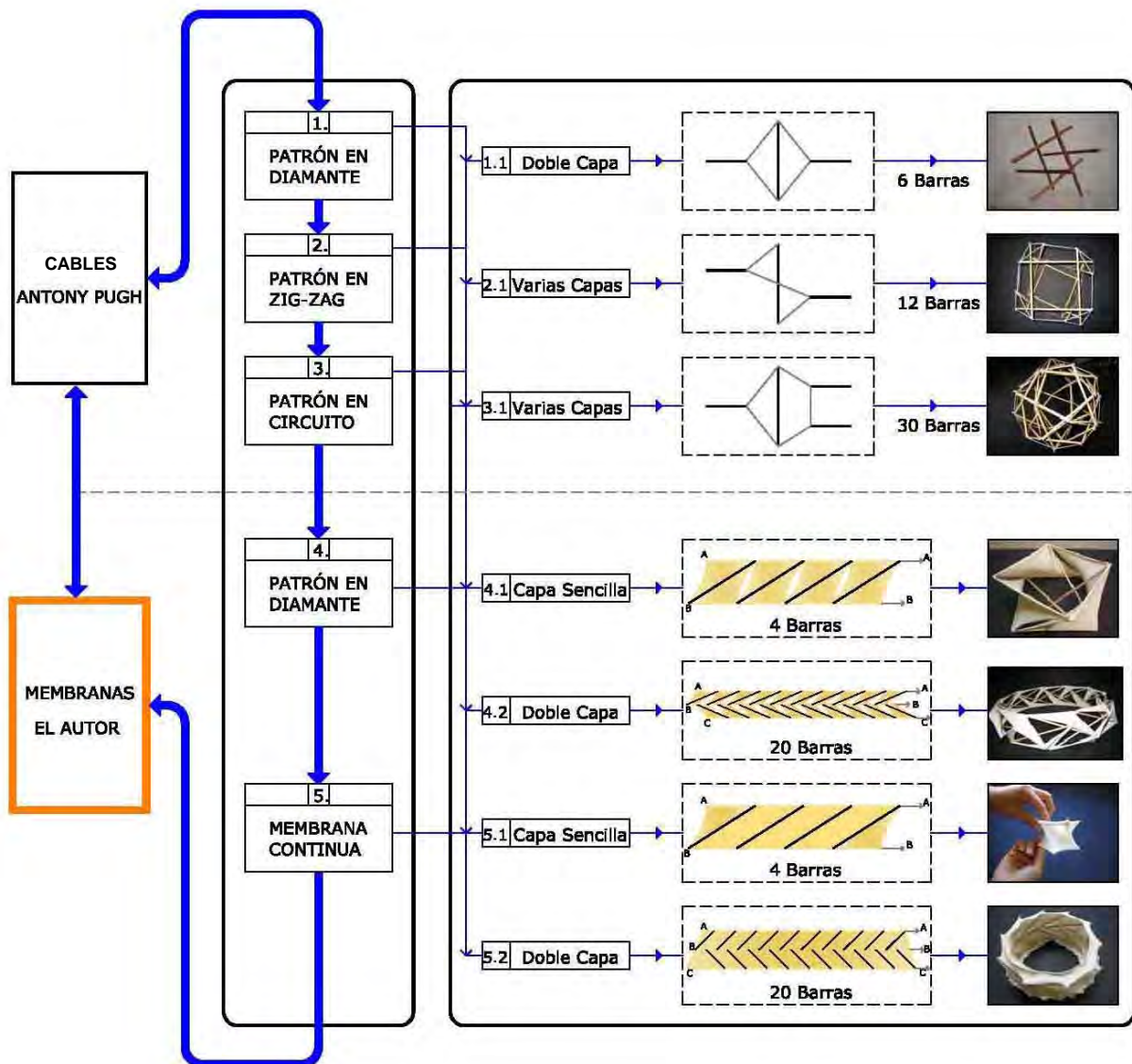
RESUMEN

El propósito de esta tesis es el estudio de la **aplicación de los principios del Tensegrity a las construcciones textiles atirantadas**. El estudio del concepto básico de la unidad Tensegrity, sus clasificaciones según investigadores anteriores (Anthony Pugh) y el aporte personal de nuevas generaciones de forma por medio de la geometría y programas informáticos, otra tipología y un método constructivo sencillo de realizar teniendo en cuenta aspectos tan importantes como la pretensión del sistema para buscar el equilibrio del mismo.

Palabras clave

Unidad Tensegrity
Obtención de la forma
Patrón en membrana continua
Patrón en diamante
Capa sencilla
Doble capa
Método constructivo
Pretensión

ESQUEMA



Esquema comparativo entre Anthony Pugh & la propuesta del autor.

CONCEPCIÓN Y MODELIZACIÓN DEL TENSEGRITY

En el desarrollo de esta tesis se proponen los siguientes modelos tensegrity obtenidos por medio de un **método intuitivo y experimental**. Comprobamos el importante poder de los modelos físicos de estudio en las estructuras espaciales.

Se construyeron casi 70 modelos a escala a partir del uso de barras, tendones y membranas en diferentes materiales. **Barras** en madera de balsa y plástico con diferentes secciones de diámetro y longitudes. **Tendones** en hilos y gomas de diferentes calidades y resistencias. **Membranas** en látex, malla plástica y lycra.

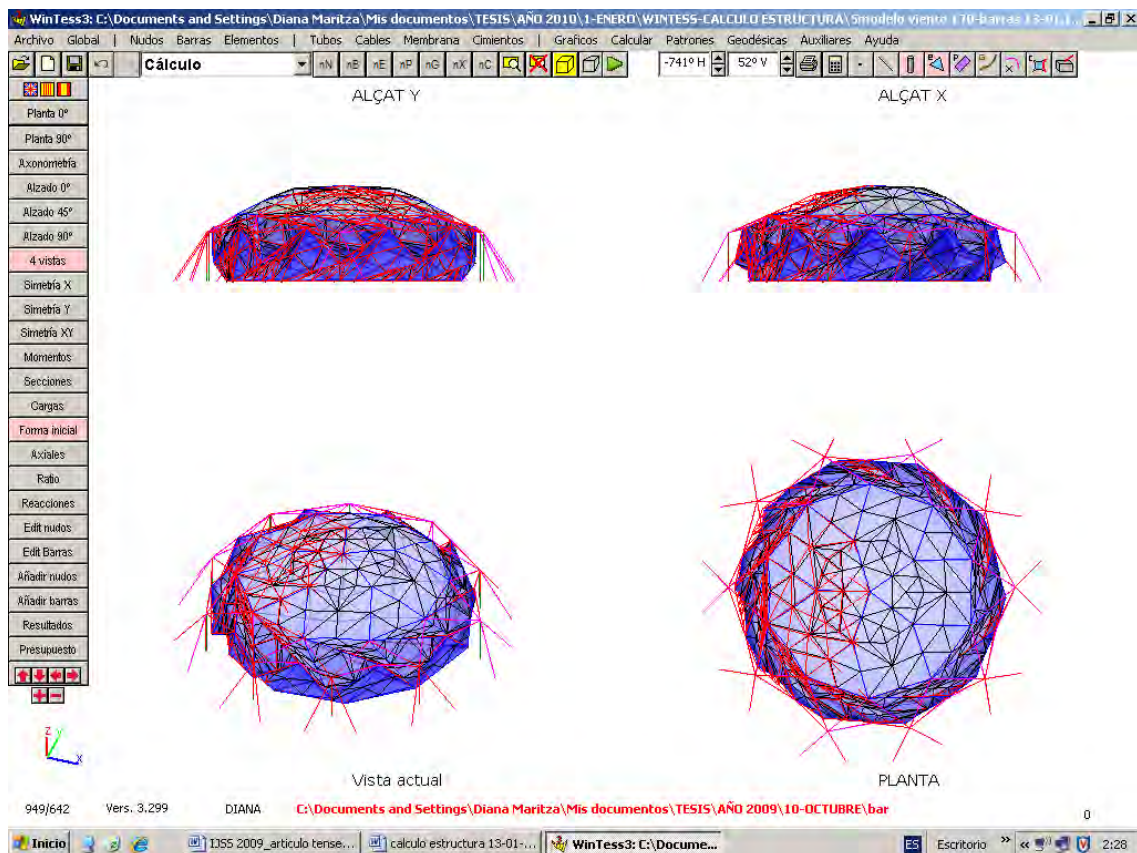
La obtención de la forma se generó a partir de la **geometría**, basada en los sólidos de Arquímedes y Platón (poliedros), dando como resultado nuevas formas que se clasifican y proponen para un uso arquitectónico.



ANÁLISIS INFORMÁTICO

Autocad y WinTess

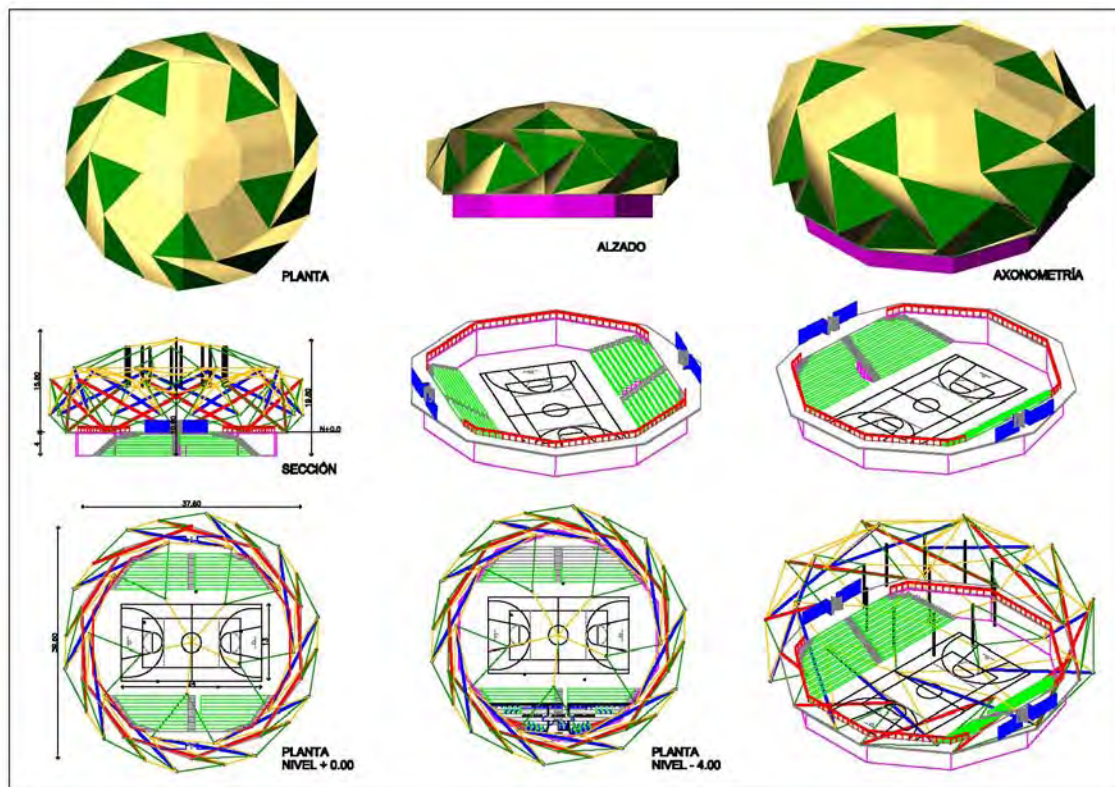
Para la comprobación estructural del modelo propuesto, se utilizan los programas informáticos: Autocad como herramienta de dibujo y **WinTess** como herramienta de cálculo (software desarrollado por Ramon Sastre). En el análisis estructural el modelo se prueba ante su propio peso, pretensado y ante cargas externas de viento y nieve y como resultado obtenemos el equilibrio de la estructura en tensegrity.



APLICACIÓN ARQUITECTÓNICA

Polideportivo

Como resultado final de la obtención de la forma, a partir de la geometría y el uso de programas informáticos como Autocad y WinTess, se propone un modelo en textiles atirantados con un sistema de anillo y domo en **tensegrity** cuya aplicación arquitectónica puede ser un polideportivo. Lo cual es el objetivo principal de estudio de esta tesis doctoral “la aplicación de los principios del tensegrity a las construcciones textiles atirantadas”.



CONTENIDO

Resumen.....	IV
Introducción.....	XIV
Planteamiento del problema.....	XVI
Objetivos.....	XVII
Metodología.....	XIX
Definición y Antecedentes Cap. 1.....	1
Definición de tensegrity 1.1.....	1
Antecedentes 1.2.....	3
Pioneros 1.2.1.....	3
Otros Investigadores 1.2.2.....	7
Tipología 1.3.....	13
Tensegrity abierto 1.3.1.....	13
Tensegrity cerrado 1.3.2.....	14
Cúpulas geodésicas 1.3.2.1.....	15
Cable dome 1.3.2.2.....	17
Conclusiones del capítulo 1.4.....	22
Referencias bibliográficas 1.5.....	23
Obtención de la Forma Cap.2.....	26
Geometría 2.1.....	27
Modelos Físicos 2.2.....	30
Tipología según Anthony Pugh 2.2.1.....	31
Patrones con tensores: Patrón en diamante A.....	31
Patrón en zig-zag B.....	34
Patrón en circuito C.....	35
Tipología propuesta 2.2.2.....	36
Patrón en diamante con membrana y barras en capa sencilla-Tipología 1.....	39

Patrón en membrana continua con barras en capa sencilla - Tipología 2.....	41
Patrón en membrana continua con 20 barras en doble capa - Tipología 3.....	43
Patrón en diamante con membrana y malla - Tipología 4.....	45
con 20 barras en doble capa.	
Modelos Informáticos 2.3.....	51
Autocad y Wintess 2.3.1.....	51
Conclusiones del capítulo 2.4.....	65
Referencias bibliográficas 2.5.....	66
Análisis Estructural Cap.3.....	68
Modelos Seleccionados 3.1.....	69
Parámetros de estudio 3.2.....	74
Definición de la estructura - Geometría 3.2.1.....	74
Nudos A.....	74
Barras B.....	74
Membrana C.....	89
Valores de las cargas. ¿Dónde están aplicadas? 3.2.2.....	91
Pretensión A.....	96
Peso propio B.....	100
Viento y nieve C.....	122
Resultados finales D.....	149
Conclusiones del capítulo 3.3.....	157
Referencias bibliográficas 3.4.....	160
Aplicación Arquitectónica Cap.4.....	162
Aplicación 4.1.....	164
Polideportivo 4.1.1.....	165
Dimensiones de pistas y salas deportivas 4.1.2.....	167

Planos de la propuesta 4.1.3.....	174
Conclusiones del capítulo 4.2.....	175
Referencias bibliográficas 4.3.....	176
Conclusiones Cap.5.....	178
Razón de ser de esta tesis 5.1.....	179
Conclusiones relevantes 5.2.....	181
Reflexiones personales 5.3.....	183
Investigación a futuro 5.4.....	184
Bibliografía.....	188
Anexo.....	200
Poliedros Anexo 1.....	201
Apéndices.....	214
Modelos - Apéndice A.....	215
Obtención de la forma por modelos físicos A.1.....	215
Obtención de la forma por modelos informáticos A.2.....	226
WinTess - Apéndice B.....	233
Túnel de viento - Apéndice C.....	254
Ventilador mecánico - Apéndice D.....	271

INTRODUCCIÓN

Si por mucho tiempo las estructuras firmes, compactas y estáticas dominaron la arquitectura tradicional, hoy día los nuevos paradigmas señalan conceptos relacionados con una construcción más versátil, empleo de materiales livianos, adaptables, desarmables y susceptibles de ocupar menos espacio e incluso de transportarse de un lugar a otro.

Las redes de cables y las construcciones textiles atirantadas son uno de los elementos constructivos más económicos para cubrir grandes superficies. Su ligereza reduce notablemente el peso propio de la construcción, aventajando al resto de los sistemas constructivos para cubrir grandes luces. La necesidad de cubrir grandes espacios libres de soportes interiores ha provocado un desarrollo bastante espectacular de estas cubiertas, lo que hace que continúen las investigaciones al respecto, con lo cual las estructuras Tensegrity son una opción a esta necesidad.

Este estudio pretende contribuir de manera particular a la aplicación del Tensegrity en espacios arquitectónicos, en este caso deportivos por medio de la propuesta de *generar un anillo exterior en Tensegrity con un domo central, libre de cualquier soporte interior, por medio de la generación de la forma de una membrana en patrón de diamante, con barras discontinuas en doble capa que se equilibran por la pretensión de la membrana.*

La contribución clave de este prototipo en el campo de las estructuras ligeras es que es la primera vez que un anillo tensegrity ha sido utilizado en lugar de un anillo de compresión, para generar un domo completamente en tensegrity.

En los ejemplos que veremos más adelante se observa como los tensores de los Tensegritis tradicionales son reemplazados directamente por membranas siendo el aporte de este estudio, la generación de la forma por geometría y el método constructivo de los diferentes prototipos con la ayuda de programas informáticos como el Autocad y el WinTess con el cuál además hacemos la comprobación estructural del sistema que esté en equilibrio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA I.

El interés personal por abordar el tema del tensegrity dentro de las construcciones textiles atirantadas, tiene como precedente las asignaturas cursadas en el período de docencia y de investigación relacionadas con las **nuevas tecnologías** y **construcciones ligeras**, en el doctorado en construcción de la UPC.

Dentro del desarrollo del proyecto de investigación tutelado, realicé prácticas de cálculo de estructuras ligeras, específicamente en construcciones textiles atirantadas bajo la tutela de Josep Ignasi Llorens y Ramon Sastre.

A nivel profesional tuve la oportunidad de conocer al ingeniero colombiano Gerardo Castro, quien participó en la realización del Georgia Dome de Atlanta, que con sus investigaciones me animó a interesarme en este tema.

Estos conocimientos me dieron la base para iniciar el estudio de estas estructuras portantes tan complejas. Planteándome las siguientes incógnitas o hipótesis:

- ¿Es posible la **aplicación de los principios del tensegrity a las construcciones textiles atirantadas**?
- ¿Qué es el tensegrity, cuales son sus principios, cómo funciona, qué clase de estructura es, se entiende el comportamiento del sistema?
- ¿Qué prestaciones tiene el tensegrity desde el punto de vista morfológico, estructural y constructivo dentro de las construcciones textiles atirantadas?
- ¿Que opciones de métodos de obtención de formas tiene el tensegrity?
- ¿Cuál es el comportamiento estructural y de rigidez del sistema; su desarrollo tecnológico en el proceso de pretensionamiento y búsqueda del equilibrio del mismo?
- ¿Qué posibilidades de aplicación tiene el sistema dentro de las construcciones textiles atirantadas?
 - ¿Podemos utilizar las membranas tensadas en el tensegrity?
 - ¿Cuál será el comportamiento de la membrana dentro del sistema?
 - ¿Se puede pensar en una aplicación arquitectónica del tensegrity?

OBJETIVOS II.

OBJETIVOS GENERALES

El objetivo principal de esta tesis doctoral es abordar el tema del tensegrity dentro de las construcciones textiles atirantadas.

Revisar los estudios previos realizados por otros profesionales e investigadores dentro del campo de las estructuras tensegrity.

Definir los principios del tensegrity y aplicarlos a las estructuras ligeras específicamente a las construcciones textiles atirandadas.

Ver las posibilidades del tensegrity desde un punto de vista **morfológico, estructural** y **constructivo** basado en los principios básicos de estas estructuras.

Profundizar en el conocimiento estructural de estos sistemas tan complejos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Morfológicos

Crear modelos a escala para entender los principios del tensegrity.

Reemplazar los tendones o cables usados en los tensegrity tradicionales por superficies tensadas, representadas por las membranas textiles, que será la propuesta a desarrollar en este documento.

Desarrollar un proceso de obtención de la forma basado en la geometría, básicamente en los sólidos de Arquímedes y de Platón.

Proponer una nueva tipología de tensegrity usando las membranas tensadas.

Buscar una solución arquitectónica basada en la premisa de función y forma, para proponer un diseño como aplicación del tensegrity a una cubierta de grandes luces, para superficies libres de cualquier soporte interior.

Estructurales

Desarrollar un sistema estructural teniendo en cuenta componentes ligeros, cables, barras y membranas.

Definir las características estructurales de los elementos que componen el sistema (barras elementos que trabajan a compresión y cables o tendones elementos que trabajan a tracción).

Entender y desarrollar el comportamiento estructural de estas estructuras teniendo en cuenta la tensión de la membrana y el uso de los domos en redes de cables (cable dome).

Analizar las condiciones de estabilidad, pretensión y distribución de cargas de los cables y membranas del sistema.

Analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de cargas (ante su propio peso y ante cargas externas).

Realizar pruebas de laboratorio del modelo obtenido. El modelo se probará ante el túnel de viento y ventilador mecánico para observar su comportamiento ante cargas externas.

Constructivos

Considerar los materiales de los elementos del sistema, a usar en los diferentes prototipos, su composición y características físicas.

Teniendo en cuenta las características morfológicas y estructurales del sistema, se plantea un proceso constructivo de los prototipos.

A futuro

Se propondrá la realización de un prototipo real buscando financiación de la UPC y de entidades de investigación y privadas interesadas en el tema de estudio.

Estudio, definición y realización de los detalles constructivos del modelo.

Con el fin de potenciar la aplicación y construcción de estos sistemas, se plantea un sistema de corta ejecución, de rápido y fácil montaje.

Lo anterior se ve reflejado en reducción de costes gracias al ajuste de los tiempos de ejecución y además que tenga un impacto mínimo sobre los recursos naturales.

METODOLOGÍA III.

La metodología de esta investigación tiene una orientación tecnológica apoyada en actividades **documentales** y **experimentales**.

Actividades Documentales

La parte documental se desarrolla partiendo del estado del arte del tema a desarrollar *“la aplicación de los principios del tensegrity en las construcciones textiles atirantadas”*.

1. Para elaborar este apartado se estudiaron los antecedentes y proyectos realizados por otros investigadores hasta el día de hoy.
2. Se abordaron fuentes de estudio como son:
 - a. Tesis doctorales
 - b. Buscadores de webs de tesis a nivel de España (TDX, TBC, TESEO y UNED) y a nivel internacional (NDLTD, UMI y SIGLE).
 - c. Bases de datos
 - d. Páginas webs
 - e. Exposiciones
 - f. Bibliografía relacionada con el tema de las estructuras ligeras, del tensegrity y de las construcciones textiles atirantadas.
 - g. Bibliotecas:
 - Universidad Politécnica de Catalunya en Barcelona, San Cugat y Girona.
 - Escuela de Ingenieros Civiles de Montpellier – Francia.
 - Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart ILEK – Alemania.
 - Universidad Técnica de Berlín.
 - Escuela de Arquitectura de Sevilla.
 - Universidad Nacional de Colombia.
 - Universidad Javeriana de Colombia.

Artículos de revistas técnicas y científicas como lo son de: **h.**
 La IASS journal of the international association for shell and spatial structures.
 La IJSS International journal of solids and structures - Elsevier.
 La IJSS International journal of space structures.

Congresos internacionales **i.**
 Barcelona 2003, 2007, 2011 Structural membranes, Cimne
 (UPC) y Universidad de Stuttgart.
 Berlín 2004, Textile roofs, Technical University in Berlin.
 Montpellier 2004, IASS Shell and spatial structures from
 models to realization, Universidad de Montpellier.
 Caracas 2005, 2nd Latin American Symposium,
 Universidad Central de Venezuela.
 Stuttgart 2005 y 2009, Structural membranes, Cimne (UPC)
 y Universidad de Stuttgart.
 Barcelona 2009, Workshop continuum architectural & desing
 UPC Sant Cugat del Valles.
 Valencia 2009, IASS Evolution and trends in design, analysis and
 construction of shell and spatial structures.
 Shanghai 2010, IASS Spatial structures, temporary and permanent.
 Como-Italia 2011, SEWC Structural Engineers World Congress.

Actividades Experimentales

La parte **experimental** se basa en un método intuitivo y práctico.
 De prueba y error, en el desarrollo morfológico de los diferentes modelos a escala
 construidos.

La obtención de la forma se genera a partir de la geometría, además utilizando
 diferentes materiales y dimensiones de los elementos que componen los modelos
 físicos; todo esto bajo el seguimiento de Josep Ignasi Llorens.

La comprobación estructural de los modelos se lleva a cabo con ayudas
 informáticas que tienen un valor reconocido a nivel científico, como es el software
 WinTess desarrollado por Ramón Sastre.

Las pruebas de laboratorio como lo son: los coeficientes de presión hallados con el
 túnel de viento y el comportamiento físico del modelo ante el viento, se han
 realizado en laboratorios de la Universidad Politécnica de Cataluña de
 Castelldefels; bajo la dirección de los profesores Daniel Crespo y Joshua Martínez.

CAPÍTULO 1. **DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES**

DEFINICIÓN DE TENSEGRITY	1.1
ANTECEDENTES	1.2
PIONEROS	1.2.1
OTROS INVESTIGADORES	1.2.2
TIPOLOGÍA	1.3
TENSEGRITY ABIERTO	1.3.1
TENSEGRITY CERRADO	1.3.2
CÚPULAS GEODÉSICAS	1.3.2.1
CABLE DOME	1.3.2.2
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	1.4
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1.5

DEFINICIÓN DE TENSEGRITY 1.1

El tensegrity es una estructura ligera, compleja morfológica, estructural y constructivamente hablando, como lo veremos en el desarrollo de este documento.

Su geometría es definida por el **equilibrio** de fuerzas de **tensión** y **compresión**. Se caracteriza por tener barras discontinuas a compresión equilibradas por cables tensados, articulados en red. Cada nodo recibe al menos una barra (miembro a compresión) y 3 cables (miembros a tensión) los miembros tensionados pretensan de forma continua los miembros a compresión.

El balance se logra sólo gracias a que todas las fuerzas de compresión y de tensión están perfectamente distribuidas, es decir, funcionando de forma conjunta. El Tensegrity describe el principio de las relaciones estructurales, donde la forma estructural está garantizada porque finítamente se encuentra cerrado y auto equilibrado, es estable por sí mismo.

Desde el punto de vista estructural el tensegrity ha demostrado algunas características similares a todas las estructuras pretensadas, tales como vigas de cables, redes de cables y membranas estructurales.



Figura 1. Puente vernáculo (barras y cables).

Su origen procede de la contracción de dos palabras tensión e integridad “integridad tensional” fue Buckminster Fuller quien acuñó la palabra y patentó por primera vez el concepto de la estructura.

“Pequeñas islas de compresión en un mar de tensiones” Fuller [1]

“El tensegrity describe un sistema estructural cerrado compuesto por un conjunto de tres o más barras comprimidas dentro de una red de tendones atirantados, estando ambas partes mutuamente combinadas de tal suerte que las barras no se tocan entre sí pero empujan de dentro hacia fuera contra los nudos de dicha red atirantada para así formar una firme, triangulada y pretensada unidad de tensión y compresión”
Snelson [2]

“Las estructuras auto-tensadas constan de barras y de tirantes ensamblados de tal modo que las barras quedan aisladas en un continuo de tirantes. Todos estos elementos son rígidamente apartados y al mismo tiempo solidarizados por el pretensado, obtenido por la tensión interna de los tirantes sin necesidad de apoyos y de anclajes exteriores. El conjunto se mantiene sólidamente todo como una estructura autoportante”
Emmerich [3]

“Un sistema tensegrity se establece cuando un conjunto discontinuo de componentes sometidos a compresión interactúa con un conjunto continuo de elementos sometidos a tracción definiendo un volumen estable en el espacio” Pugh [4]

“Entramados articulados estables por sí mismos y pretensados internamente en las cuales sus cables o tendones están tensados contra un sistema de barras o montantes”
Hanaor [5]

“Los sistemas tensegrity son sistemas espaciales reticulados en un estado de auto-tensión. Todos sus elementos constan de una fibra recta y son de tamaños análogos. Los elementos en tracción no tienen rigidez a compresión y constituyen un conjunto continuo. Los elementos en compresión constituyen un conjunto discontinuo. Cada nudo o vértice recibe uno y sólo un elemento comprimido. Un sistema tensegrity es un sistema que está en equilibrio, es estable por sí mismo y comprende un conjunto discontinuo de componentes comprimidos dentro de un conjunto continuo de componentes atirantados” Motro [6]

“Los sistemas tensegrity son entramados articulados, estables por sí mismos, formados por cables en los cuales dicho sistema de cables conectados entre sí están traccionados debido a la acción ejercida por un sistema discontinuo de barras; por extensión, también es así denominado cualquier entramado articulado, estable por sí mismo, compuesto por un conjunto de unidades que satisfagan la citada definición”
Bin-Bing Wang [7]

ANTECEDENTES 1.2

PIONEROS 1.2.1

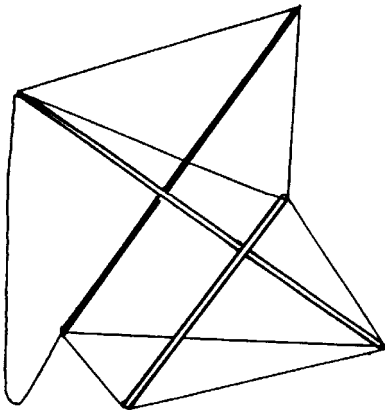


Figura 2.
 Escultura de lóganson
 Estudio del equilibrio

“Los primeros ejemplos denominados estructuras Tensegrity fueron hechos por un artista ruso, **Karl lóganson**, presentados en la Exhibición de Obmokhu – Rusia, en 1921. lóganson fue miembro fundador del “First Working Group of Constructivists” [8] y participó en foros y discusiones sobre sustituir la composición con la construcción; artista progresista, orientado a la tecnología y a la ingeniería.

En 1921 escribió: “de pintar a la escultura, de la escultura a la construcción, de la construcción a la tecnología y a la invención, éste es mi camino elegido y será seguramente la última meta de cada artista revolucionario”. En 1920, en su estudio del equilibrio, ahora perdido y sólo conocido por fotos y descripciones, loganson equilibra tres postes inclinados, que no se tocan y trabajan a compresión con una cuerda continua tensando los postes de vértice a vértice. (Fig.2)

Como **László Moholy-Nagy** [9] más tarde explicara: “tirando de la cuerda puede cambiar la posición de los postes aunque la estructura permanezca en equilibrio”. Christina Lodder, erudita del período, especuló que los deseos de lóganson de integrar su arte con las metas de la revolución; se ven en sus esculturas que tendrían una imprescindible utilidad y serían modelos de estructuras utilitarias y portátiles, quioscos plegables, artículos desplegados de mobiliario, etc.

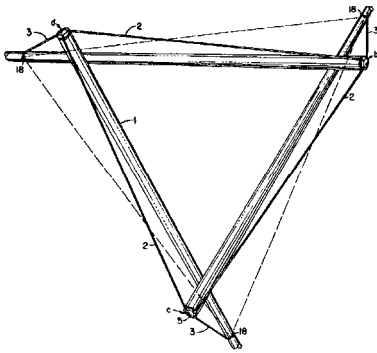


Figura 3.
 Unidad básica de Tensegrity
 Buckminster Fuller

Desafortunadamente la idea de lóganson no fue reconocida en Rusia y por tanto se dice que las estructuras Tensegrity fueron inventadas por el escultor **Kenneth Snelson** en 1948, durante un semestre de estudio con **Buckminster Fuller**.

Fuller, inventor, inmediatamente vio el potencial de la idea de Snelson, le dio el nombre de Tensegrity, lo mejoró, lo hizo conocer, luego de su aceptación, patentó su versión en 1962. (Fig.3)

Aunque la idea fascinaba a arquitectos e ingenieros de la época, una escultura fue la primera estructura Tensegrity exhibida en el Museo de Arte Moderno en 1959 y aunque Snelson ganó gran reputación por haberla construido, la duda persistía sobre que la estructura Tensegrity no era práctica para grandes estructuras permanentes.

Las esculturas de Snelson tienen una gran variedad de formas y sensaciones, algunas están ordenadas simétrica y frontalmente, otras vuelan en espiral a través del espacio de manera imprevisible, elegantes torres aguja tan altas, de 28 m. Además con un crecimiento descontrolado en altura u horizontalmente con componentes enormes. Asombrosamente, la variedad resulta de la maestría de solamente algunas penetraciones geométricas básicas; descritas en la patente 3.169.611 de Snelson, puesta en marcha en 1960 y concedida en febrero de 1965. (Fig.4)

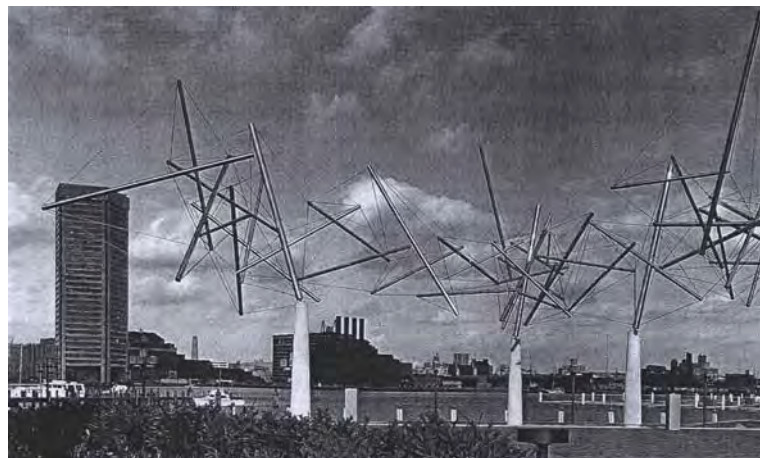


Figura 4. Escultura de Kenneth Snelson –Baltimore 1977

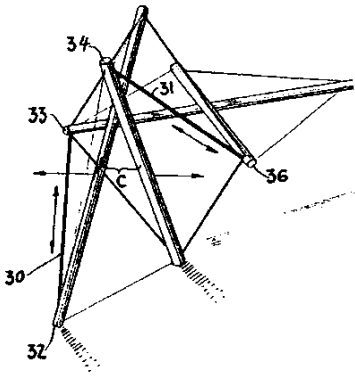


Figura 5.
Unidad Tensegrity de
Kenneth Snelson

En la patente, la primera unidad del Tensegrity de Snelson es una cometa simple en forma de diamante: dos barras se cruzan en el centro, con las cuerdas de la tensión alrededor de los cuatro puntos finales. Tal cometa es absolutamente fuerte en un plano, pero es inestable en la tercera dimensión (cuando está parado de borde). Dos unidades de éstas llegan a ser estables cuando están intersecadas. (Fig.5)

Posterior a esto, Fuller demostró con su patente como usar el Tensegrity para construir un domo de capa sencilla, la primera aplicación del Tensegrity a la arquitectura. Tres barras son conectadas por seis cables de modo que los extremos de las barras no se intersectan, creando el Tensegrity. (Fig.6)

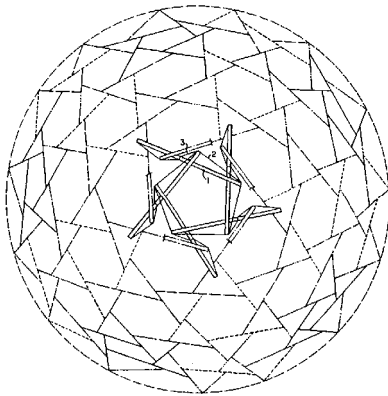


Figura 6.
Primera aplicación
Tensegrity a un domo de
capa sencilla - Fuller

El ingeniero polaco Waclaw Zalewski [10], desacreditado inventor de algunas innovaciones estructurales, más tarde se hizo famoso por otras que tuvieron buena fortuna por construirse. Diseñador y constructor entre 1960 a 1962 del primer Domo Tensegrity para un espacio deportivo de 12.000 sillas en Katowice. Zalewski comienza el domo antes que Fuller presentara su patente de domo en aspersión y lo termina antes de que la patente de Fuller fuera concedida. Esto fue veintiséis años atrás antes del primer domo Tensegrity de David Geiger. Lo que significa que fue el primer domo construido; el techo de Katowice cubre un área de 12.800 m² aproximadamente. (Fig.7)

Figura 7.
Pabellón deportivo en
Katowice - Polonia de
Waclaw Zalewski



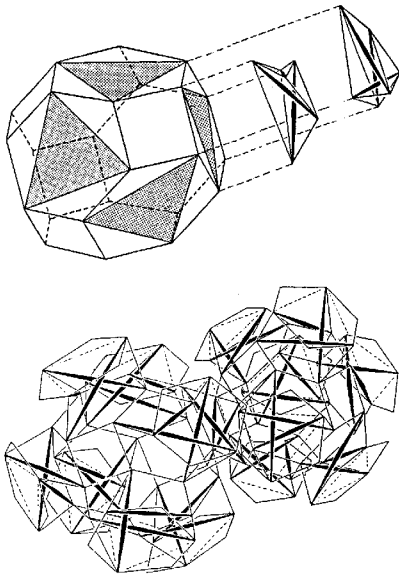


Figura 8.
 Unidades Apiladas
 David Emmerich

En 1964, con una patente francesa, David George Emmerich de la Escuela Nacional Superior de Bellas Artes, fue el pionero en el uso de los antiprismas Tensegrity para crear capas dobles o multicapas de redes de Tensegrity. Un antiprisma triangular es un prisma cuyos dos extremos triangulares están rotados uno con respecto del otro, luego los lados dejan de ser planos rectangulares, pero doblados crean dos caras triangulares donde antes había una sola cara rectangular. Emmerich también es importante por su estudio de mínima longitud de las barras. (Fig.8,9)

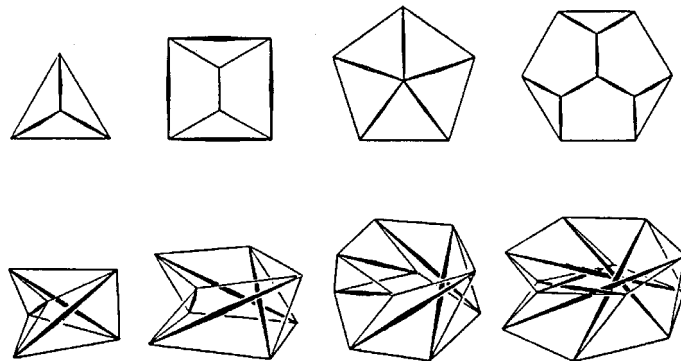


Figura 9. Unidades Antiprismas Tensegrity – David Emmerich.

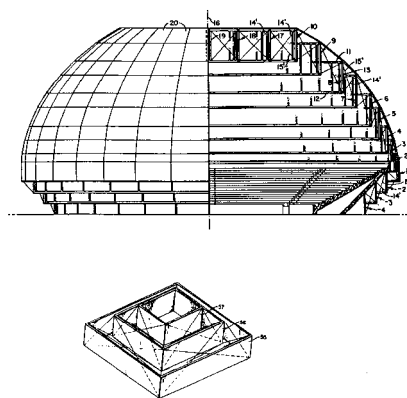


Figura 10.
 Domo en "aspension" de
 Fuller

Simultaneo a Emmerich, en 1964 Fuller patentó su sistema de domo de "aspension" [11], denominado así por la estructura suspendida ascendentemente, en la cual los aros internos se cuelgan de postes erigidos en los aros externos. Es decir, un aro se cuelga de los cables unidos a las paredes superiores de la estructura. En el aro, se erigen los postes y de estos postes cuelgan más cables que apoyan un aro interno más pequeño, otra vez con los postes unidos. Con todo un tercer aro se erige de este modo, para definir una bóveda relativamente plana, consistiendo sobre todo en la tensión cablegráfica. Aunque Fuller es silencioso con respecto a la capa final de la cubierta, es obvio que podría ser una membrana ligera, translúcida, hermética, milagrosamente sostenida de manera rígida, por apenas algunos puntales, ninguno de los cuales alcanzan a la tierra, lo que quiere decir que están suspendidos en el aire. (Fig.10)

OTROS INVESTIGADORES 1.2.2

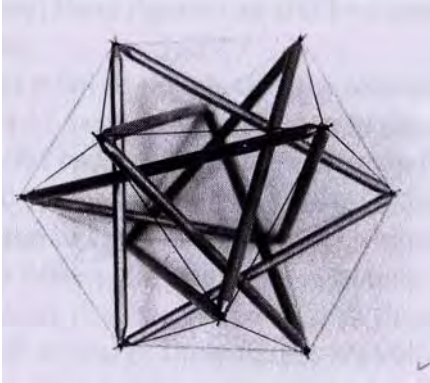


Figura 11.
Tensegrity - Anthony Pugh

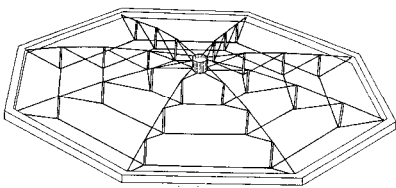


Figura 12.
Cable Dome - David Geiger

Figura 13.
Pabellón Deportivo
De Seúl

En 1976, **Anthony Pugh** de la universidad de California (Berkeley), redactó su libro "Introducción al Tensegrity", que resulta realmente ejemplar por la variedad de modelos que muestra y describe, así como por su estricta clasificación de la tipología existente. Lo cual sirve de base para la realización de esta tesis. (Fig.11)

Desde la invención de las estructuras Tensegrity hace 50 años atrás, abordar el tema del equilibrio de estas estructuras sigue siendo una tarea sin resolver, excepto por el desarrollo de los "cable domes" como los llamó Geiger, que completan su equilibrio por el anillo externo de compresión. (Fig.12)

Fuller perdió la oportunidad de ver su idea realizada (domos triangulados), tan solo por cinco años, ya que Geiger completó cuatro de estos domos Tensegrity en unos pocos años, entre el comienzo de la construcción de los Juegos Olímpicos de Seúl en 1988 y su muerte en octubre de 1989. Para Geiger el Tensegrity fue un camino para soportar techos en textiles sin el costoso sistema mecánico de inflar estructuras neumáticas y sin los peligros de la pérdida de aire, o el soporte de las cargas excesivas de nieve, se comprobó que estas estructuras eran muy resistentes comparadas con su peso. Según la normativa de Illinois, estas estructuras soportan diez veces más de lo establecido en el código. (Fig.13)



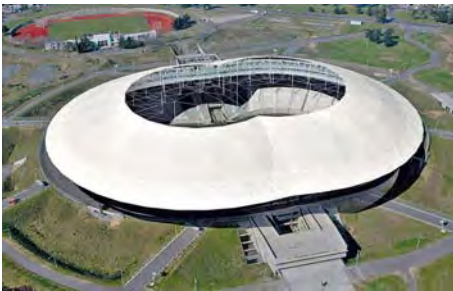


Figura 14. Estadio de la Plata Argentina Weidlinger Associates.

Los domos de Geiger no son triangulados como Fuller proponía, al respecto afirmó: “Observamos que la triangulación no es una parte necesaria de la estructura de cables, agrega una redundancia y al tensar crea problemas innecesarios”. De hecho bajo algunas condiciones de carga, la triangulación concentra la carga en algunos cables, mientras que sin ésta la membrana puede realizar su trabajo y puede separar las cargas en una amplia área.

Contrario a esto, en Atlanta con el Georgia Dome (Fig.15), Maththys Levy [12] y sus colaboradores en Weidlinger Associates, retornan a la idea de triangulación de Fuller. Con 34.800 m² el Georgia dome y el Estadio de la Plata en Argentina (Fig.14) con un área de 36.800 m², son las cubiertas más grandes que se hayan construido hasta ahora con el concepto de Tensegrity.

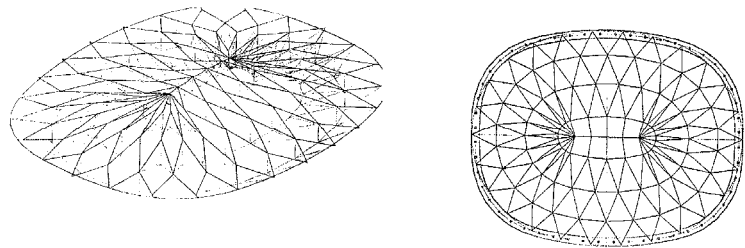
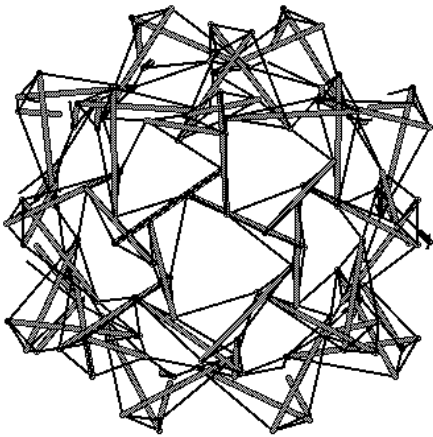


Figura 15. Georgia Dome Weidlinger Associates.



Figura 16. Velódromo en Francia 2002

Hasta ahora se han construido por lo menos 8 domos Tensegrity (Fig.16) y su desarrollo continúa madurándose, aspectos como el equilibrio del sistema por su forma geométrica y método constructivo y de pretensionamiento aún siguen siendo puntos quebrantables en estas estructuras. A pesar de ello gran variedad de formas y de usos de estos sistemas Tensegrity comienzan a ser parte de la actual tradición arquitectónica, al lado de las primeras ideas de lóganson y Snelson, quienes no imaginaban hasta donde llegarían sus inventos.



Similar a los requisitos necesarios de las membranas estructurales, son los requisitos del Tensegrity, la relación entre la geometría, el método constructivo y de pretensionamiento de estas estructuras. La resistencia de la estructura se puede analizar hoy usando la simulación por ordenador, pero se necesita investigar aún más para conseguir experiencia en diseño estructural, ver el comportamiento de las cargas y definir un método constructivo del sistema Tensegrity.

Robert Burkhardt [13], informático de Cambridge, desarrolla un programa para diseñar automáticamente domos y esferas Tensegrity, adicional a esto ha construido algunos prototipos de esferas que han demostrado la sensibilidad a errores de pretensión y de fabricación en la longitud de los cables y barras. (Fig.17,18)

Figura 17, 18.
 Esfera Tensegrity
 Robert Burkhardt

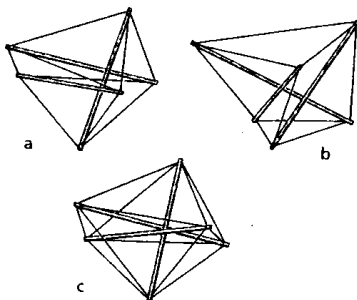
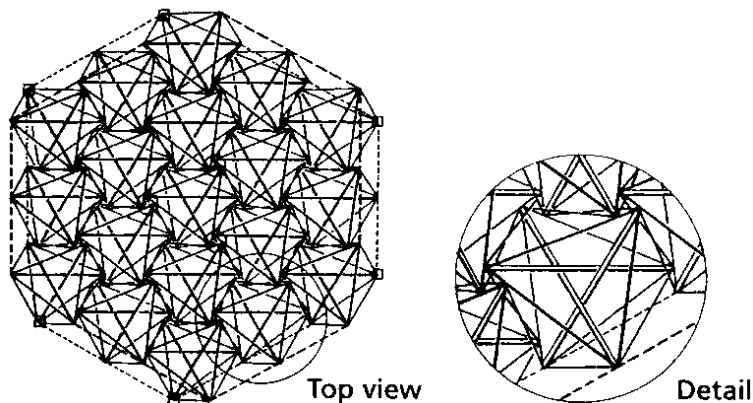


Figura 19.
 Unidades Tensegrity
 La C técnicamente rígida

Ariel Hanaor [14] del Instituto de Investigación Israelí, ha hecho investigaciones en el campo de las uniones y de los elementos que componen el Tensegrity. Observó que la configuración de las barras en una unidad de Tensegrity cerrado pueden estar juntas. Si están conectadas en un punto por soldadura o por una unión rígida, la longitud de la barra es dividida en dos efectivamente y se pueden usar barras de menor sección. Al reducir la longitud de la barra su resistencia a la flexión aumenta en un factor de cuatro y reduce el peso de la estructura. (Fig.19,20)

Figura 20.
 Redes de Tensegrity
 Ariel Hanaor



También en otro ejemplo de sistema Tensegrity impuro pero eficaz, el investigador **Rene Motro** [15] director del Laboratorio de Ingenieros Civiles de Montpellier-II, unió barras seguras en sus extremos para hacer dobles capas Tensegrity en retículas de domos. La conexión de las barras forma continuos zigs-zags, estas filas de uniones diagonales (sin cuerdas superiores o inferiores rígidas) se intersectan en la capa inferior; aplicable a sistemas Tensegritis plegables y desplegados curvos. La geometría de estos sistemas y el estado de tensión dependen de la cinemática de los elementos durante el proceso de plegado. (Fig.21)

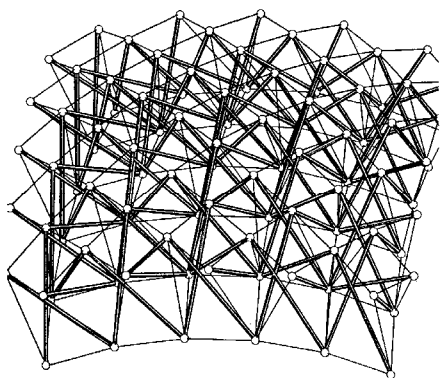
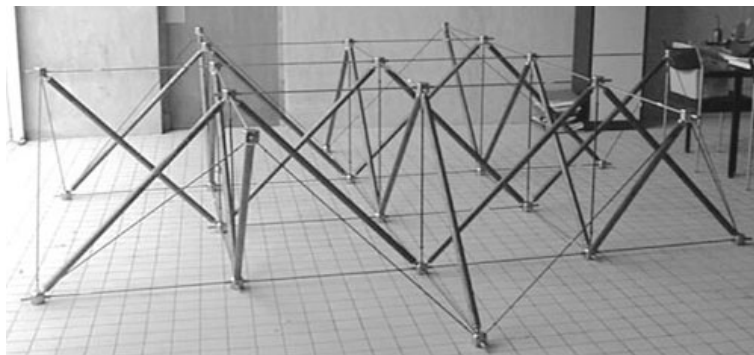
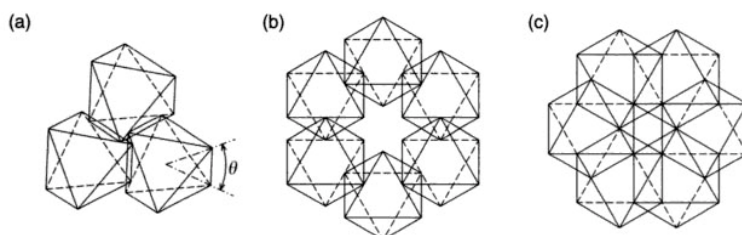


Figura 21.
 Redes de Tensegrity
 Rene Motro



El joven investigador **Wang Bin Bing** [16] hace un estudio de los sistemas de cables pretensados, crea nuevas configuraciones geométricas (basado en poliedros), yuxtaposiciones simples y conexiones de diferentes soluciones para crear nuevas redes. (Vértice a vértice, vértice a arista, arista a arista - Fig.22)

Figura 22.
 Configuraciones geométricas:
 a. y b. Vértice a arista
 c. Arista a arista
 Wang Bin Bing



En la actualidad la Ingeniera alemana Rosemarie Wagner, ha realizado algunos análisis teóricos con respecto al tema de la estabilidad de las estructuras Tensegrity, retomando los estudios realizados por Motro y Burkhardt.

Dentro de sus conclusiones afirma que según la definición de Tensegrity de tener elementos continuos a tracción y elementos discontinuos a compresión, las vigas simples pretensionadas pertenecen al concepto de estructuras Tensegrity. Pero cuando aparecen fuerzas horizontales éstas deben ser ancladas, lo que quiere decir que necesitan de una estructura auxiliar para permanecer en equilibrio. Y si las vigas están dispuestas de forma radial necesitan de un anillo de compresión para lograr el equilibrio. Según estas definiciones cuestiona el concepto de Tensegrity aplicado al “Cable domes” de Geiger por usar un elemento continuo a compresión.

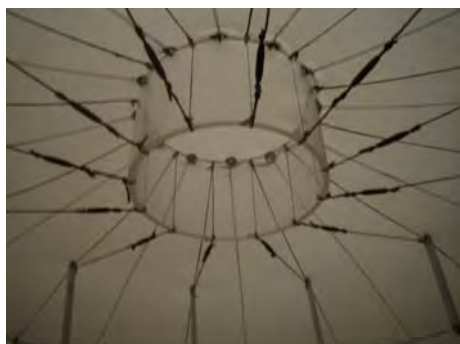


Figura 23.
Bifid Tension Dome
I. Llorens y H. Pöppinghaus

En Barcelona el arquitecto Josep Ignasi Llorens y Hubertus Pöppinghaus han realizado algunos proyectos utilizando los principios del Tensegrity [17]. En 2004 dentro del evento del Forum de las Culturas diseñaron una estructura temporal 100% recuperable; un cable dome de 20 m. de diámetro, en el cual la disposición de los cables ayuda a la fácil erección del domo y a su vez ayudan a mejorar el funcionamiento de la estructura y la ligereza de la misma. (Fig.23,24)

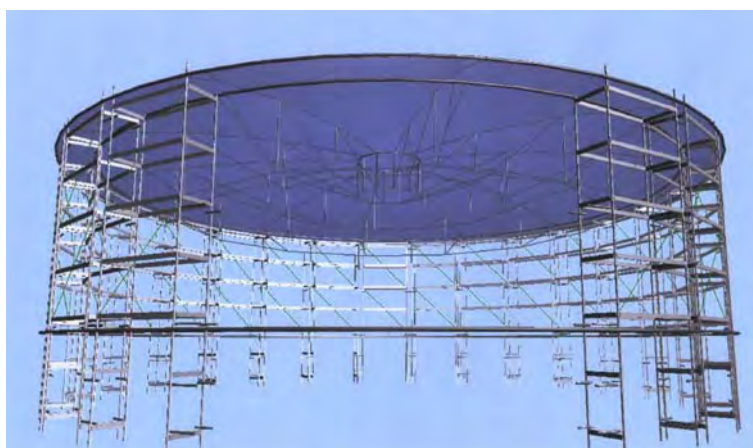


Figura 24. Bifid Tension Dome Forum - Barcelona 2004



Figura 25.
R.H. Luchsinger y
A. Pedretti

El suizo R.H. Luchsinger y el italiano A. Pedretti [18] investigan en un nuevo concepto de estructura liviana “Tensairity”. La clave del principio consiste en el uso de baja presión de aire para estabilizar elementos de compresión y arrugas. La estructura básica es una viga con las propiedades de una simple barra de aire como estructura ligera, rápida de erigir y compacta en su almacenaje pero con la capacidad de una viga de acero convencional. Ideales aplicaciones de la tecnología del tensairity son redes para techos, estructuras temporales y puentes. (Fig.25,26)

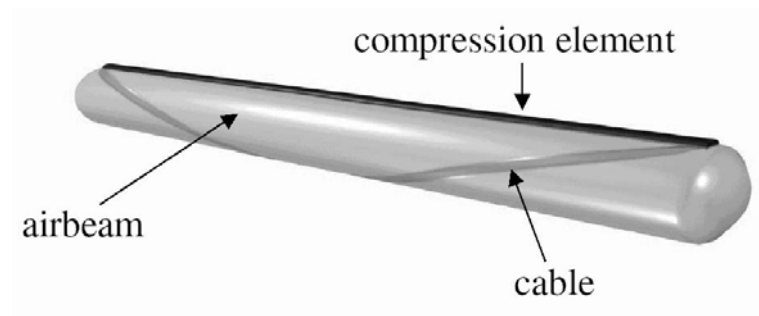


Figura 26.
Viga - Tensairity

Como aplicación del principio de esta viga tensairity tenemos el ejemplo de una cubierta de 16m x 40m para un parqueadero en la estación de trenes de Montreaux en Suiza. (Fig.27,28)



Figura 27.
Cubierta con Tensairity
Garage Parc Montreaux



Figura 28. Garage Parc Montreaux - Suiza

TIPOLOGÍA 1.3

TENSEGRITY ABIERTO 1.3.1

Sistemas abiertos, siguen los mismos principios del tensegrity tienen barras discontinuas a compresión equilibradas por cables tensados pero necesitan elementos auxiliares para ser anclados y completar el equilibrio del sistema. (Fig.29)

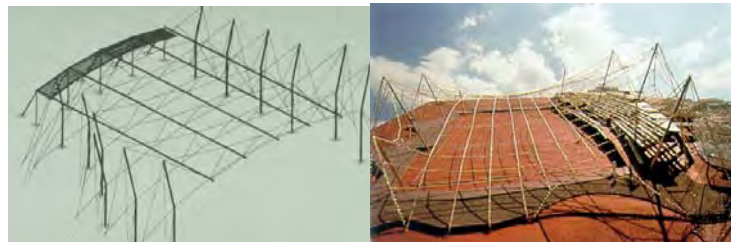
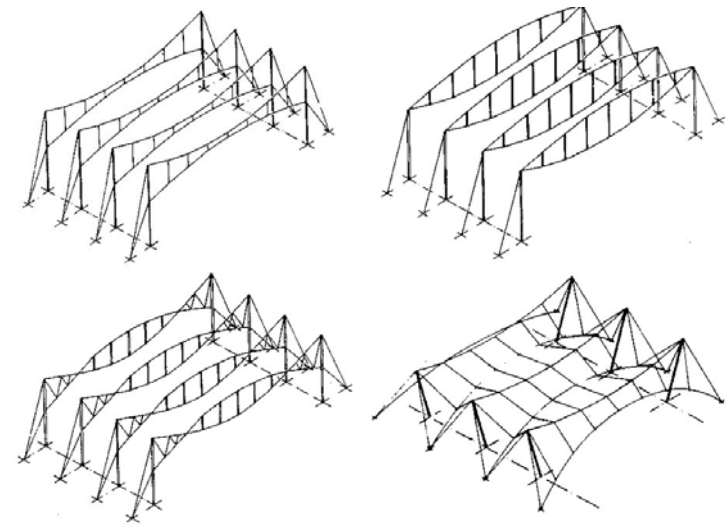


Figura 29. Yokohama "exotic showcase - gate area" 1989.

TENSEGRITY CERRADO 1.3.2

Sistemas cerrados autoportantes, tienen barras discontinuas a compresión equilibradas por cables tensados. Completan su estabilidad al estar totalmente distribuidas las fuerzas de compresión y tensión.

Como ejemplos de este sistema tenemos las cúpulas geodésicas de Fuller (Fig.30) y el cable dome de Geiger que usa un anillo de compresión para cerrar el sistema. Aunque en ambos casos no son sistemas completamente en tensegrity.

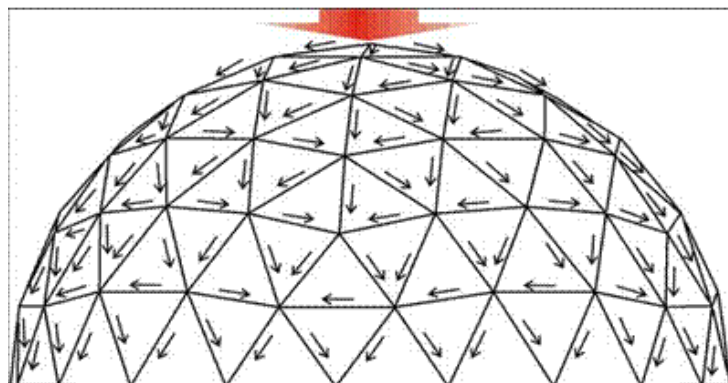
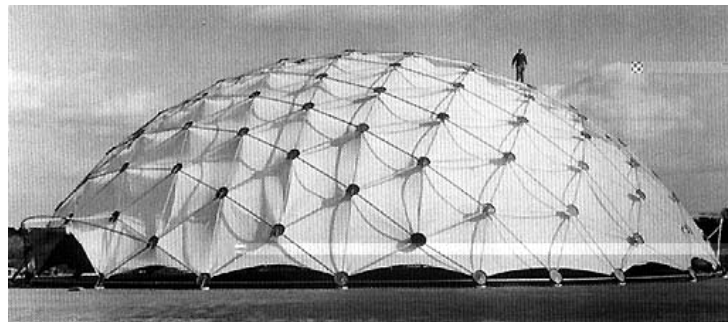
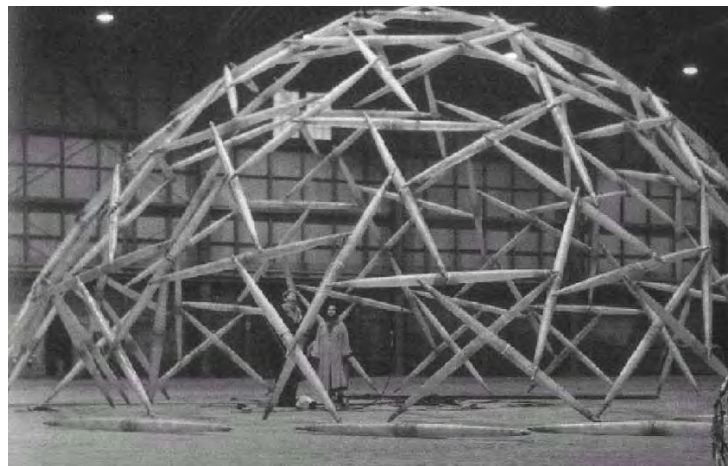


Figura 30. Cúpulas Geodésicas de Fuller

CÚPULAS GEODÉSICAS 1.3.2.1

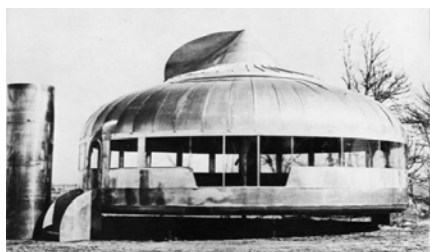


Figura 31. Casa Wichita



Figura 32. Casa Dymaxion



Figura 33. Cúpula geodésica

Desde principios de los años 60 Fuller empezó a trabajar con estructuras geodésicas y geometría sinérgica [1], su gran aporte consistió en cambiar la concepción del espacio como algo estático y sin forma definida.

“El espacio tiene forma”, esa era su principal consigna, convirtió la geometría espacial en diagramas de vectores en continuo movimiento y cambio de forma.

El trabajo de Fuller reúne una infatigable investigación y un extraordinario proceso creativo apartado de los cánones tradicionales de diseño y constituye una de las obras de más amplia influencia en todas las áreas relacionadas con la tecnología. La investigación práctica en la obra de Fuller posee dos tendencias:

1. La solución del problema mundial de la vivienda, que lo conduce a sus casas Wichita y Dymaxion (Fig.31,32) que resumen sus conceptos mecánicos sobre el funcionamiento interno de una arquitectura adaptable.

2. Sistemas geométricos estructurales, dando como resultado las cúpulas geodésicas y los sistemas de integridad tensional tensegrity.

Otro aporte de Fuller fue la energía sinérgica y energética:

- Sinergia, estudio de un sistema a partir de los componentes por separado.
- Energético se refiere a las partes aisladas de un sistema que funcionan individualmente.

La geometría energética y sinérgica se logran a partir de la búsqueda de estructuras que regulen el medio ambiente con la máxima ventaja a partir del cálculo eficaz de la energía.

De este análisis deduce que el sistema estructural más eficiente es el que reúne el tetraedro, base fundamental de la geometría tridimensional y la esfera, cuerpo de menor relación superficie por volumen.

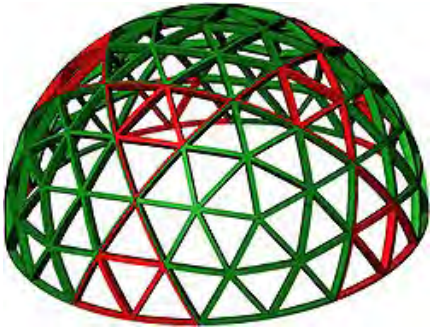


Figura 34.
 Semiesfera geodésica de frecuencia 4 generada de un icosaedro.

De este concepto surgen las cúpulas geodésicas, cuya primera aplicación fue el edificio rotonda de la compañía Ford (Fig.33) y posteriormente se amplió a albergues temporales y centros de exposiciones. Fuller buscaba básicamente el cubrimiento de un gran espacio por medio de un sistema estructural industrializado que permitiera una libre y modificable distribución en su interior (flexibilidad espacial). La construcción de la cúpula geodésica se logra a partir de módulos compuestos por barras prefabricadas de fácil montaje y ensamble.

Una **cúpula geodésica** es parte de una esfera geodésica, un poliedro generado a partir de un icosaedro o un dodecaedro, aunque puede generarse de cualquiera de los sólidos platónicos (Fig.34)

Descripción geométrica

Las caras de una cúpula geodésica pueden ser triángulos, hexágonos o cualquier otro polígono. Los vértices deben coincidir todos con la superficie de una esfera o un elipsoide (si los vértices no quedan en la superficie, la cúpula ya no es geodésica). El número de veces que las aristas del icosaedro o dodecaedro son subdivididas dando lugar a triángulos más pequeños se llama la frecuencia de la esfera o cúpula geodésica. (Fig.34)

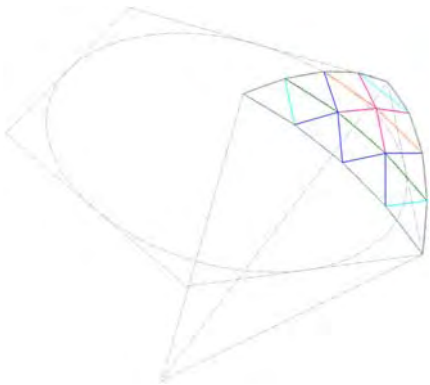


Figura 35.
 Descripción de la subdivisión de una cara de un dodecaedro con frecuencia 4.

Para la esfera geodésica se cumple el teorema de poliedros de Euler, que indica que:

$$C + V - A = 2$$

Donde **C** es el número de caras (o número de triángulos), **V** el número de vértices (o uniones múltiples) y **A** el número de aristas (o barras usadas). Para una cúpula parcial que no sea una esfera completa se cumple:

$$C + V - A = 1$$

Para construir esferas geodésicas se utilizan las fórmulas de los radios del dodecaedro o icosaedro. Los radios permiten levantar los nuevos vértices de las subdivisiones a la superficie de la esfera que pasará por los vértices originales del cuerpo.

CABLE DOME 1.3.2.2

Origen y desarrollo

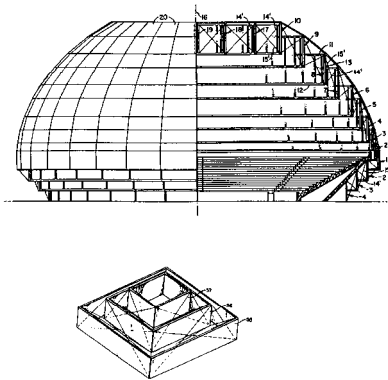


Figura 36. Domo en aspension - Fuller



Figura 37. Georgia Dome - Atlanta

Originalmente los domos de cables fueron una invención de Richard Buckminster Fuller. Su primer diseño fue hecho en 1954 y denominó a este tipo de estructuras domos en "aspension", derivados de ascender y suspender (Fig.36). David G. Geiger fue el diseñador del primer domo de cables construido en San Peterburg, EE.UU., 1984. El "Thunderdome" tiene 210 m de diámetro y una altura de 90m. El sistema estructural desarrollado por David Geiger [19] es más simple comparado al diseño original de Fuller.

Luego Geiger construyó otra cubierta para las Olimpiadas de Seul (1986), a la que le siguieron el Redbird Arena en Illinois (primera cúpula ovalada de este tipo), la Florida Suncoast Dome en St. Petersburg (1988), y el Tayouan Arena en Taiwan (1993). Una de las mayores cúpulas del mundo, también de esta misma tipología, es el Georgia Dome en Atlanta (1992) y el Estadio de la Plata Argentina (2000), proyectados por Levy and Weidlinger Associates [12].

La estructura de cables del **Georgia Dome** está soportada por un anillo externo en hormigón, el cual está colocado sobre cincuenta y dos columnas en veintiséis puntos de sujeción. La cubierta en membrana de teflón incluye una red superior triangulada de cables que está conectada a tres aros de tensión localizados a 20.70m, 47m y 76m de la viga externa mediante postes de compresión. Los mástiles flotantes están todos atados por medio de anillos de cables y están sujetos posteriormente por cables diagonales. (Fig.37)

La integración de los elementos estructurales, la cubierta en membrana translúcida, los rasgos monumentales del edificio (sobre todo de noche) y el más importante, la posibilidad de convertir la función del edificio de un estadio de fútbol a otros usos es un punto decisivo en el desarrollo de los principios del tensegrity para las aplicaciones arquitectónicas. Otra característica importante de este edificio era su diseño en corto tiempo y el período de construcción en sólo treinta meses principalmente por la prefabricación de los elementos estructurales. El Georgia Dome al ser uno de los domos más grandes del mundo nos indica el gran potencial de las estructuras tensegrity para cubrir grandes superficies con múltiples fines.

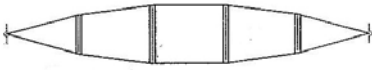


Figura 38. Viga simple

Las **vigas simples** pretensadas (Fig.38) pertenecen al concepto de estructuras tensegrity de tipología abierta, pero para ser estabilizadas necesitan de anclajes exteriores. En el caso del cable dome si disponemos de estas vigas en forma radial para llegar al equilibrio, lo hacen por medio de un anillo de compresión exterior y así llegan al concepto de tipología de tensegrity cerrado.

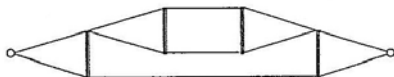


Figura 39. Esquema de Barra y cables



Figura 40. Amagi Dome en Japón

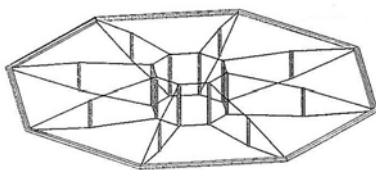


Figura 41. Cable dome Organización radial "ruedas de bicicleta"

El tensegrity ha servido generalizadamente para denominar cualquier tipo de estructura articulada en el que sus diferentes miembros son cables en tensión y barras comprimidas. No se han escapado a esta generalización las cubiertas de cables o mallas de cables radiales, a las que también se alude denominándolas "**ruedas de bicicleta**"; fueron ideadas y patentadas por David Geiger en 1986. (Fig.40,41)

Desde entonces, numerosas cubiertas de este tipo han sido erigidas siguiendo esta técnica, basada en conformar un grupo de vigas de cables radiales fijadas exteriormente a un anillo de compresión y convergiendo en otro anillo o mástil interno que estabiliza el conjunto.

Domo de Geiger

El sistema básico del domo de Geiger está hecho sobre un plano circular con una capa superior de meridianos de cables y una capa inferior de anillos de cables. Los cables meridianos y anillos están conectados el uno al otro por cables diagonales y barras. Esta configuración permite la pretensión de los cables meridianos y cables anillo. El resultado de las fuerzas en los apoyos puede ser llevado al equilibrio por un anillo de compresión. (Fig.42)

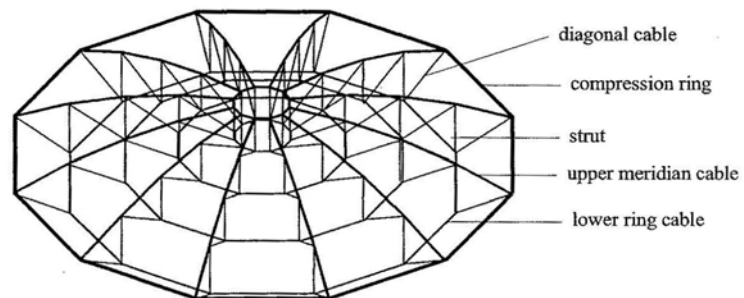


Figura 42. Cable Dome de Geiger

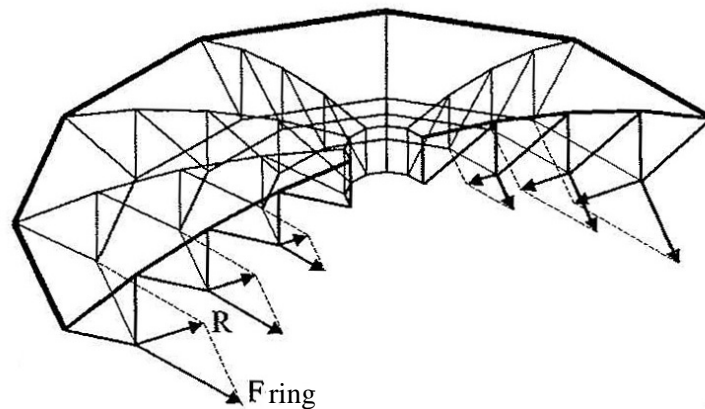


Figura 43. Equilibrio de los cables anillo

Para describir el comportamiento de las cargas y el equilibrio bajo pretensión, la estructura espacial o tridimensional puede ser reducida a un sistema plano. Los cables anillo son polígonos y los bordes están conectados a las barras y a los cables diagonales. La fuerza de tensión F_{ring} puede ser substituida por la fuerza radial R , que reacciona en el plano definido por las barras y cables diagonales. (Fig.43)

La sección transversal hecha a la estructura completa, muestra como los cables de la viga simple están unidos uno al otro. La cuerda superior de la viga simple es substituida por la siguiente viga de cables y las fuerzas de desviación de los cables anillo son substituidos también por el siguiente. (Fig.44)

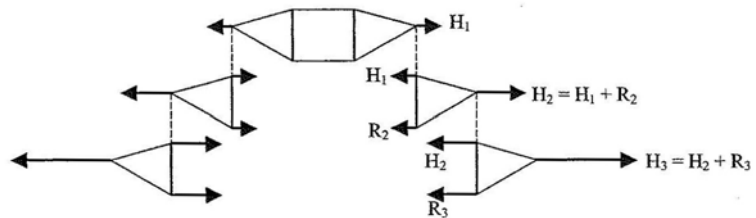


Figura 44. Esquema de equilibrio de fuerzas de pretensión

La carga aplicada tiene que ser separada (Fig.45) según el comportamiento bajo los efectos de las cargas:

- sólo por deformaciones elásticas de los miembros de tensión (tracción) y compresión del sistema
- y por el comportamiento de cargas principales a deformaciones de menores tensiones.

Las fuerzas externas como el peso muerto o cargas de nieve son llevadas al apoyo para reducir las fuerzas de tensión en los cables meridianos e incrementan las fuerzas en las diagonales y los cables anillo.

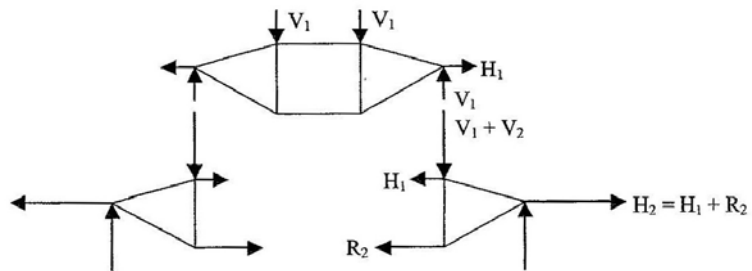


Figura 45. Fuerzas de tracción uniformemente distribuidas

El sistema estructural del domo Geiger tiene un alto grado de cinemáticas y de posibles movimientos de los elementos simples en el sistema. Es comparable con las vigas de cables, o redes de cable con complejas mallas cuadradas [20]. La resistencia contra estas deformaciones de tensión sólo puede ser bajo influencia de fuerzas de pretensión.



Figura 46.
 Bifid Tension Dome
 I. Llorens y H. Pöppinghaus

A pesar del hecho de que no son pocos los profesionales que consideran este tipo de construcciones como auténtico tensegrity, Rene Motro no duda en identificarlas como falso tensegrity desde el mismo instante en que requieren de un elemento de compresión en su perímetro o contorno.

De hecho, tampoco Snelson las toma por verdaderos sistemas de compresión flotante; cuando se le pregunta al respecto, el escultor responde inexorablemente: “No puede ser considerado tensegrity, a pesar de que la gente las quiera denominar así. Son en esencia ruedas de bicicleta. ¿Necesita el mundo un término diferente para esta tipología de estructuras exo-esqueléticas de anillo rígido? No creo que sea necesario, caso análogo a la tipología de telas de araña”.

Se puede afirmar entonces que no es una estructura completamente en tensegrity, pero se observa que están inspiradas por sus principios: barras comprimidas que no se tocan entre sí y unidas únicamente por medio de cables pretensados. (Fig.46,47)



Figura 47. Bifid Tension Dome Forum - Barcelona 2004

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 1.4

1. Se han definido los **principios** del tensegrity:
 - Compuesto por barras discontinuas (las barras no se tocan entre sí) que trabajan a compresión.
 - Compuesto por cables que trabajan a tracción y mantienen el equilibrio de las barras.
 - A cada nudo le llega una barra y tres cables como mínimo.
 - Las fuerzas de compresión y de tensión están perfectamente distribuidas trabajan de forma continua y conjunta.
 - El sistema se equilibra por la tensión de los cables, esto quiere decir que es estable por sí mismo.
 - No requiere de elementos externos para llegar al equilibrio.
 - Tienen características similares a las estructuras pretensadas como vigas de cables, redes de cables y membranas estructurales.
2. Al revisar el **estado del arte** del tensegrity, después de analizar los antecedentes y proyectos realizados por anteriores investigadores podemos concluir:
 - Que a través de los últimos 60 años, al ser estas estructuras relativamente jóvenes se han hecho avances e investigaciones usando los principios del tensegrity.
 - Algunos proyectos han usado los conceptos pero no respetan completamente sus principios, como los explicamos en el párrafo anterior.
 - Se han realizado estructuras como elementos escultóricos.
 - A nivel de aplicaciones con un uso arquitectónico para cubrir grandes superficies podemos contar con las vigas de cables, las cúpulas geodésicas y los domos de cables (cable dome).
 - En los tres casos podemos afirmar que no son estructuras completamente en tensegrity.

En el primer caso, el de las vigas de cables necesita de elementos externos para anclarse y equilibrar el sistema.

En el segundo caso, el de las cúpulas geodésicas sus barras se tocan entre sí.

En el tercer caso, el de los domos de cables, necesitan de un anillo exterior para llegar al equilibrio, lo que quiere decir que tampoco cumplen con los principios básicos del tensegrity.
 - Como conclusión final podemos decir que hasta el día de hoy no se ha construido una estructura completamente en tensegrity, con el domo central y el anillo en tensegrity, que tenga una aplicación con un uso arquitectónico para cubrir grandes superficies.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 1.5

- [1] Fuller, R. B., *Synergetics*. MacMillan, New York, 1975.
- [2] Snelson, K., *Continuous tension, discontinuous compression structures*. US. Patent No.3,169,611. Febrero 16, 1965.
- [3] Emmerich, D. G., *Structures Tendues et Autotendantes*, Ecole d'Architecture de Paris La Villette, 1988.
- [4] Pugh, A., *An Introduction to Tensegrity*. University of California Press, Berkeley, 1976.
- [5] Hanaor, A., *Geometrically rigid double layer tensegrity grids*. International Journal of Space Structures, Vol. 9, No. 4, 1994.
- [6] Motro, R., *Tensegrity systems the state of the art*. University of Montpellier II, International Journal of Space Structures, Vol.7, No. 2, 1992.
- [7] Wang, B. B., *Definition of tensegrity systems*. Proceedings of LSA98, Lightweight structures in architectural engineering and construction, Vol.2, 1998.
- [8] Ródchenko, *La construcción del futuro, Constructivismo*. Sala de exposiciones de Caixa Catalunya, La Pedrera, Enero 2009.
- [9] Moholy-Nagy, L., *Retrospektive, Meister des Bauhauses*. Kunsthalle Frankfurt, Octubre 2009.
- [10] Robbin, T., *Engineering a New Architecture*. Yale University Press, Londres, 1996.
- [11] Marks, R.W., *The Dimaxion World of Buckminster Fuller*. Anchor Books 1 Garden City, New York, 1973.
- [12] Levi M., *The innovation of lightness*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 35, No.115, 1994.

- [13] Burkhardt, R.W., *A Practical Guide to Tensegrity Design*. Software Services Cambridge, USA, 1994.
- [14] Hanaor, A., *Aspects of design of double layer tensegrity domes*. International Journal of Space Structures, Vol. 7, No. 2, 1992.
- [15] Motro, R., and Smaili, A., *Foldable/Unfoldable Curved Tensegrity Systems by Finite Mechanism Activation*. Journal of The International Association For Shell and Spatial of Structures, Vol. 48, No. 3, Dec n.155, 2007.
- [16] Wang, B. B. and Li Y.Y., *Cable-Strut Systems of Non-Contiguous Strut Configuration-Morphological Study*, Journal of The International Association For Shell and Spatial of Structures, Vol. 46, No. 1, Abril n.147, 2005.
- [17] Llorens, I. y Pöppinghaus H., *Bifid Tension Dome*, archivo de los autores. Forum Barcelona, 2004.
- [18] Luchsinger, R. H., Pedretti, A, Steingruber, P. and Pedretti M., *Light Weight Structures with Tensairity*, R. Motro (Ed.), Shell and Spatial Structures from models to Realisation, Editions de L'Espérou, Montpellier, 2004.
- [19] Geiger, D.H., *Roof structure*, U.S. Patent No. 4,736,553, Abril 12, 1988.
- [20] Wagner, R., *Tensegrity and Cable Domes*. The Seventh International Workshop on the Design and Practical Realisation of Architectural Membranes, Berlin, 2002.

CAPÍTULO 2. **OBTENCIÓN DE LA FORMA**

GEOMETRÍA	2.1
MODELOS FÍSICOS	2.2
TIPOLOGÍA SEGÚN ANTHONY PUGH	2.2.1
Patrones con tensores: Patrón en Diamante	.A
Patrón en Zig-Zag	.B
Patrón en Circuito	.C
TIPOLOGÍA PROPUESTA	2.2.2
Patrón en diamante con membrana y barras en capa sencilla	- Tipología .1
Patrón en membrana continua con barras en capa sencilla	- Tipología .2
Patrón en membrana continua con 20 barras en doble capa	- Tipología .3
Patrón en diamante con membrana y malla con 20 barras en doble capa	- Tipología .4
MODELOS INFORMÁTICOS	2.3
AUTOCAD Y WINTESS	2.3.1
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	2.4
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	2.5

OBTENCIÓN DE LA FORMA GEOMETRÍA 2.1

La construcción geométrica del Tensegrity en este estudio se basa en:

La formulación de un módulo base o unidad Tensegrity a partir de polígonos y poliedros (prismas y antiprismas). Sólidos Platónicos y de Arquímedes.

- Reemplaza componentes geométricos como aristas y vértices por barras, cables y articulaciones respectivamente.
- Reemplaza componentes geométricos como caras por membranas.
- Conformación de sistemas más complejos a partir de agrupaciones y variaciones del módulo inicial (unidad tensegrity).

La comprobación de la estabilidad geométrica se establece con la siguiente fórmula: [21]

$$V = \text{vértices} \quad A = \text{aristas}$$
$$3V = A + 6 \quad (\text{SCHÄFLI})$$

$$(3 \times 12) = (30 + 6)$$
$$36 = 36$$

Ejemplo:

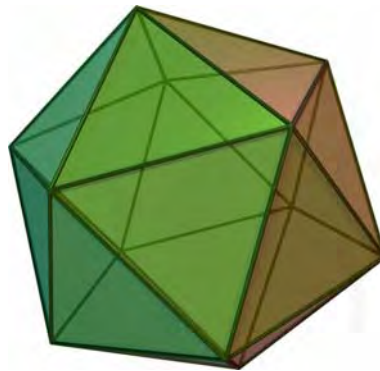
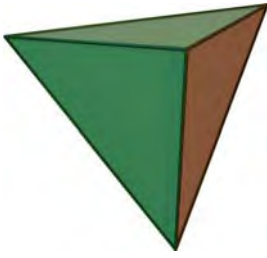
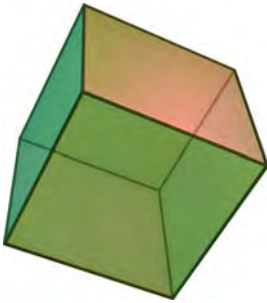


Figura 48. Icosaedro:
20 Caras - 12 Vértices - 30 Aristas

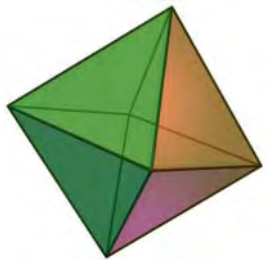
Polígonos



a. Tetraedro-4 triángulos



b. Hexaedro-6 cuadrados



c. Octaedro-8 triángulos



d. Dodecaedro-12 pentágonos



e. Icosaedro-20 triángulos

Figura 49.
Sólidos Platónicos

El nombre de un polígono está dado por su número de lados:

- 3 lados - triángulo
- 4 lados - cuadrado
- 5 lados - pentágono
- 6 lados - hexágono
- 12 lados - dodecágono
- 15 lados - pentadecágono, etc.

Poliedros (Ver Anexo 1.)

Sólido conformado por caras planas llamadas polígonos, las intersecciones entre sus caras se llaman aristas y entre aristas vértices, se clasifican en:

- **Prismas:** poliedro conformado por 2 polígonos llamados bases, situados en planos paralelos unidos por paralelogramos. (Fig.50)
- **Antiprismas:** poliedro conformado por dos polígonos iguales girados en planos paralelos, unidos por triángulos. (Fig.50)

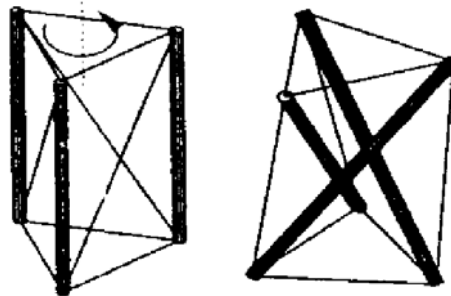
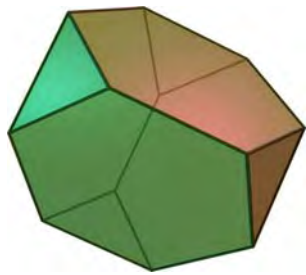


Figura 50.
Prisma y Antiprisma triangular (Unidad Twist)

Sólidos de Arquímedes

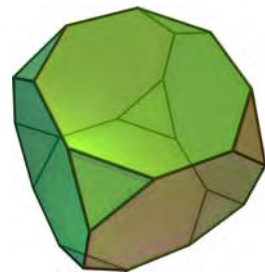
Poliedros regulares o sólidos Platónicos, compuestos por polígonos diferentes, siendo el resultado de la truncación total o parcial de los sólidos Platónicos. Por ejemplo el cubo truncado, que es la truncación parcial del hexaedro o cubo. (Fig.51)



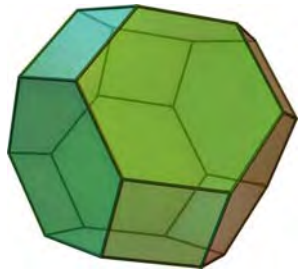
a. Tetraedro truncado



b. Cuboctaedro



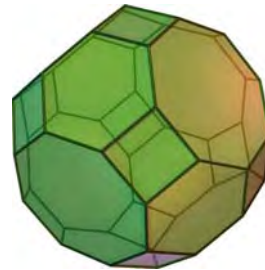
c. Hexaedro truncado



d. Octaedro truncado



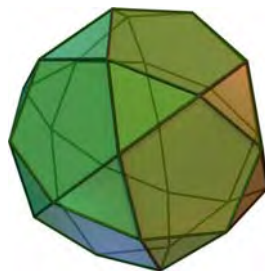
e. Rombicuboctaedro menor



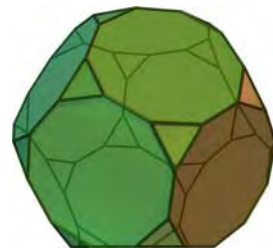
f. Rombicuboctaedro mayor



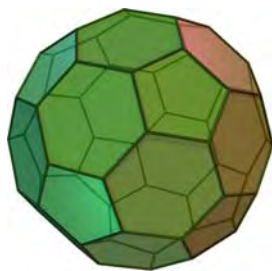
g. Hexaedro chato



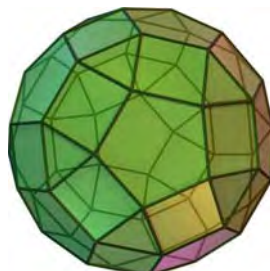
h. Icosaedro chato



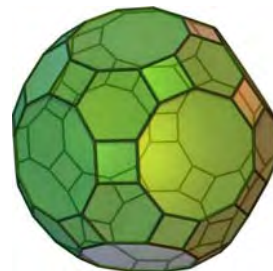
i. Dodecaedro truncado



j. Icosaedro truncado



k. Rombicosidodecaedro menor



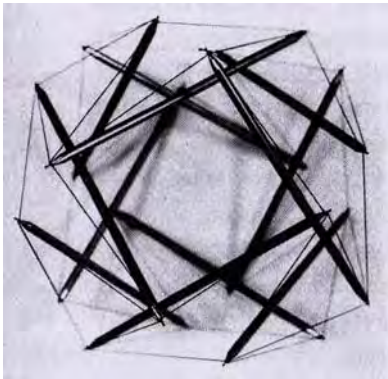
l. Rombicosidodecaedro mayor



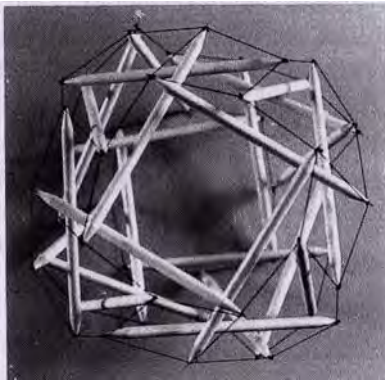
m. Dodecaedro chato

Figura 51.
Sólidos de Arquímedes

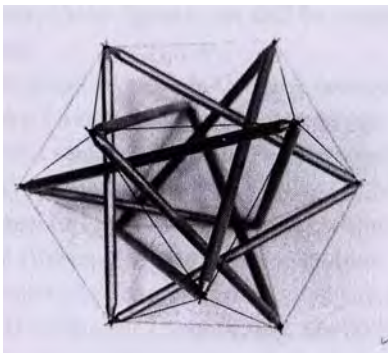
MODELOS FÍSICOS 2.2



a. Patrón en Diamante



b. Patrón en Zig-zag



c. Patrón en Circuito

Figura 52.
Modelos de Pugh

Anthony Pugh (1976) parece ser la primera persona que realizó un catálogo de los sistemas Tensegrity; lo hizo refiriéndose casi exclusivamente a los Tensegritis poliédricos y esféricos [22]. Primero describió superficialmente las figuras más simples, tanto bidimensionales como tridimensionales, según diferentes aspectos: la posición relativa de los tendones (pasando por puntos medios o sólo por los extremos), la complejidad de los elementos comprimidos (barras aisladas o agrupaciones de ellas), el número de capas o niveles (simple, doble, triple, cuádruple), etc. A continuación describió los tres modelos o patrones básicos con los que se pueden configurar las estructuras Tensegrity esféricas o cilíndricas:

Patrón en **Diamante**, patrón en **Zigzag** y patrón en **Circuito** [4]. Esta clasificación nació de las posiciones relativas de las barras entre sí y del modo en el que los tendones unen sus extremos, como se puede apreciar en la figuras 52 y 53.

Pugh también relató el modo en el que se podían unir los módulos Tensegrity más simples para conformar estructuras complejas. En dicha sección de su obra, describe alguna de las diversas formas para obtener mástiles, torres, mallas, cubiertas o cúpulas, aunque deja campo abierto a la investigación futura.

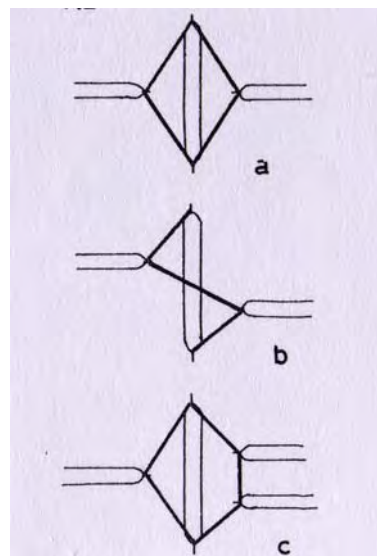


Figura 53. Esquema de patrones

TIPOLOGÍA SEGÚN ANTHONY PUGH 2.2.1

PATRONES CON TENSORES Patrón en Diamante A.

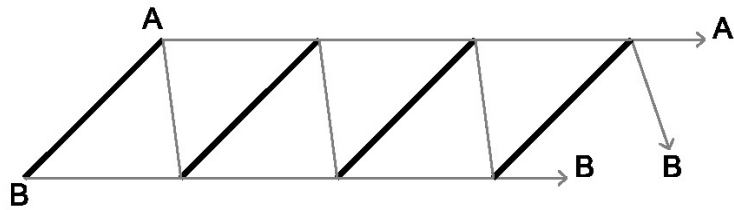


Figura 54. Unidad tensegrity - 4 barras en capa sencilla.



Figura 55.
Antiprisma de base cuadrada.



Figura 56.
Antiprisma de base cuadrada.



Figura 58.
Icosaedro.

Esta figura está formada por 4 barras ($L=14$ cm) alineadas en una sola capa, localizadas en diagonal y unidas por 12 cables o tendones ($L=8$ y 10 cm). Los cuales originan 8 caras de triángulos ó 4 en forma de rombo o diamante. Como vemos en el esquema si unimos los extremos de los cables se construye un primer ejemplo de unidad básica tensegrity de capa sencilla y sistema en forma de diamante: un antiprisma de base cuadrada (Fig. 55)

Para llegar a esta misma figura podemos hacerlo por un segundo proceso, como es el colocar 4 barras que atraviesen un cubo, desde una de sus esquinas a la mitad de su arista contraria y luego unimos sus barras por los extremos con los cables como lo vemos en la Fig. 56. Como fase final se puede eliminar el cubo de cartón que habíamos puesto de base y así obtener el antiprisma en tensegrity.

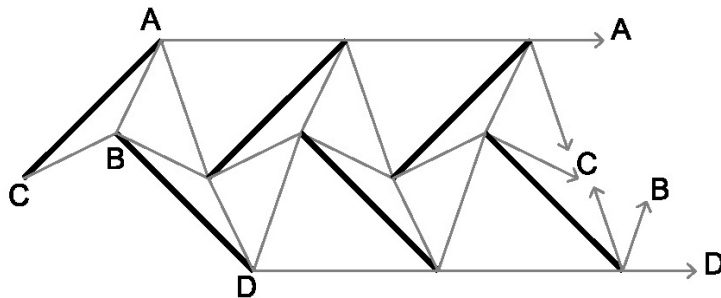


Figura 57. Unidad tensegrity - 6 barras en doble capa.

La siguiente figura está formada por 6 barras ($L=14$ cm) alineadas en doble capa, localizadas en diagonal y unidas por 24 cables ($L=9$ cm). Lo que quiere decir que corresponden 4 cables por cada barra.



Figura 59.
Icosaedro.



Figura 61.
Modelo tensegrity triple capa
vista en planta.



Figura 62.
Modelo tensegrity triple capa
vista en alzado.

Como vemos en el esquema si unimos los extremos de los cables se construye un icosaedro. (Fig. 58)

Para llegar a esta misma figura podemos hacerlo por un segundo proceso, como es el colocar las 6 barras (L=14 cm) en cada uno de los lados del cubo y luego unimos sus barras por los extremos con los cables (L=9 cm) como lo vemos en la Fig. 59.

Los cables forman 6 caras en forma de rombo o diamante y 6 caras en forma de triángulo. Como fase final se puede eliminar el cubo de cartón que habíamos puesto de base y así obtener el icosaedro en tensegrity.

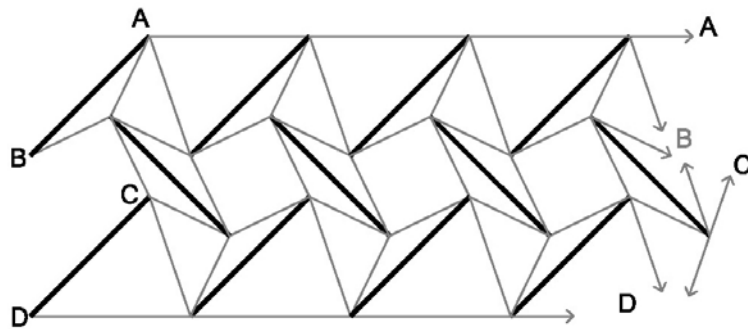


Figura 60. Modelo tensegrity - 12 barras en triple capa.

Este modelo está formado por 12 barras (L=23 cm) alineadas en triple capa, localizadas en diagonal y unidas por 48 cables (L=12,80 cm). Si unimos los cables finales con las barras podemos cerrar el sistema y obtener un modelo tensegrity equilibrado por la tensión de los cables. (Fig.60)

Podemos observar como los 4 cables o tendones que corresponden a cada barra definen la forma de diamante o rombo alrededor de las mismas. Por esto Pugh denominó así este sistema, en forma de diamante. El modelo en planta describe en sus bases inferior y superior forma de cuadrado. (Fig.61)

Si leemos el esquema y el alzado observamos que los cables generan 6 cuadrados en total, 4 laterales y 2 de las bases, además se forman 12 rombos o diamantes correspondientes a las barras. (Fig. 60, 62)
 Es posible realizar modelos de triple capa con 6 barras en cada capa, pero tienden a ser menos estables que los más pequeños.



Figura 64. Modelo tensegrity cuatro capas vista en planta.

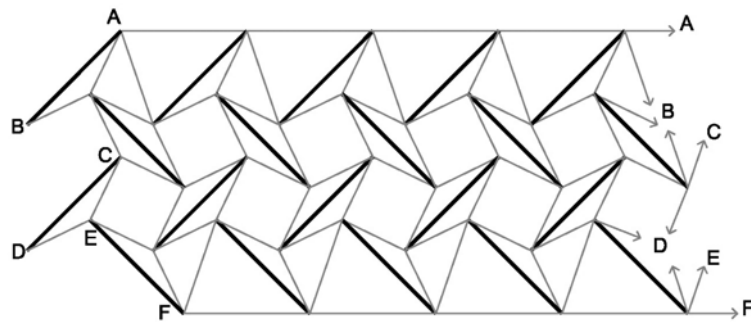


Figura 63. Modelo tensegrity - 20 barras en cuatro capas.

El siguiente modelo está formado por 20 barras ($L=23$ cm) alineadas en cuatro capas, localizadas en diagonal y unidas por 80 cables ($L=12,50$ cm). Si unimos los cables finales con las barras podemos cerrar el sistema y obtener un modelo tensegrity equilibrado por la tensión de los cables. (Fig.63)

El modelo en planta describe en sus bases inferior y superior forma de pentágono (Fig.64). Si observamos el esquema y el alzado se pueden visualizar las formas que generan los cables o tendones, 10 cuadrados y los 20 rombos o diamantes que corresponden a cada barra. (Fig. 65)



Figura 65. Modelo tensegrity cuatro capas vista en alzado.

Este modelo así como el anterior tienen una forma aproximadamente cilíndrica, sus diámetros dependen del número de barras en cada capa. Es posible construir modelos con más de 4 capas de barras pero no son suficientemente estables si hay más de tres o cuatro barras en cada capa.



Figura 67. Patrón en zig-zag, cubo truncado

Patrón en Zig-Zag B.

Los cables del modelo están organizados en forma de Z entre los extremos de las barras, de ahí su nombre de patrón en zig-zag. (Fig. 66)

Otra característica para esta tipología es que cada cara es el espejo de la paralela. Los tendones definen los bordes o aristas del poliedro a partir del encuentro de tres cables o tendones y el extremo de cada barra.

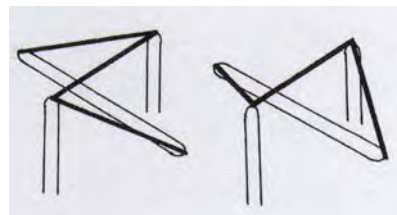


Figura 66. Esquema patrón en zig-zag.

El modelo de la imagen es un cubo truncado (Fig. 67) que está formado por 36 cables ($L=9,50$ y $10,50$ cm) y 12 barras ($L=25$ cm). Lo que quiere decir que a cada barra le llegan 3 cables que definen las aristas del cubo truncado.

Los cables conforman los 8 triángulos que truncan el cubo en sus esquinas y las aristas de los octágonos distorsionados que observamos en la vista en planta del modelo.

Estos modelos están basados geoméricamente en los poliedros. Algunos ejemplos que podemos realizar en el formato de patrón en zig-zag son los poliedros de Arquímedes: El tetraedro truncado, cubo truncado, hexaedro chato, octaedro truncado, icosaedro truncado, dodecaedro truncado, rombicuboctaedro mayor, rombicododecaedro mayor, etc.

Patrón en Circuito C.

El sistema de patrón en circuito esta basado en los poliedros. En esta tipología los tendones definen los bordes o aristas del poliedro, mínimo debe haber cuatro bordes o cables y dos barras que se unen para formar cada vértice del poliedro, cada unidad de estas es usada como base del patrón en circuito de la figura.

Se denomina así porque las barras se unen formando circuitos de figuras geométricas, como por ejemplo pentágonos en este caso.

Los circuitos de barras se entretajan entre sí y pasan unos con respecto a los otros por debajo, como se observa en la figura 68 y se crea una red de tendones que los rodea como si tirarán hacia el interior, semejando a la piel de un globo y las barras empujando hacia el exterior como el aire del globo.

Se forma un cruce de dos barras y cuatro cables ($L=8,5$ cm) fuera del punto medio de cada barra, por lo que habrá el mismo número de cruces que de barras. En este caso se ha construido un icosaedro formado por 30 barras ($L=16$ cm), por lo cual tendrá 30 cruces, seis circuitos de pentágonos entretajidos, sin tocarse el uno con respecto al otro y sesenta tendones de igual longitud que definen los bordes del icosaedro.

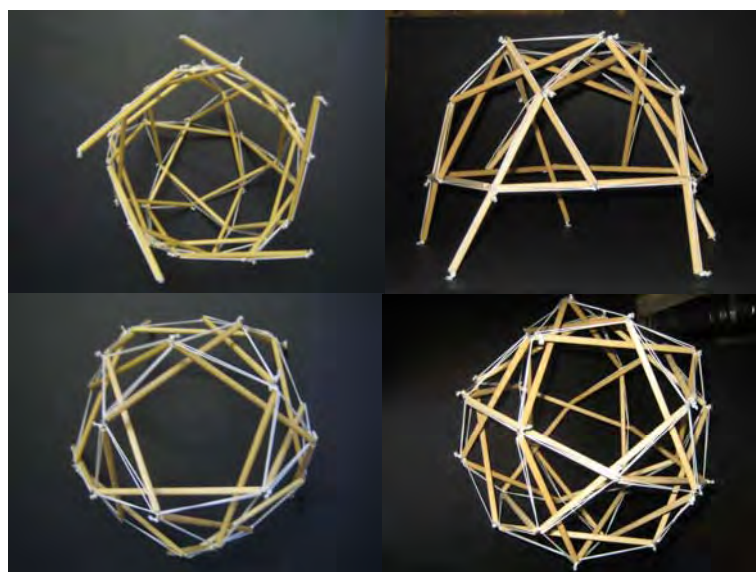
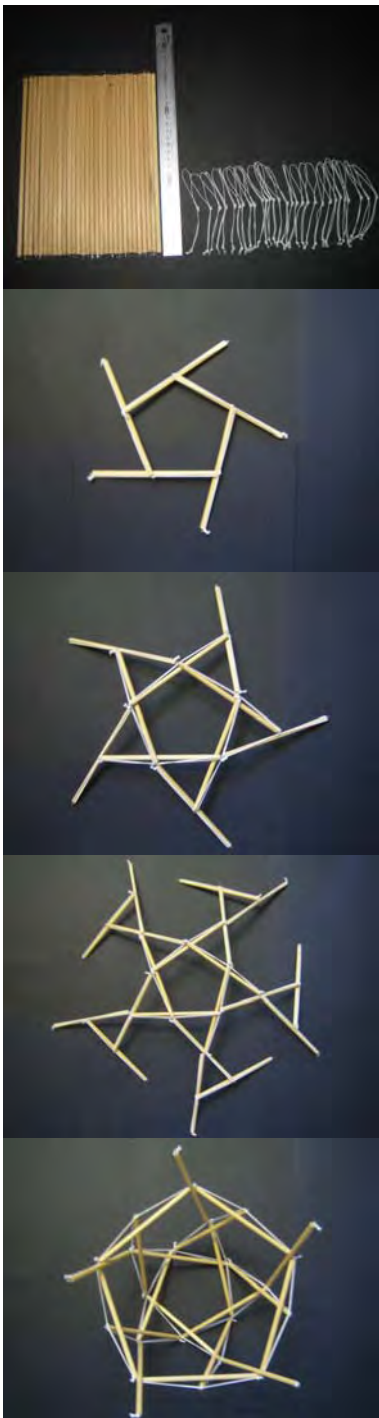


Figura 68. Patrón en circuito - Icosaedro 30 barras.

TIPOLOGÍA PROPUESTA 2.2.2

MATERIALES

Se construyeron casi 70 modelos (Ver Apéndice A.) a escala a partir del uso de barras, cables o tendones y membranas en diferentes materiales. **Barras** en madera de balsa y plástico con diferentes secciones de diámetro y longitudes. **Tendones** en hilos y gomas de diferentes calidades y resistencias. **Membranas** en látex, malla plástica y lycra.

En la imagen podemos observar ejemplos de diferentes modelos a escala en tensegrity, construidos con cables y membranas teniendo en cuenta los principios de geometría, basados en los poliedros, sólidos Platónicos y sólidos de Arquímedes. Comprobamos el importante poder de los modelos físicos en el estudio de las estructuras espaciales [23].



Figura 69. Ejemplos de modelos tensegrity. Desarrollados a partir de un método intuitivo y experimental basado en la geometría.

Patrón en látex a.

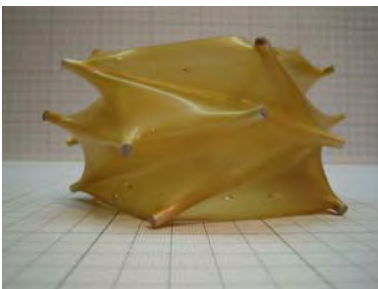


Figura 70. Modelo tensegrity en patrón de látex. Esc_1:100

Como primera prueba de material se usó el **látex** para realizar modelos con patrones continuos. Con una distribución de un mayor número de barras, localizadas en posición diagonal y en doble capa, para generar un anillo Tensegrity de membrana continua, como lo muestra la figura 70.

Para construir el modelo partimos de un patrón en látex de forma rectangular plano (6 cm x 32,50 cm), al cual le marcamos una red ortogonal de puntos (2,5 cm x 2,5 cm), donde se ligan las 10 barras (L=10 cm) con el material en sus extremos. En los puntos de unión que hemos marcado y después de colocar las barras, éstas rompen el material, lo que ocasiona que las barras colapsen o dicho de mejor manera, en este caso salieran volando por la elasticidad del látex que actuó como tirachinas, como lanzadera de las barras.

Se hizo una segunda prueba reforzando los puntos donde se ligan la barra y el látex, pero se cristalizó el punto de unión por el pegante utilizado y se rompió de nuevo, con lo cual concluimos que este material no funcionó o no es aplicable en este caso.

Patrón en malla plástica b.

En el segundo ejemplo se utiliza un material de **malla plástica** como membrana que cierra el sistema de barras en doble capa. El material no tenía la suficiente rigidez para proporcionar una estabilidad adecuada al sistema. Se genera el anillo Tensegrity pero su forma final tiene pequeñas deformaciones, con lo que comprobamos que este material tampoco era el adecuado para realizar estos anillos Tensegrity de doble capa de barras y membrana continua.(Fig.71)



Figura 71. Modelo tensegrity, patrón de malla plástica. Esc_1:100
 Barra L= 20cm – malla 60cm x 20cm – red de puntos 5x5cm.

Patrón en membrana textil c.

En el tercer caso, la obtención de la forma se genera como en los ejemplos anteriores y se usa un material en **membrana textil - lycra**.

Partimos del mismo proceso descrito anteriormente, usamos un patrón en membrana textil continua, cuya forma inicial es un rectángulo (16,30 cm x 50 cm).

En este modelo tensegrity de diez barras ($L=20\text{cm}$) en doble capa, las barras se disponen en dirección oblicua o posición diagonal en forma alterna. Se unen a la membrana en sus extremos como lo muestra la imagen (Fig.72) y finalmente el sistema se cierra, primero con la unión de la primera barra y la última esquina de la de membrana y luego por la última barra con la primera esquina de la membrana.

Para la localización de las barras, primero se ha realizado una doble red de puntos localizados ortogonalmente (4,06 cm x 4,06 cm), cuya distancia es definida por la elasticidad de la membrana con respecto a la longitud de la barra en diagonal.

El equilibrio de este Tensegrity de diez barras y patrón en membrana continua se logra por la tensión de la membrana. La forma final es la continuidad de cinco paraboloides arriba y cinco paraboloides abajo, formando un doble antiprisma continuo como se observa en la imagen (Fig.72). En la vista en planta, las barras forman dobles pentágonos rotados el uno con respecto al otro.

Como conclusión podemos afirmar que el material más adecuado en este caso para la realización de los modelos, ha sido la membrana textil - lycra. Que es la que mejor responde en cuanto a características de elasticidad para generar la estabilidad del sistema y continuar con el desarrollo de otros modelos en tensegrity.



Figura 72.
 Modelo tensegrity en patrón
 de membrana textil - lycra.
 Esc_1:100

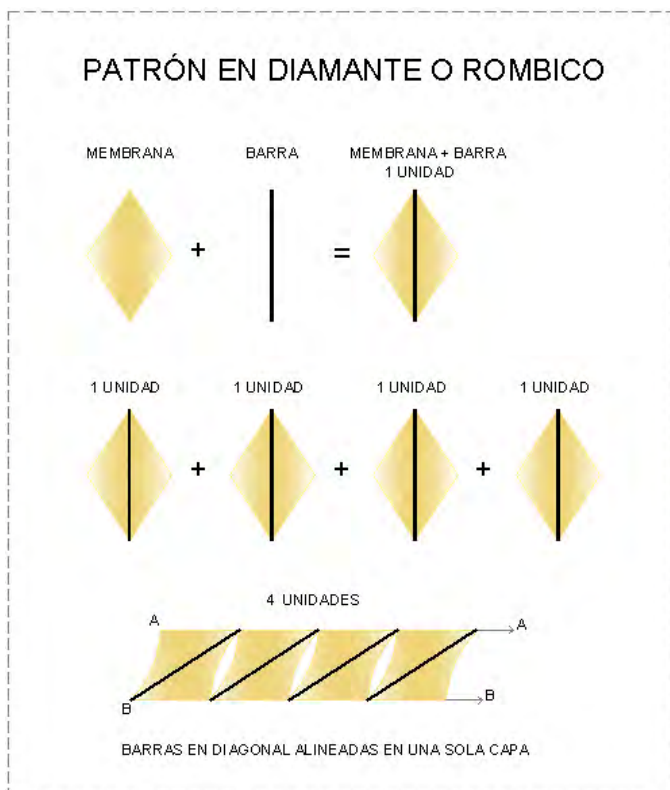
CLASIFICACIÓN PROPUESTA

Tipología 1.

Patrón en diamante con membrana y barras en capa sencilla

El proceso se genera por medio de patrones en membrana textil cortados en forma de **rombo o diamante** (eje mayor 17 cm - eje menor 12 cm) para esta unidad básica antiprisma de **4 barras** (L=20 cm). Las cuales se disponen en dirección oblicua o posición diagonal, se unen a la membrana en sus extremos como lo muestra la imagen y se ligan al siguiente patrón en uno de sus extremos libres y así sucesivamente con las siguientes piezas, hasta cerrarse el sistema con la unión de la primera barra y el último patrón de membrana; lográndose el equilibrio por la tensión de la membrana. La forma final del antiprisma en cada cara es un paraboloide logrado de un rombo plano. La disposición de las barras en este caso se ha hecho en una sola capa.

Este ejercicio se repitió con otras unidades Tensegrity de 3 barras, 5 barras, 6 barras hasta llegar a realizar los anillos Tensegrity que veremos más adelante.



UNIDAD TENSEGRITY

Figura 73. Unidad tensegrity - patrón en diamante con membrana y 4 barras en capa sencilla.
Modelo en escala 1:100

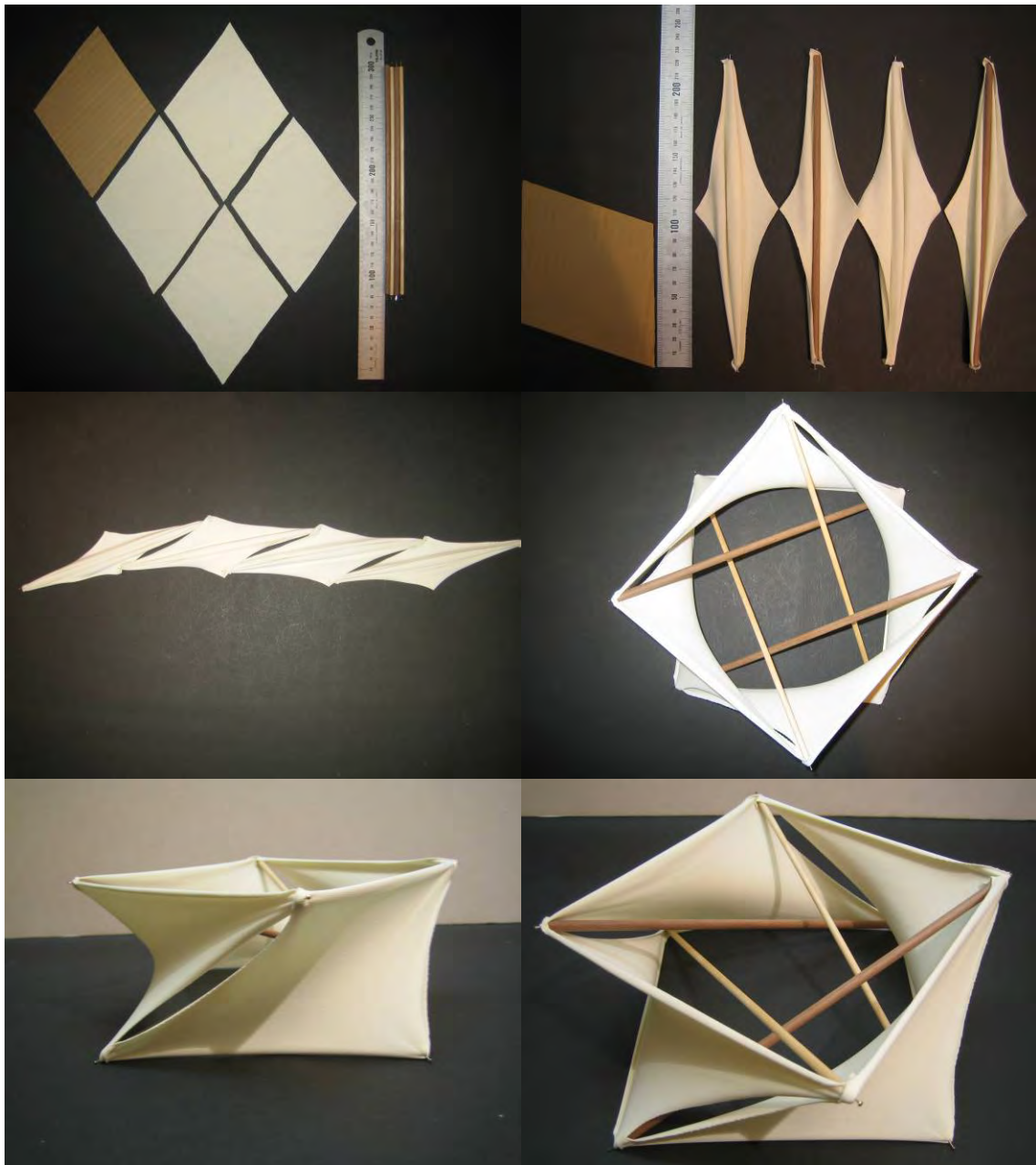


Figura 74. Tipología No. 1 - Proceso constructivo de unidad tensegrity. Esc_1:100

Tipología 2.
Patrón en membrana continua con barras en capa sencilla

Partimos del mismo proceso descrito anteriormente pero a diferencia del anterior método, la obtención de la forma se genera por medio de un patrón en **membrana continua**, cuya forma inicial es un rectángulo (15 cm x 3,75 cm). Las barras (L=10 cm) están dispuestas en una sola capa, se unen a la membrana en sus extremos como lo muestra la imagen y finalmente el sistema se cierra con la unión de la primera barra y la última esquina de la de membrana. La localización inicial de las barras está determinada por una red ortogonal de puntos (3,5 cm x 3,5 cm). El equilibrio de la unidad tensegrity antiprisma de **4 barras** y patrón en membrana continua se logra por la tensión de la membrana. La forma final es la continuidad de cuatro paraboloides.

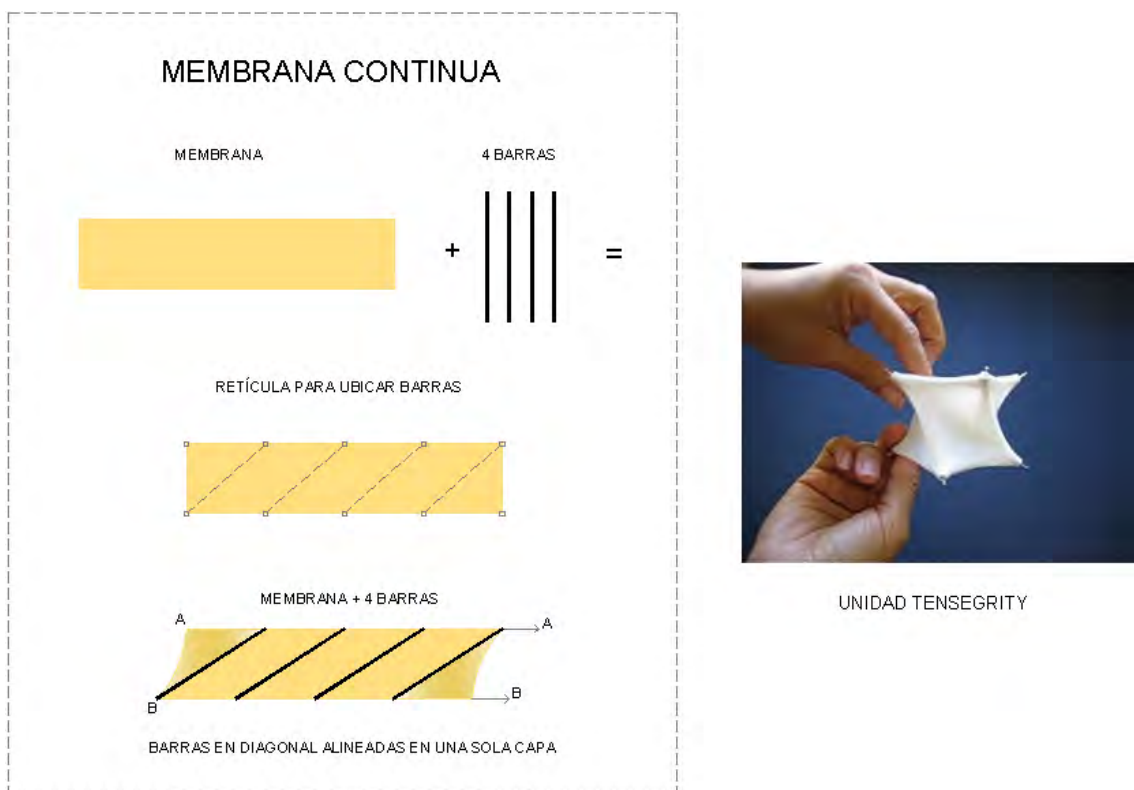


Figura 75. Unidad tensegrity - patrón en membrana continua y 4 barras en capa sencilla.
Modelo en escala 1:100

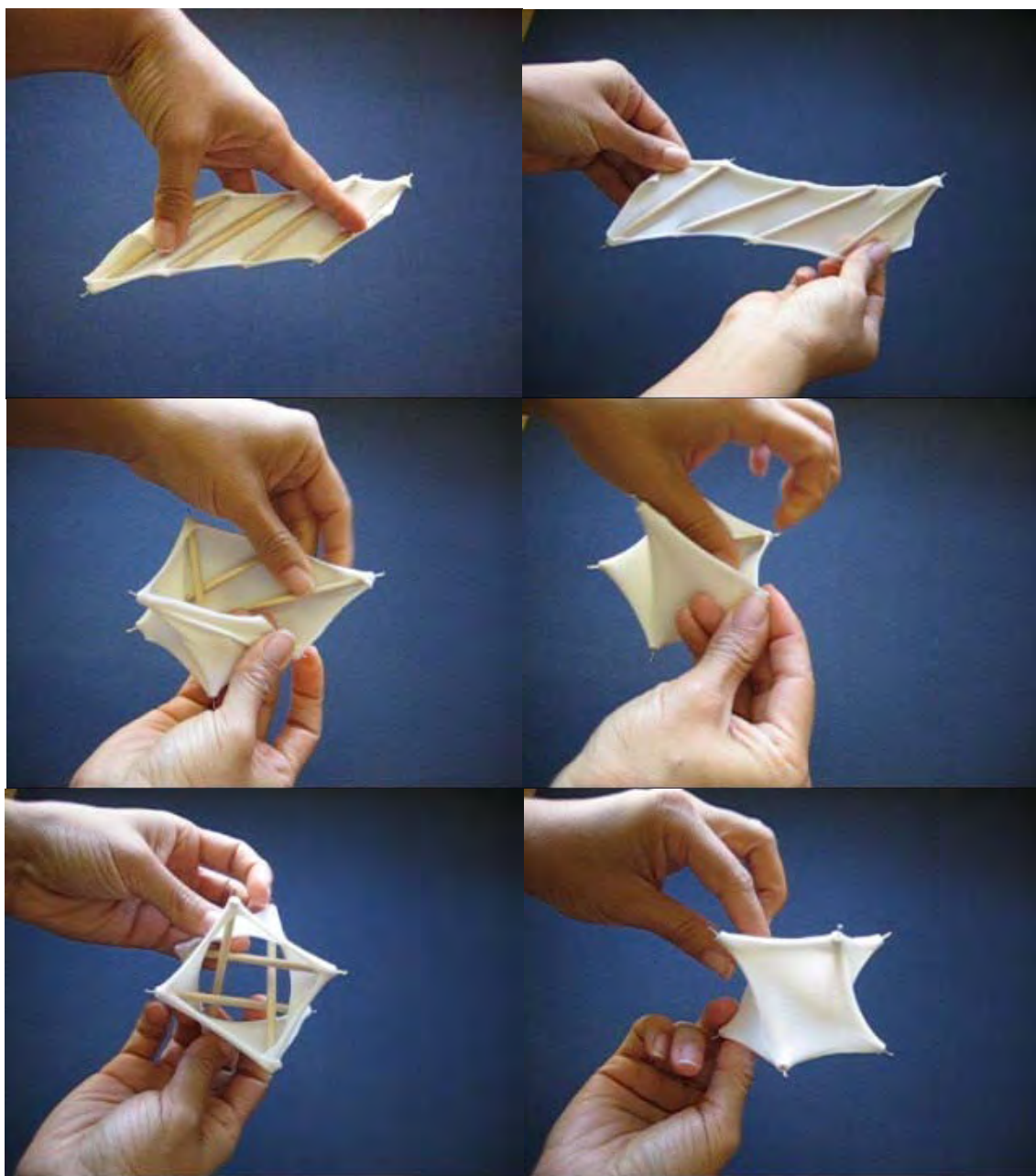


Figura 76. Tipología No. 2 - Proceso constructivo de unidad tensegrity. Esc_1:100

Tipología 3.

Patrón en membrana continua con veinte barras en doble capa

En este anillo tensegrity la obtención de la forma se genera por medio de un patrón en **membrana textil continua**, cuya forma inicial es un rectángulo (7 cm x 36,75 cm) para este modelo de **20 barras** (L=10 cm) en doble capa. Las cuales se disponen en dirección oblicua o posición diagonal en forma alterna, se unen a la membrana en sus extremos como lo muestra la imagen, semejando las nervaduras de una hoja. Finalmente el sistema se cierra con la unión de las primeras barras y las últimas esquinas de la de membrana. Para la localización de las barras primero se ha realizado una doble red ortogonal de puntos (3,5 cm x 3,5 cm) cuya distancia es definida por la elasticidad de la membrana, con respecto a la longitud de la barra en diagonal. La forma final es la continuidad de diez paraboloides arriba y diez paraboloides abajo y el diámetro del anillo es de 20 cm.

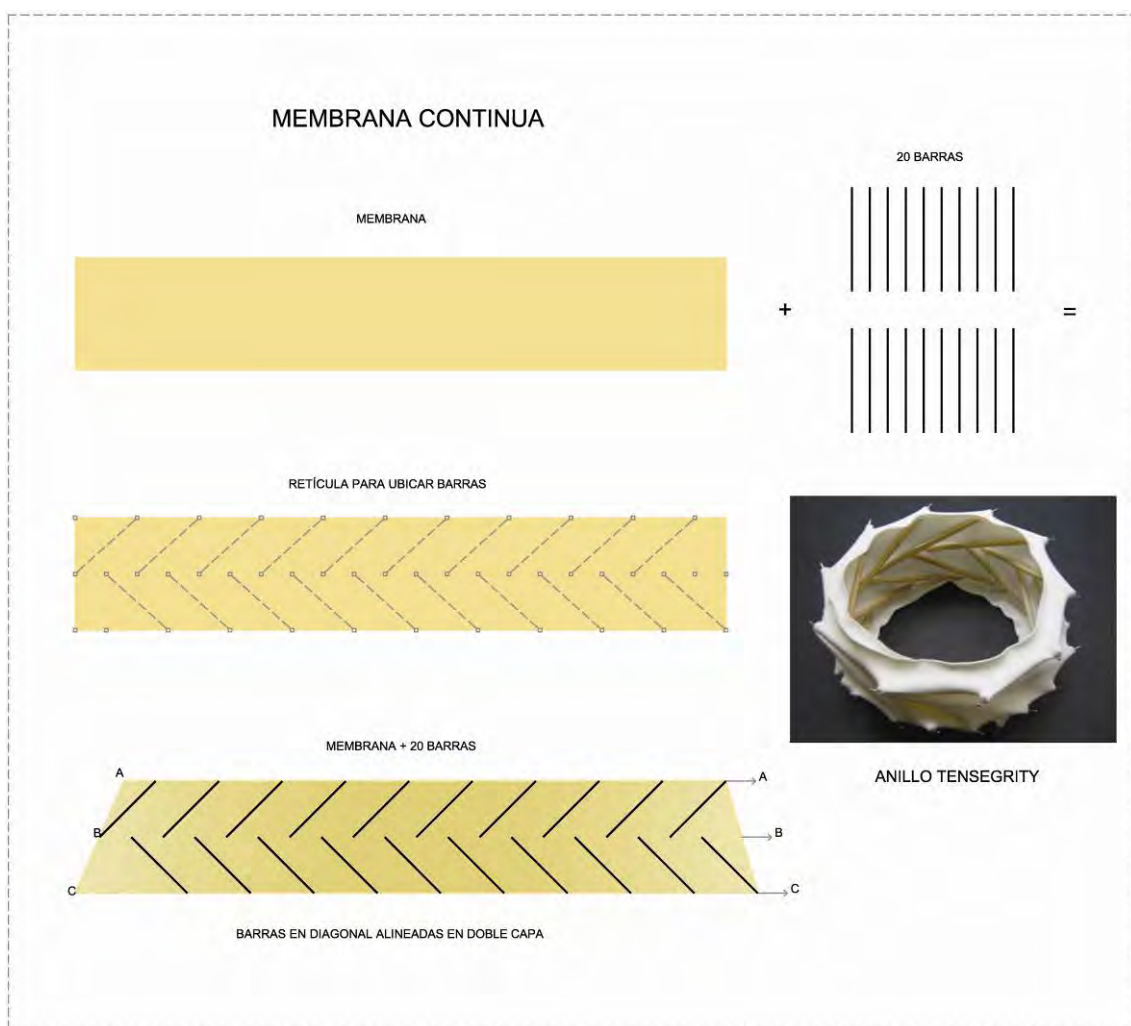


Figura 77. Anillo tensegrity - patrón en membrana continua y 20 barras en doble capa. Modelo en escala 1:100



Figura 78. Tipología No. 3 - Proceso constructivo de anillo y domo tensegrity \varnothing 20 cm. Esc_1:100

Tipología 4.

Patrón en diamante con membrana y malla con veinte barras en doble capa

La obtención de la forma se genera por medio de patrones cortados en forma de **rombo o diamante** (eje mayor 11,5 cm – eje menor 4 cm). Este modelo está formado por **20 barras** (L=20 cm) en doble capa, las cuales se disponen en dirección oblicua o posición diagonal, se unen a la membrana en sus extremos como lo muestra la imagen y se ligan al siguiente patrón en uno de los extremos libres y así sucesivamente con las siguientes piezas, incluyendo las alternas colocadas en la parte inferior, que se unen a las barras superiores en el extremo derecho del patrón, continuando con las últimas barras hasta cerrarse el sistema. La forma final es la continuidad de diez paraboloides arriba y diez paraboloides abajo, con respecto al anillo y el diámetro final es de 40 cm.

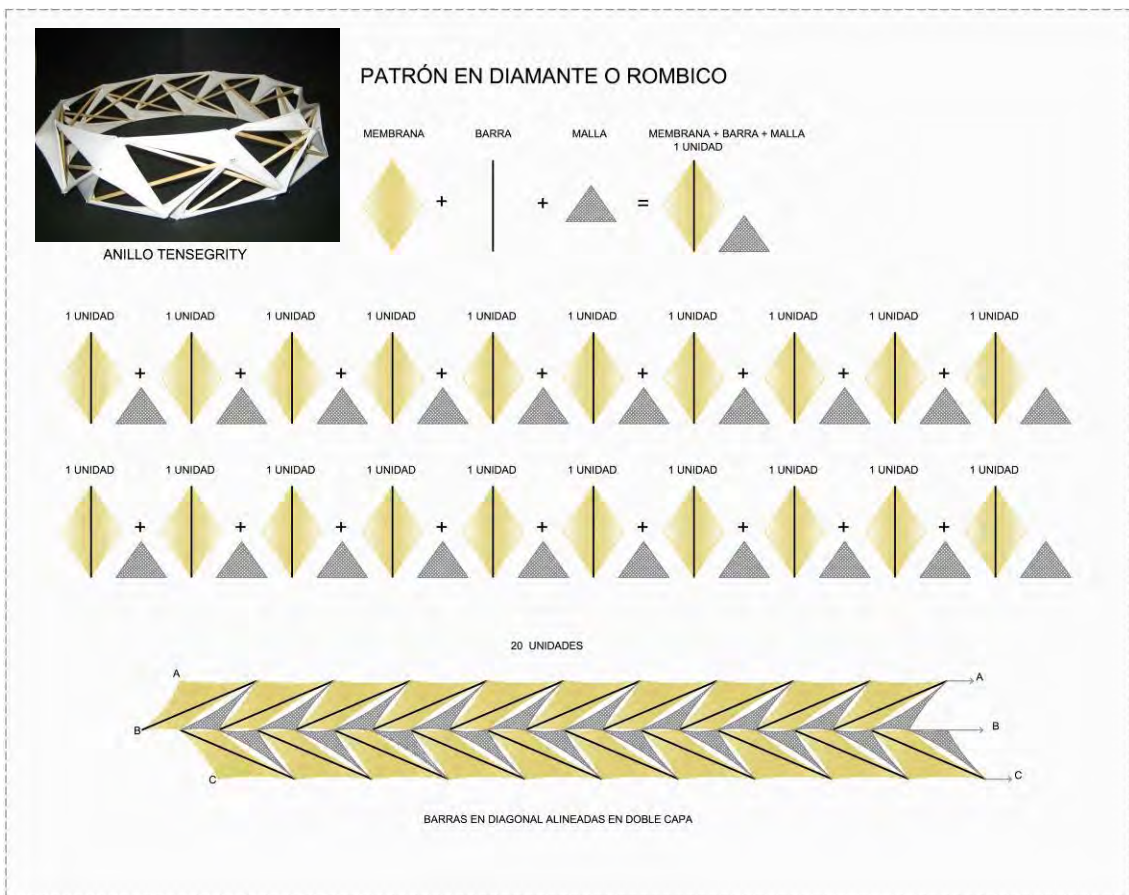


Figura 79. Anillo tensegrity - patrón en diamante con 20 barras en doble capa. Modelo en escala 1:100



Figura 80. Tipología No. 4 - Proceso constructivo de anillo y domo tensegrity Ø 40 cm. Esc_1:100

Domo en tensegrity para los anillos propuestos

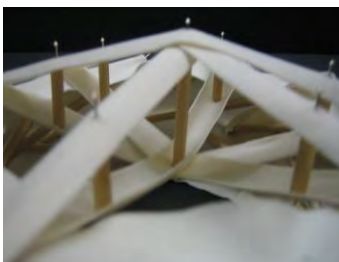


Figura 81.
Tipología No.3
Anillo y domo tensegrity.

En el caso de la tipología No.3 del **anillo tensegrity en membrana continua**, se propone para cerrar el anillo en la parte superior un domo central, que conforma un espacio libre de cualquier soporte interior.

Está formado por un mástil central (4 cm) y varios mástiles menores (5 unidades de 2 cm) colocados de forma circular, los cuales se sostienen por la tensión de la membrana que equilibra el sistema y a su vez une el domo superior con el anillo Tensegrity. (Fig.81)

En el caso de la tipología No.4 del **anillo tensegrity con patrones en forma de diamante**, para complementar el anillo en los vacíos que forman los patrones en membrana, al ser estos discontinuos, se forman superficies planas triangulares (20 unidades), las cuales son remplazadas por medio de una malla, como se observa en la figura 82.

Para cerrar el anillo en la parte superior se propone un domo central que conforma un espacio libre de cualquier soporte interior, como en el caso anterior. Está formado por un mástil central ($L= 9\text{cm}$) y 10 ($L= 6,5\text{ cm}$) mástiles menores, colocados de forma circular. Los cuales se sostienen por la tensión de la membrana que equilibra el sistema y a su vez une el domo superior con el anillo Tensegrity.

En este caso la capa superior del modelo es en membrana textil y la inferior en malla, con lo cual se puede observar la colocación de los mástiles y de las barras en general dentro de la estructura. Finalmente logramos una estructura completamente en Tensegrity con un diámetro de 40 cm.

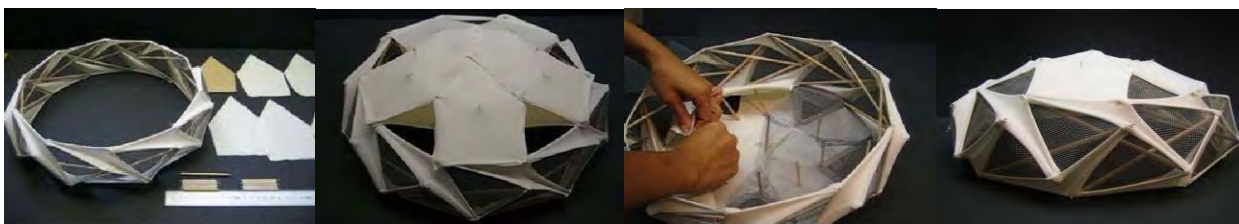


Figura 82. Tipología No. 4 - Anillo y domo tensegrity.



Figura 83.
Prueba de peso de los elementos del modelo.



Figura 84.
Modelo tensegrity.
Vista en planta - Ø 100 cm.

Si comparamos este modelo (Tipología No.4) diámetro 40 cm, con el de membrana continua (Tipología No.3) diámetro 20 cm, se observa que el diámetro es mayor, el doble.

Por lo cual hemos elegido el modelo del anillo tensegrity de patrón en diamante, para continuar con el análisis estructural. En capítulos posteriores se hará la comprobación estructural del modelo por medio del programa WinTess, para verificar su equilibrio y su comportamiento ante fuerzas externas como viento y nieve.

Prototipo de 100 cm de diámetro

Los modelos construidos pueden ser escalados. Para obtener un diámetro mayor, hay dos opciones:

- Primero, la cantidad de barras puede ser incrementada proporcionalmente, pero esto depende de la elasticidad de la membrana usada.
- Segundo, si se incrementa la longitud de las barras, el diámetro del anillo tensegrity aumentará.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tomó el modelo de la tipología No. 4 y se construyó otro prototipo con un diámetro mayor de 100 cm. Usando 20 barras con una longitud de 50 cm y con posición diagonal en doble capa. Se escaló 2.5 veces. (Fig.84,85)

Podemos concluir que la relación de la longitud de las barras con respecto al diámetro del modelo es de 1:2

Se tuvo también en cuenta el peso de los elementos que conforman el modelo, barras en madera de balsa y membrana en lycra. Se hicieron dos pruebas: (Fig.83)

- Primer caso: barras del anillo L=50cm Ø8mm + mástil central L=22,5cm Ø6mm + mastiles menores L=16,25cm Ø6mm + membrana=580 gr.
- Segundo caso: barras del anillo L=50cm Ø 6mm + mástil central L=22,5cm Ø4mm + mastiles menores L=16,25cm Ø4mm + membrana=490 gr.

Diferencia de peso entre los dos casos = 80gr. Esto quiere decir que con este modelo tensegrity de diámetro 100cm, se logró cubrir una superficie de 7854 cm² con un peso de 490gr.



Figura 85. Tipología No. 4 - Proceso constructivo de modelo tensegrity Ø 100 cm. Esc_1:100

RESUMEN DE LA PROPUESTA

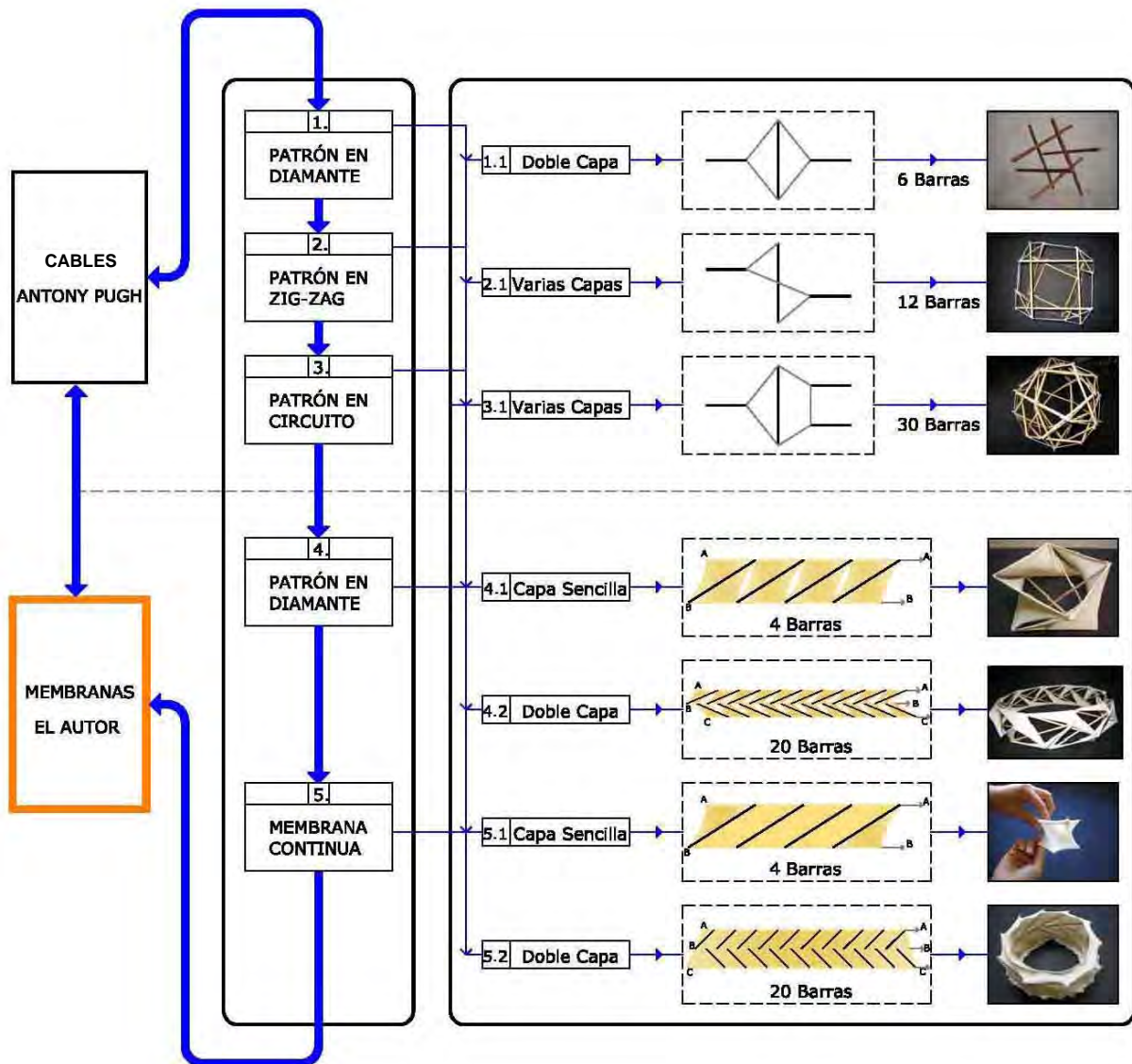


Figura 86. Esquema comparativo: clasificación Anthony Pugh & clasificación propuesta.

MODELOS INFORMÁTICOS 2.3

AUTOCAD Y WINTESS 2.3.1

Para la comprobación estructural del modelo propuesto, se utilizan los programas informáticos:

- Autocad como herramienta de dibujo.
- WinTess como herramienta de dibujo y cálculo. (Software de investigación desarrollado por Ramon Sastre - Ver Apéndice B).

En el análisis estructural el modelo se prueba ante su propio peso, pretensado y ante cargas externas de viento y nieve. Como resultado obtenemos el equilibrio de la estructura en tensegrity.

AUTOCAD

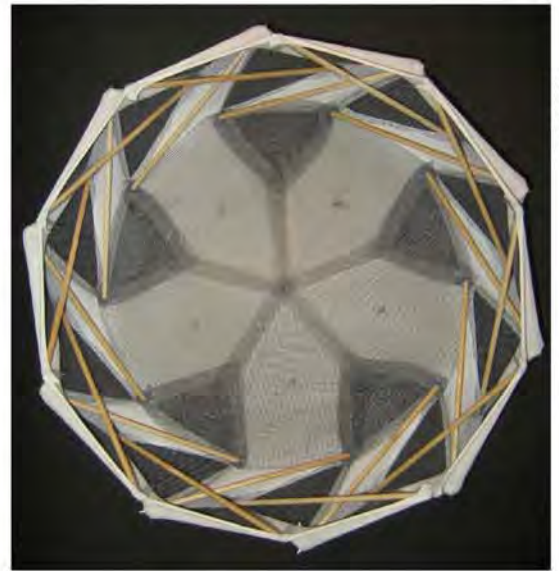
Se parte del modelo elegido (Tipología No.4) tomando las coordenadas (x,y,z) de cada punto de la estructura basados en una malla ortogonal.

Se hizo un primer ejercicio con un modelo cuyas barras tienen una longitud de 15 cm.

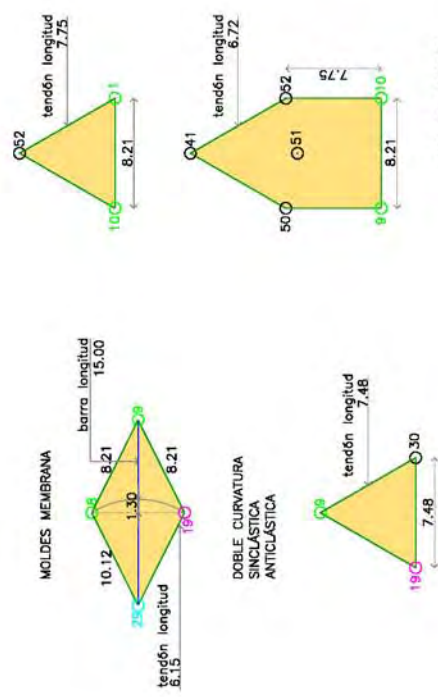
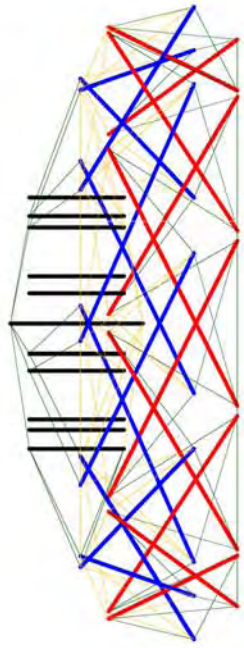
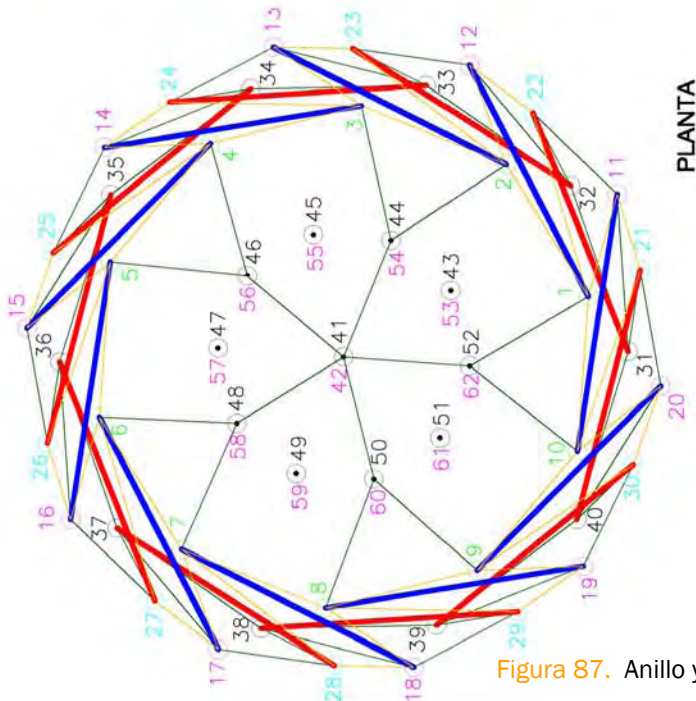
Para dibujar el anillo exterior en tensegrity, se definen cuarenta puntos, que son el resultado de la posición de las veinte barras en el espacio, las cuales se ubican en cuatro niveles o alturas diferentes como se puede observar en la figura 87.

Las barras de la primera capa parten del nivel 0.00 y llegan al nivel +6.80 y las barras que inician la segunda capa parten del nivel +2.30 y llegan al nivel +8.30.

Para el desarrollo del domo central se ubica el mástil principal en el nivel +5.00 y llega al nivel +12.00, lo que quiere decir que tiene una longitud de 7 cm. Los diez mástiles circundantes parten del nivel +6.00 y finalizan en el nivel +11.00 o sea que tienen una longitud de 5 cm. Los once mástiles generan veintidós puntos en el espacio con lo cual ya tenemos las coordenadas totales (62 puntos) del modelo para dibujarlo en tres dimensiones en el Autocad.



FOTOS



PATRONES

PUNTOS	X	Y	Z	PUNTOS	X	Y	Z	PUNTOS	X	Y	Z
1	3.18	-12.90	8.30	31	8.38	-15.84	8.87	41	0	0	12.00
2	10.17	-8.56	8.30	32	13.88	-8.87	8.80	42	0	0	8.00
3	13.20	-0.84	8.30	33	19.28	-0.46	8.80	43	3.51	-5.54	11.00
4	11.28	7.03	8.30	34	13.46	8.16	8.80	44	8.15	-2.50	11.00
5	5.00	12.52	8.30	35	5.27	15.34	8.80	45	5.45	1.56	11.00
6	-3.18	12.90	8.30	36	-4.28	15.84	8.87	46	4.28	5.08	11.00
7	-10.17	8.56	8.30	37	-13.88	8.87	8.80	47	8.83	11.00	11.00
8	-13.20	0.84	8.30	38	-18.28	0.46	8.80	48	-2.51	9.84	11.00
9	-11.28	-7.03	8.30	39	-13.46	-8.16	8.80	49	-8.15	2.50	11.00
10	-5.00	-12.52	8.30	40	-3.27	-15.34	8.80	50	-8.45	-1.56	11.00
11	8.59	-14.42	2.30	41	5.28	-18.89	3	51	-4.28	-8.08	11.00
12	15.43	-8.82	2.30	42	9.46	-11.89	3	52	-4.47	-8.83	11.00
13	18.39	3.71	2.30	43	14.23	-4.28	3	53	3.51	-5.54	8.00
14	11.07	12.83	2.30	44	14.17	8.80	3	54	8.45	1.56	8.00
15	1.53	18.75	2.30	45	8.49	13.20	3	55	4.28	5.08	8.00
16	-8.59	14.43	2.30	46	-2.28	14.89	3	56	4.28	5.08	5.00
17	-18.43	8.82	2.30	47	-8.05	11.89	3	57	0.47	8.83	5.00
18	-18.39	-3.71	2.30	48	-14.23	4.28	3	58	-3.51	5.54	5.00
19	-11.07	-12.83	2.30	49	-14.17	-8.80	3	59	-8.16	2.50	5.00
20	-1.53	-18.75	2.30	50	-8.49	-13.20	3	60	-8.45	-1.56	5.00
				51	-4.28	-8.08	3	61	-4.28	-8.08	5.00
				52	-4.47	-8.83	3	62	-0.47	-8.83	5.00

MATERIAL: BARRAS: MADERA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUMINO MEMBRANA: TEXTIL

AXONOMETRIA

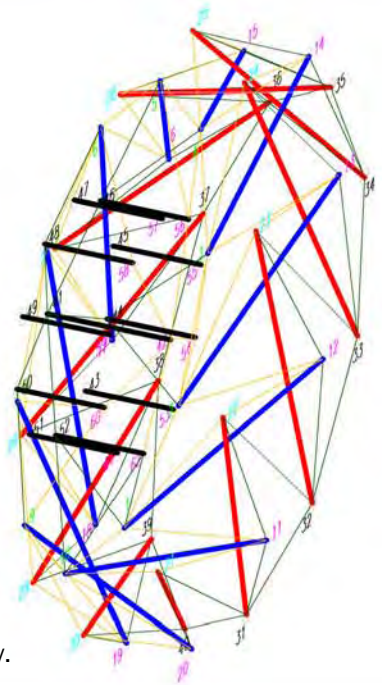
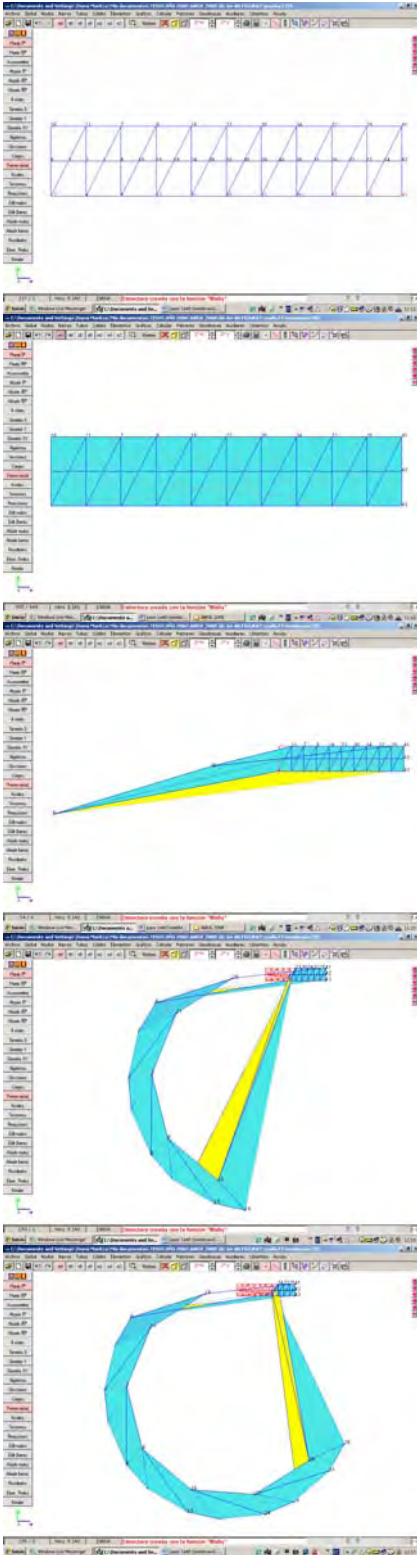


Figura 87. Anillo y domo en tensegrity.



Para lograr el anillo de diámetro de 40 cm. se usaron barras de 20 cm. Y los 4 niveles a donde llegan las barras son 0.00, +3.00, + 8.95 y +10.95.

Como en el caso anterior para el desarrollo del domo central, se ubica el mástil principal en el nivel +6.50 y llega al nivel +15.50, lo que quiere decir que tiene una longitud de 9 cm. Los diez mástiles circundantes parten del nivel +8.00 y finalizan en el nivel +14.50 o sea que tienen una longitud de 6.50 cm.

Así tenemos veintidós puntos del domo, más 40 puntos del anillo, en total son 62 puntos en el espacio, con lo cual ya tenemos las coordenadas totales del modelo para dibujarlo en tres dimensiones en el Autocad. Esta información se reúne en una ficha técnica, que nos sirve de base para exportar los datos.

Después de tener nuestro objeto dibujado en tres dimensiones, se puede exportar directamente como un archivo de dibujo (dxf) o como un archivo de datos (pad) al programa de cálculo.

WINTESS

Igual que en el caso anterior, la obtención de la forma, se puede generar a partir de otro programa informático, el WinTess, que es un programa de cálculo de estructuras ligeras. Calcula estructuras de barras en tres dimensiones, barras biarticuladas, barras que aguantan tracción y compresión [24].

Figura 88. Anillo tensegrity creado con WinTess.

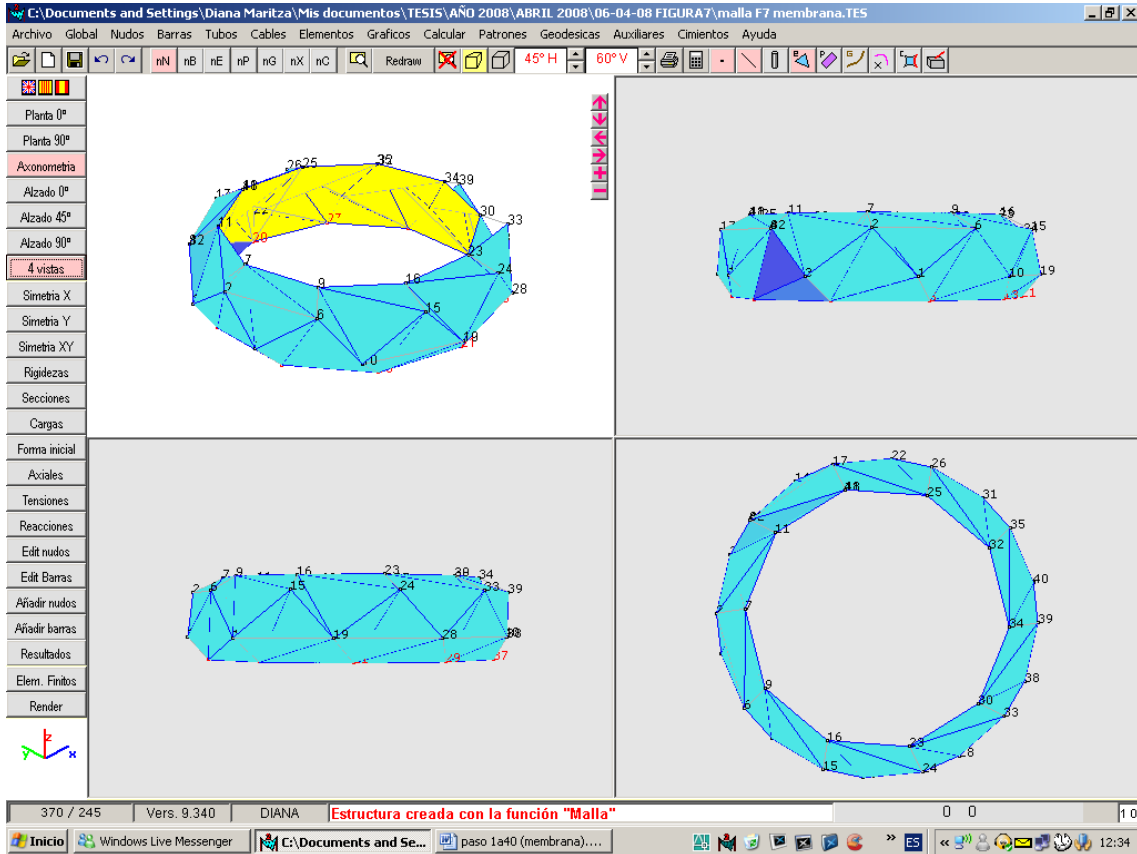


Figura 89. Anillo tensgrity creado con WinTess.

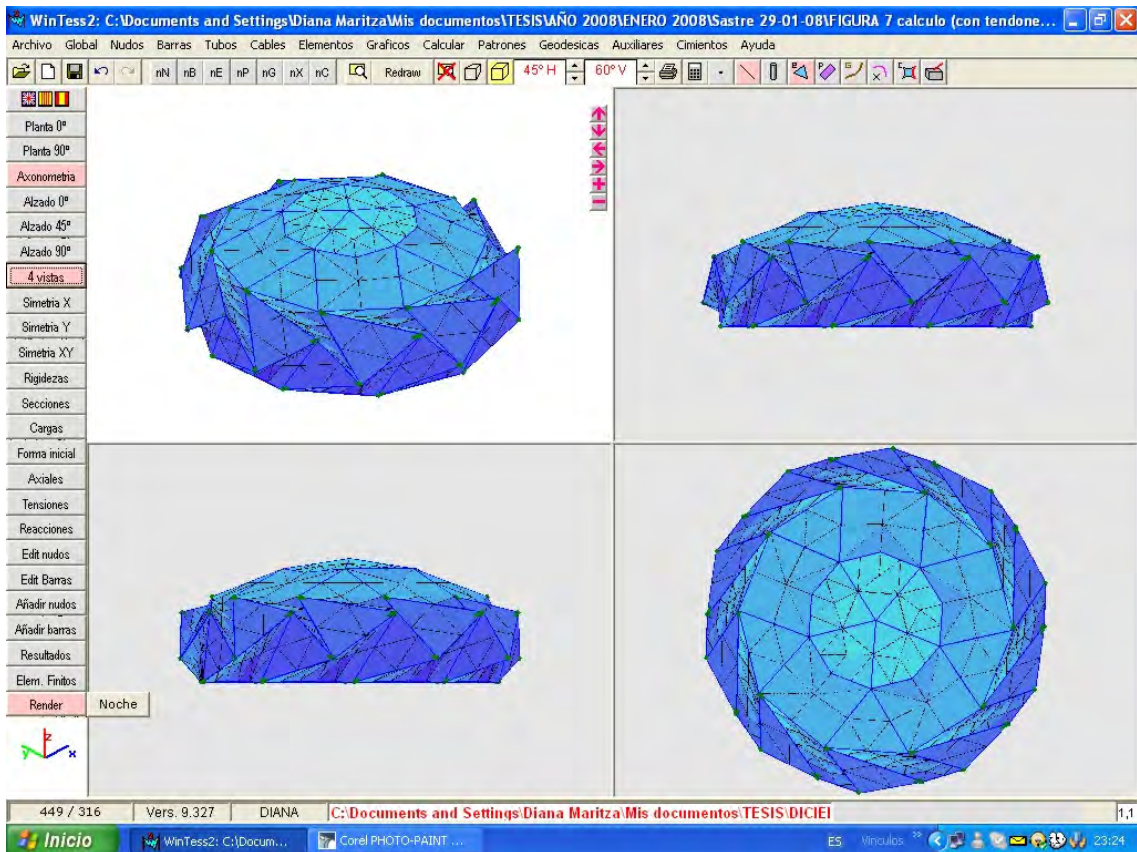


Figura 90. Anillo y domo en tensgrity dibujados con WinTess.

Para dibujar el anillo tensegrity, se parte de una malla ortogonal de 43 puntos cuyas coordenadas (x,y,z) provienen del modelo elegido. En esta aplicación aparecen 3 puntos más que en el caso anterior, porque son necesarios para cerrar el anillo. Las coordenadas se pueden ingresar punto a punto dentro del programa o se pueden insertar por medio de un archivo pad. También se pueden importar dxf desde el Autocad, como lo mencionamos anteriormente.

Luego se reenumeran todos los números, para que sean de fácil lectura dentro del programa y al activar la orden obtención de la forma, vemos como punto a punto se va generando el anillo a partir de la malla plana (Figura 88,89). De esta forma hemos demostrado que se puede crear un anillo tensegrity desde WinTess.

En la figura 90 vemos el anillo y domo tensegrity dibujados completamente, aquí importamos directamente el archivo desde Autocad. Pero en este caso hemos usado la ayuda de generación de elementos para crear la superficie de los mismos. Después de tener nuestro objeto completamente dibujado se procede a materializar las barras, si son barras de membranas, barras de cables, barras de tubos, etc. Esto quiere decir que les asignamos las características estructurales correspondientes para luego proceder al cálculo.

Este mismo ejercicio se realizó con otros modelos en tensegrity, como son:

- Unidad tensegrity de 3 barras en capa sencilla. (Figura 91,97)
- Unidad tensegrity de 6 barras en capa sencilla. (Figura 92,98)
- 6 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla. (Figura 93,99)
- 12 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla. Toro geométrico con mástil central. (Figura 94,100)
- Anillo tensegrity de 10 barras en doble capa con membrana continua. (Figura 95,101)
- Domo tensegrity de 12 barras en doble capa con membrana en forma de diamante o rómbica, con mástil central. (Figura 96,102)

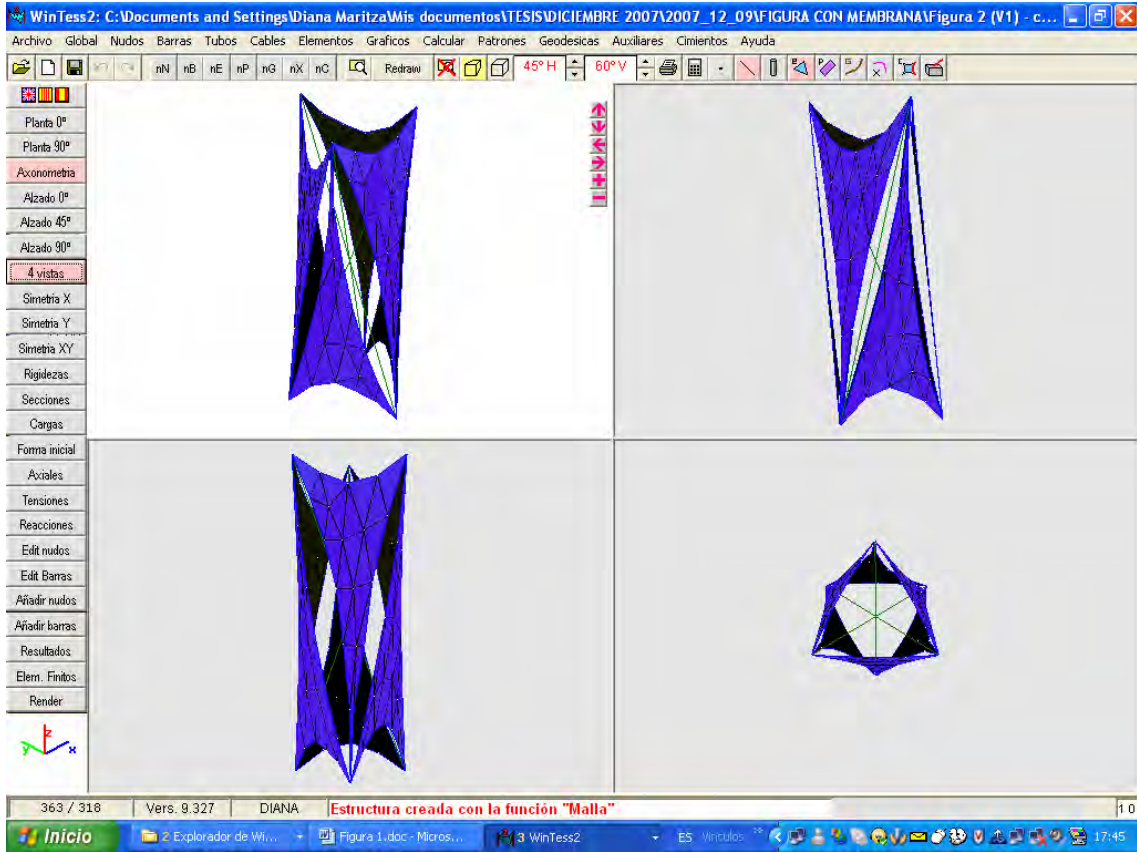


Figura 91. Unidad tensegrity de 3 barras en capa sencilla.

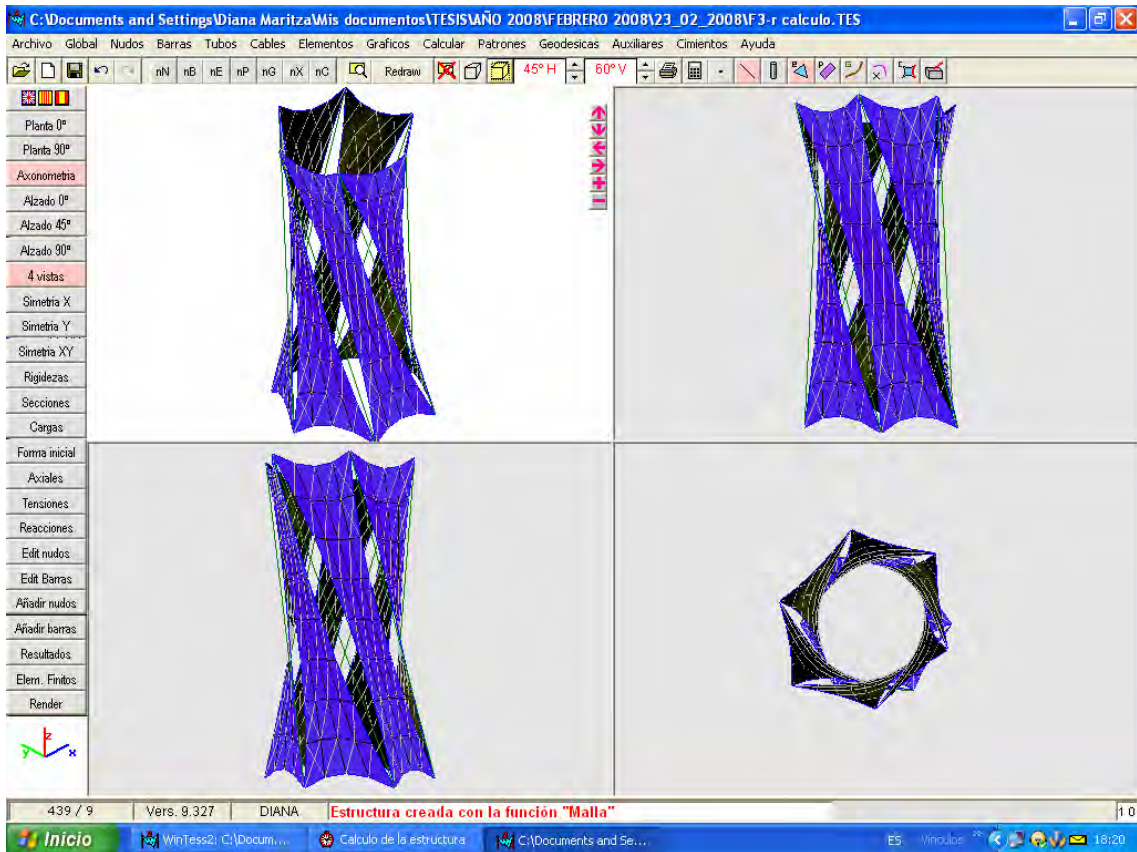


Figura 92. Unidad tensegrity de 6 barras en capa sencilla.

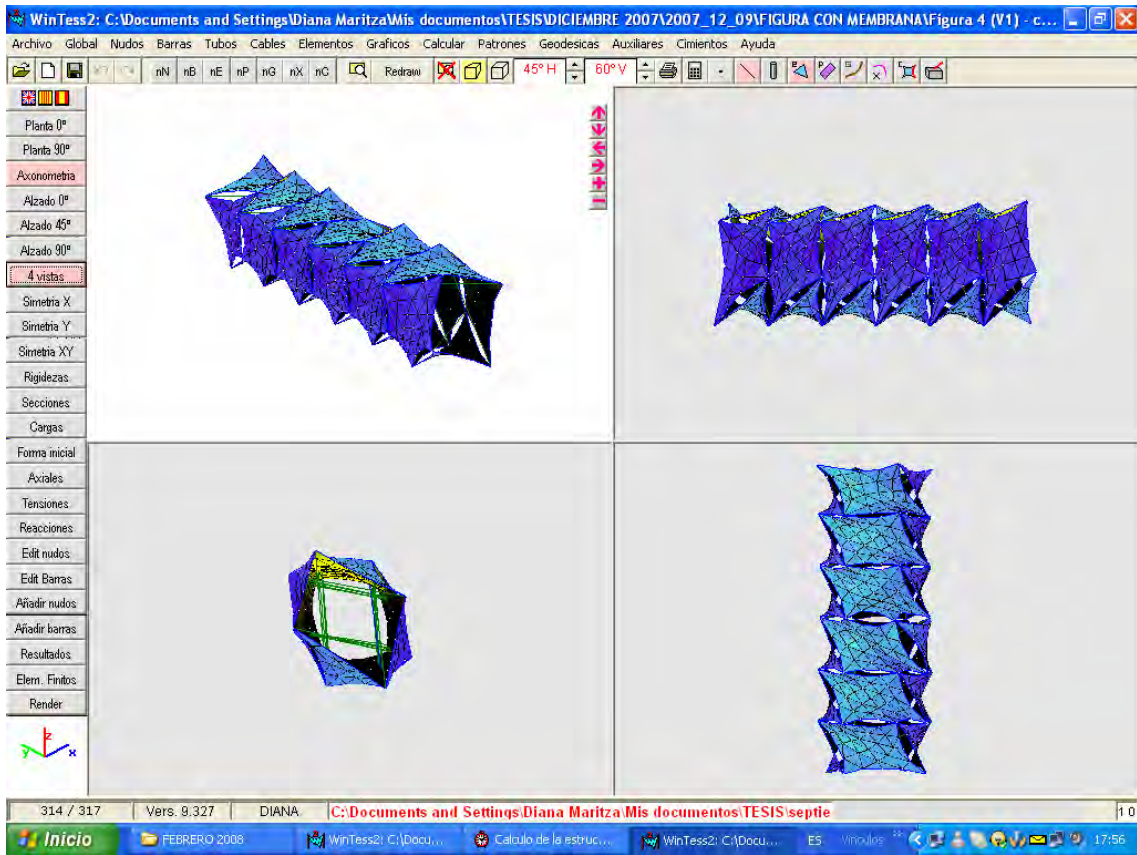


Figura 93. 6 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla.

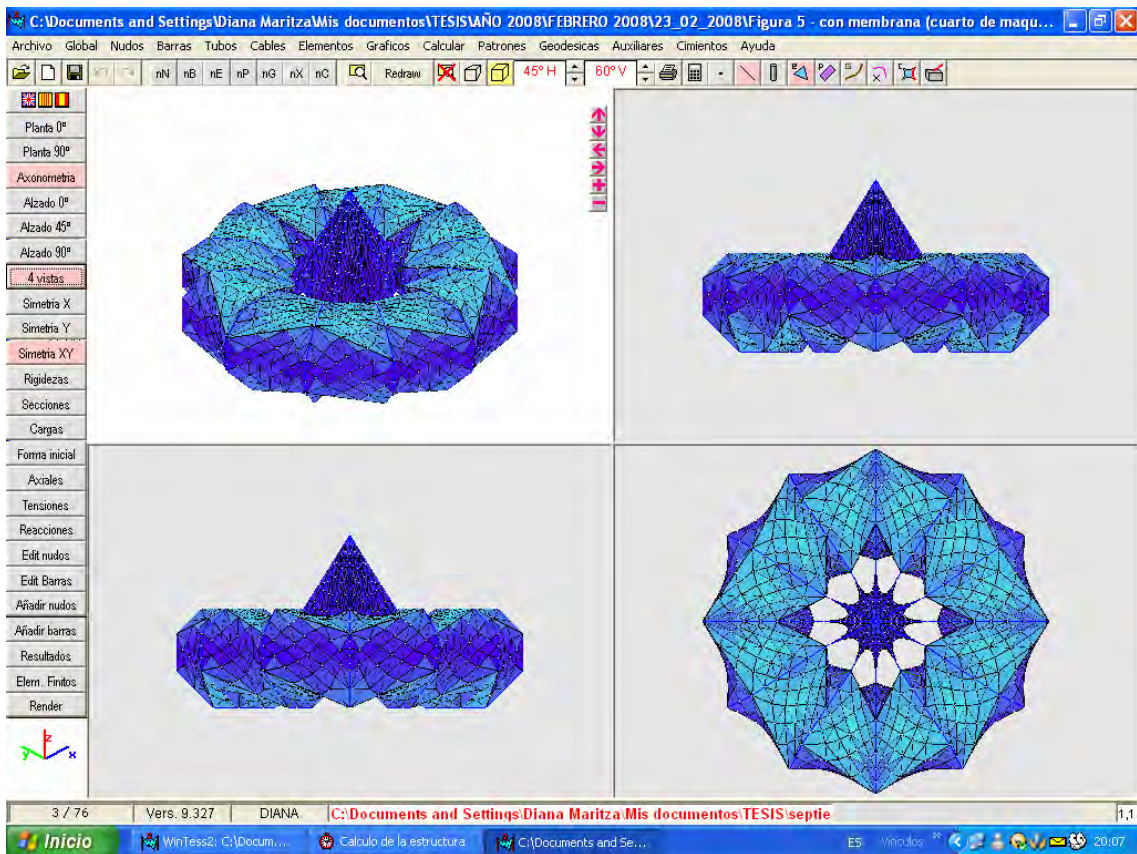


Figura 94. 12 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla. Toro geométrico con mástil central.

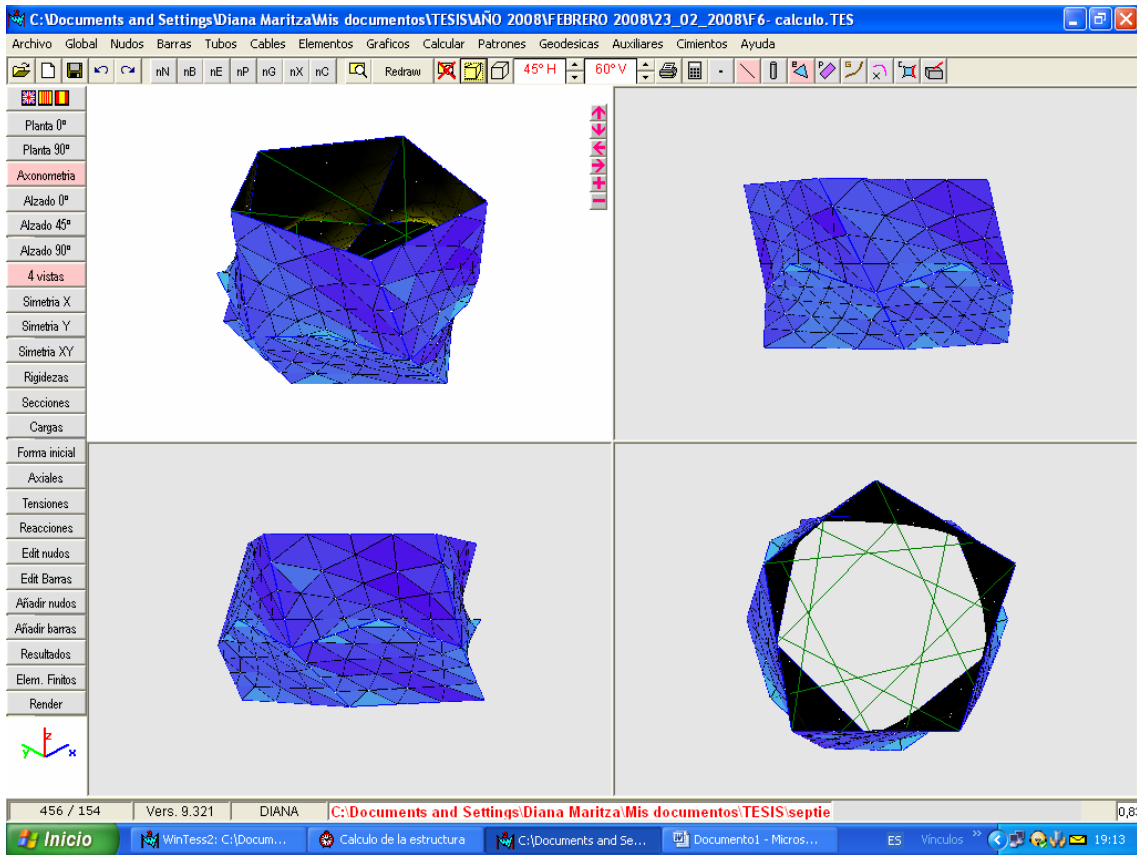


Figura 95. Anillo tensegrity de 10 barras en doble capa con membrana continua.

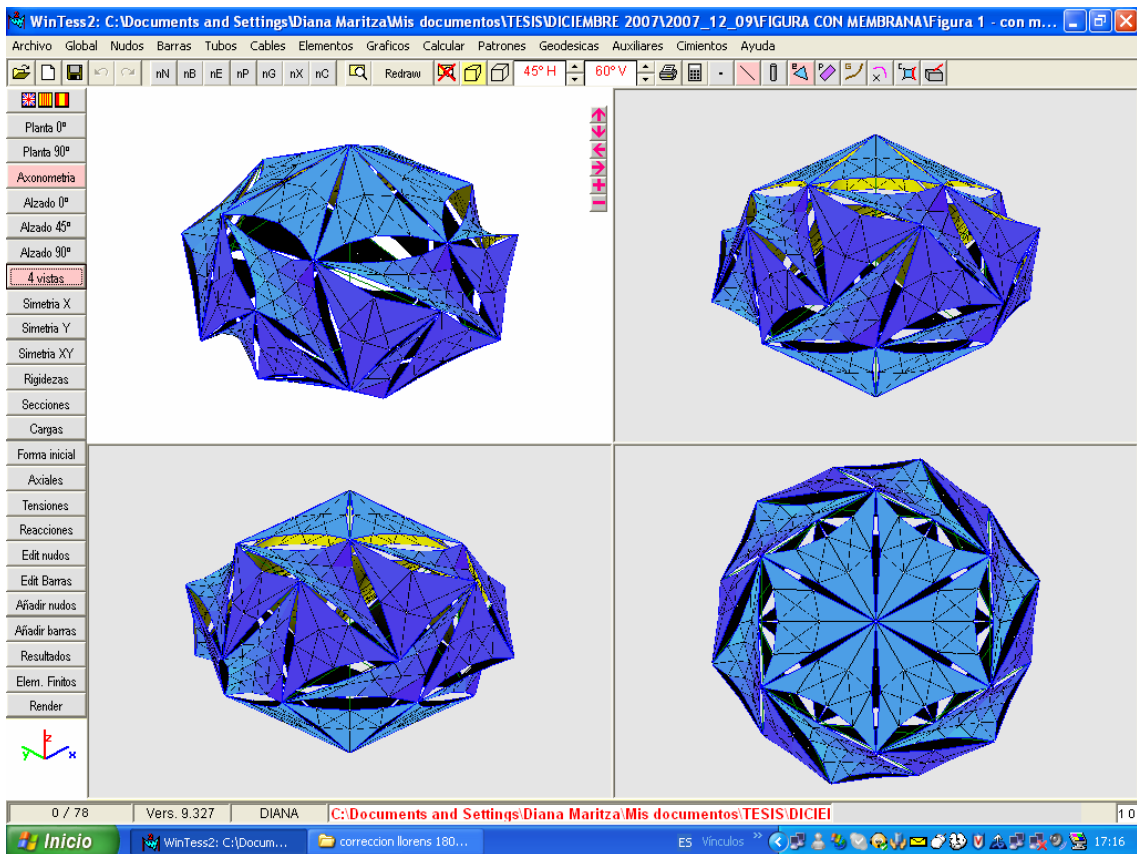


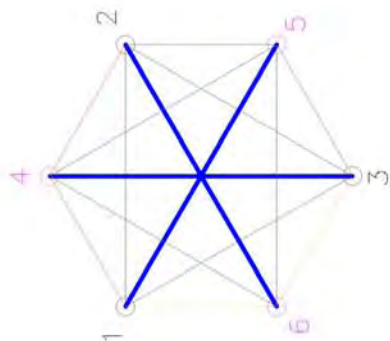
Figura 96. Domo tensegrity de 12 barras en doble capa con membrana en forma de diamante o r6mbica, con m6stil central.



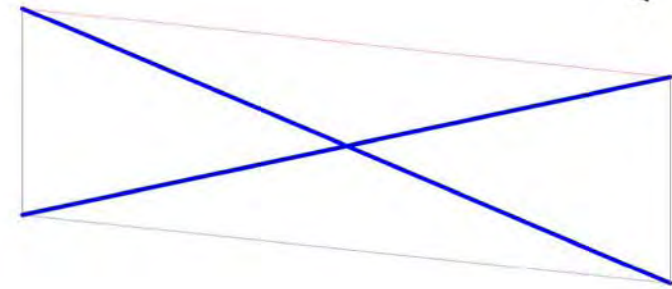
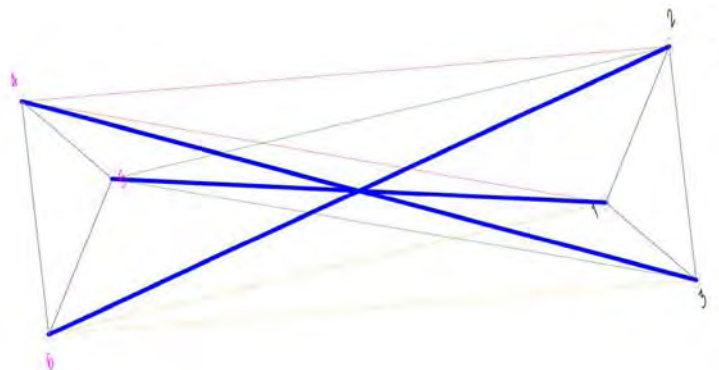
FOTOS



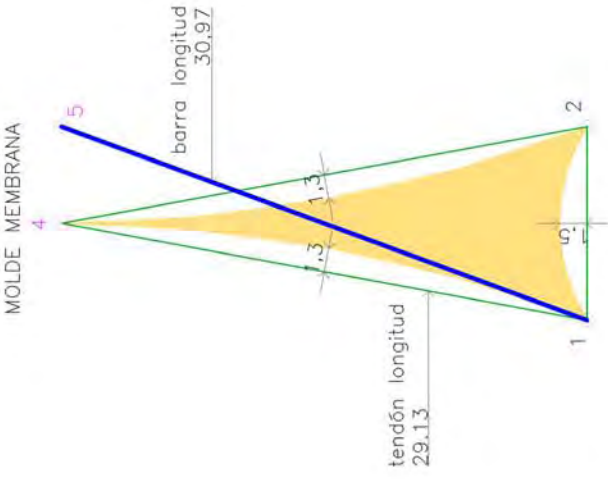
PLANTA



AXONOMETRÍA



ALZADO



PUNTOS	X	Y	Z
1	-4.75	8.22	0
2	4.75	8.22	0
3	9.50	0	0
4	4.75	-8.22	28.50
5	-4.75	-8.22	28.50
6	-9.50	0	28.50

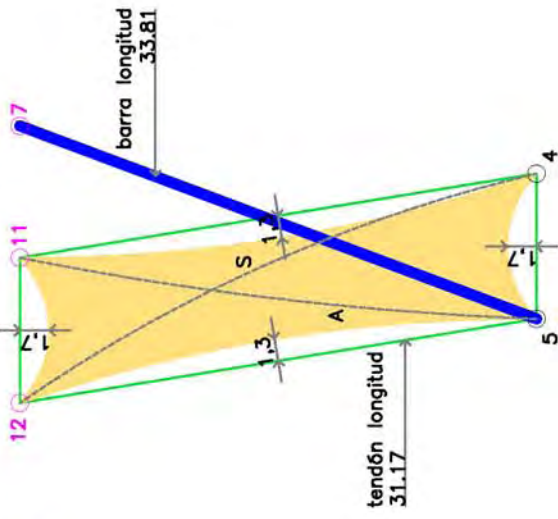
MATERIAL:

BARRAS: MADERA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUMINIO

MEMBRANA: TEXTIL

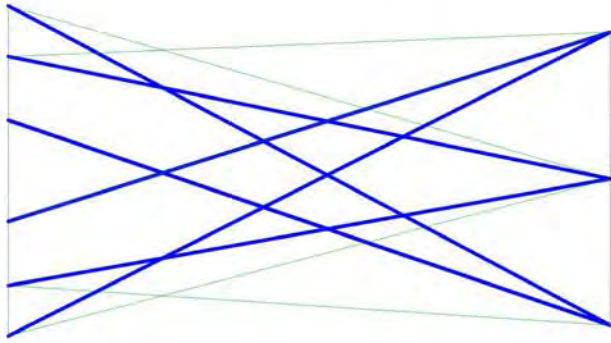
Figura 97. Unidad tensegrity de 3 barras en capa sencilla.

MOLDE MEMBRANA



DOBLE CURVATURA
SINCLÁSTICA
ANTICLÁSTICA

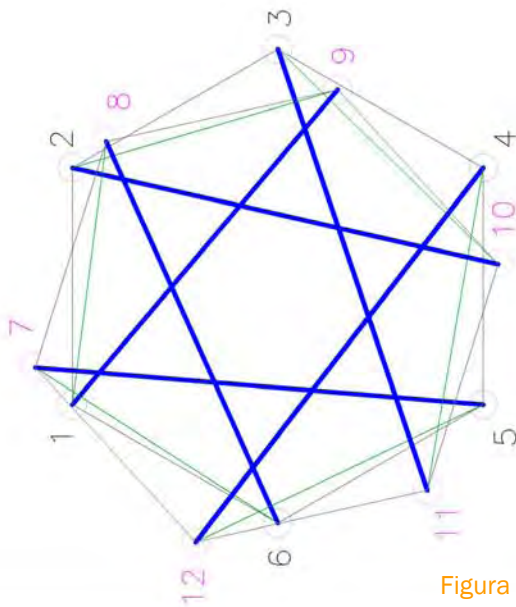
PATRÓN



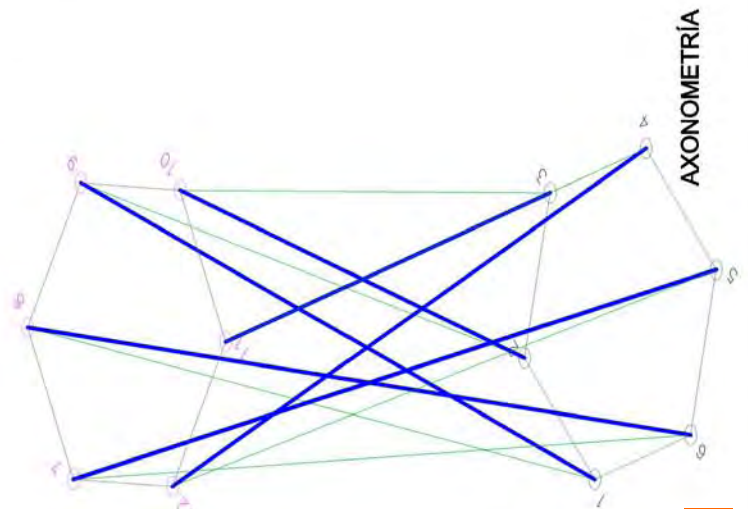
ALZADO



FOTOS



PLANTA



AXONOMETRÍA

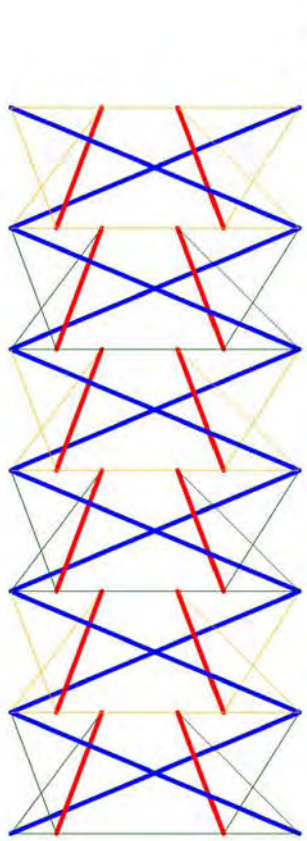
PUNTOS	X	Y	Z
1	-4.15	7.18	0
2	4.15	7.18	0
3	8.30	0	0
4	4.15	-7.18	0
5	-4.15	-7.18	0
6	-8.30	0	0
7	-2.85	8.48	29.5
8	5.07	6.00	29.5
9	6.88	-2.09	29.5
10	0.77	-7.71	29.5
11	-7.14	-5.23	29.5
12	-8.95	2.86	29.5

MATERIAL:

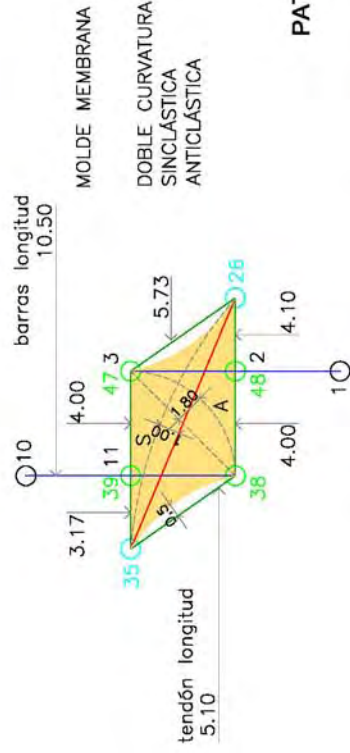
BARRAS: MADERA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUMINIO

MEMBRANA: TEXTIL

Figura 98. Unidad tensegrity de 6 barras en capa sencilla.



ALZADO



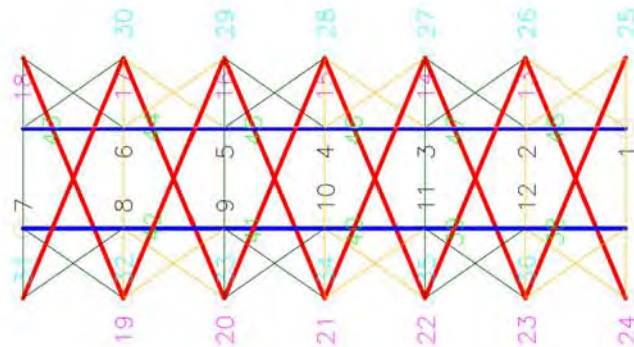
PATRÓN

PUNTOS	X	Y	Z	PUNTOS	X	Y	Z
1	0	0	0	25	2.80	0	0.50
2	0	4	0	26	2.80	4	0.50
3	0	8	0	27	2.80	8	0.50
4	0	12	0	28	2.80	12	0.50
5	0	16	0	29	2.80	16	0.50
6	0	20	0	30	2.80	20	0.50
7	-4	24	0	31	-0.80	24	0.00
8	-4	20	0	32	-0.80	20	0.00
9	-4	16	0	33	-0.80	16	0.00
10	-4	12	0	34	-0.80	12	0.00
11	-4	8	0	35	-0.80	8	0.00
12	-4	4	0	36	-0.80	4	0.00
13	2.8	4	2.50	37	-4	0	0.50
14	2.8	8	2.50	38	-4	4	0.50
15	2.8	12	2.50	39	-4	8	0.50
16	2.8	16	2.50	40	-4	12	0.50
17	2.8	20	2.50	41	-4	16	0.50
18	2.8	24	2.50	42	-4	20	0.50
19	-6.8	20	4.00	43	0	24	0.50
20	-6.8	16	4.00	44	0	20	0.50
21	-6.8	12	4.00	45	0	16	0.50
22	-6.8	8	4.00	46	0	12	0.50
23	-6.8	4	4.00	47	0	8	0.50
24	-6.8	0	4.00	48	0	4	0.50

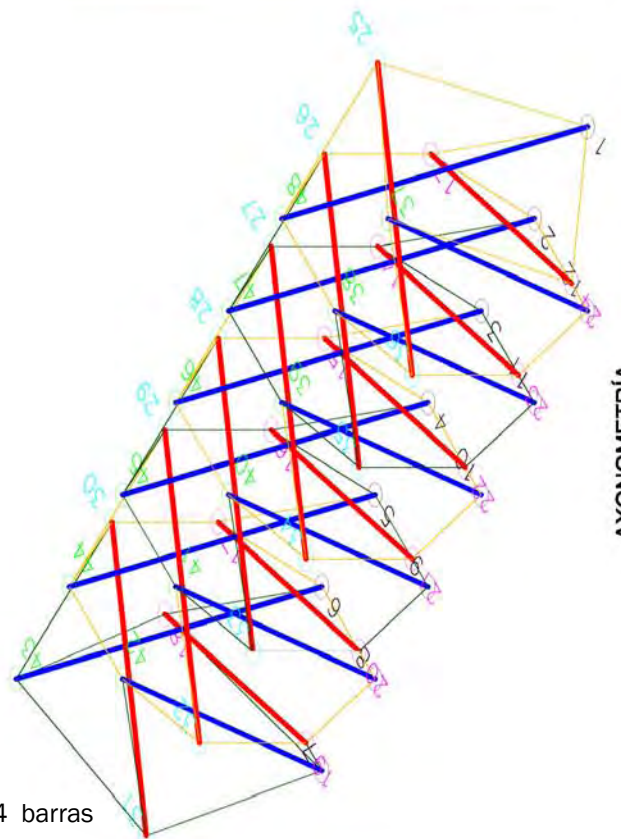
MATERIAL:
BARRAS: MADERA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUMINO
CERRAMIENTO: LONA, TEXTIL



FOTOS

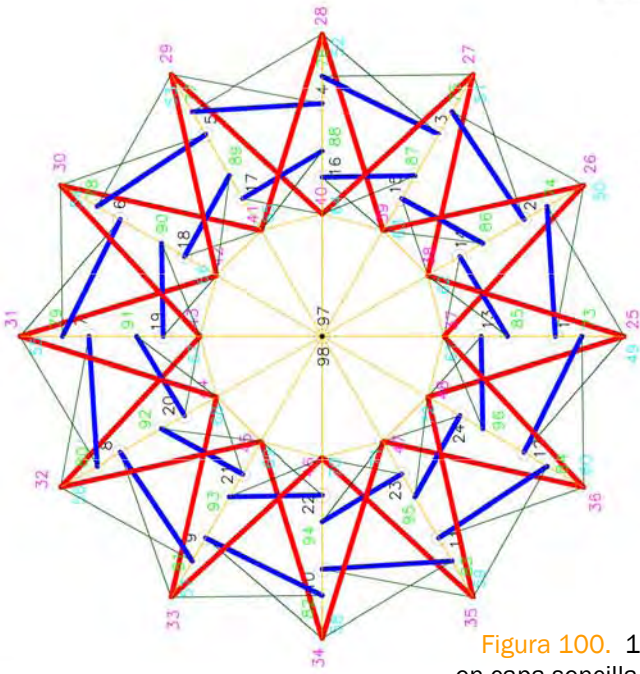


PLANTA



AXONOMETRÍA

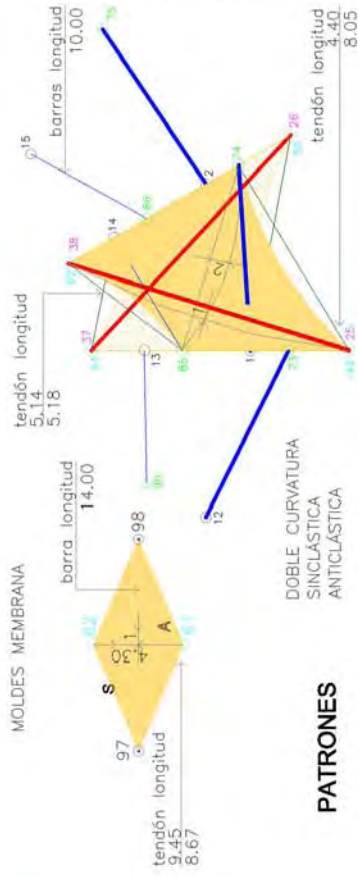
Figura 99. 6 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla.



PLANTA

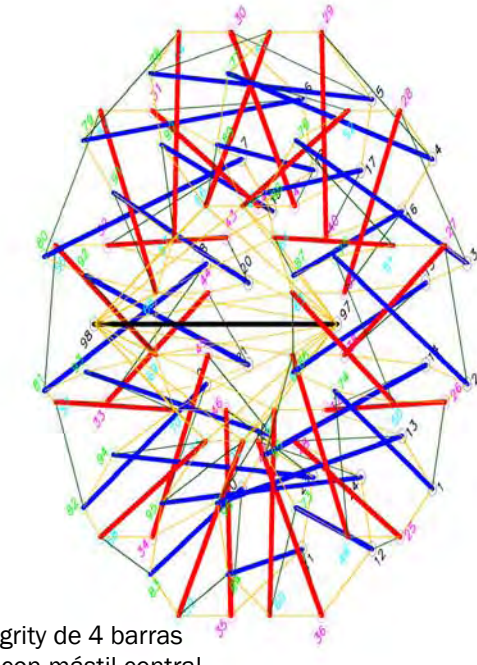
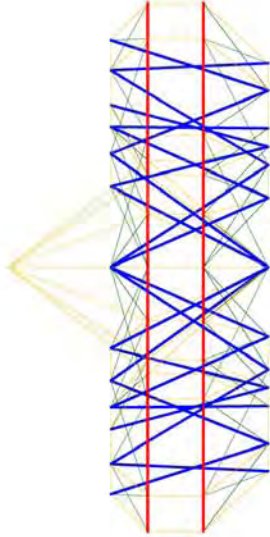


FOTOS



PATRONES

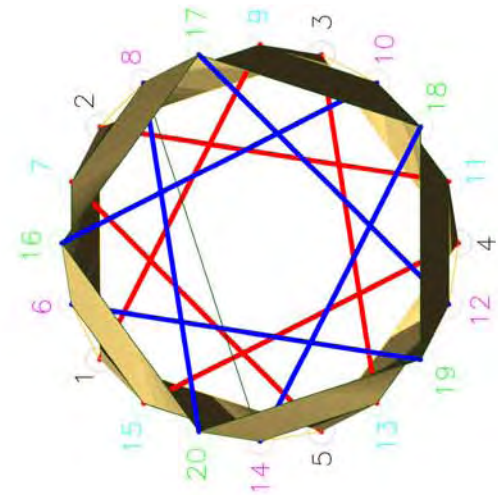
ALZADO



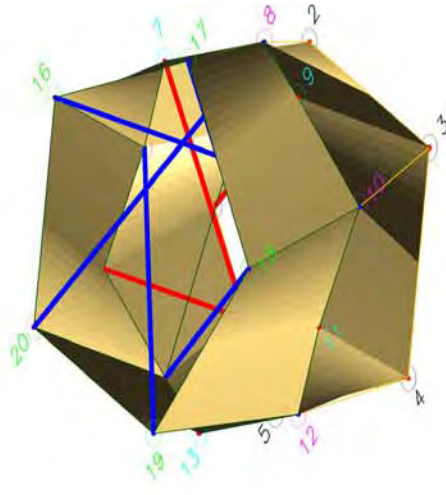
AXONOMETRÍA

PUNTOS	X	Y	Z	PUNTOS	X	Y	Z	PUNTOS	X	Y	Z
1	0	-11	0	25	0	-14.25	3.50	48	0	-14.25	6.50
2	5.50	-9.52	0	26	7.12	-12.34	3.50	49	7.12	-12.34	6.50
3	9.52	-5.50	0	27	12.34	-7.12	3.50	50	12.34	-7.12	6.50
4	11	0	0	28	14.25	0	3.50	51	14.25	0	6.50
5	9.52	5.50	0	29	12.34	7.12	3.50	52	12.34	7.12	6.50
6	5.50	9.52	0	30	7.12	12.34	3.50	53	7.12	12.34	6.50
7	0	11	0	31	0	14.25	3.50	54	0	14.25	6.50
8	-5.50	9.52	0	32	-7.12	12.34	3.50	55	-7.12	12.34	6.50
9	-9.52	5.50	0	33	-12.34	7.12	3.50	56	-12.34	7.12	6.50
10	-11	0	0	34	-14.25	0	3.50	57	-14.25	0	6.50
11	-9.52	-5.50	0	35	-12.34	-7.12	3.50	58	-12.34	-7.12	6.50
12	-5.50	-9.52	0	36	-7.12	-12.34	3.50	59	-7.12	-12.34	6.50
13	0	-11	0	37	0	-14.25	3.50	60	0	-14.25	6.50
14	3.75	-6.48	0	38	2.87	-4.97	3.50	61	2.87	-4.97	6.50
15	6.48	-3.75	0	39	4.97	-2.87	3.50	62	4.97	-2.87	6.50
16	7.50	0	0	40	5.75	0	3.50	63	5.75	0	6.50
17	6.48	3.75	0	41	4.97	2.87	3.50	64	4.97	2.87	6.50
18	3.75	6.48	0	42	2.87	4.97	3.50	65	2.87	4.97	6.50
19	0	7.50	0	43	0	5.75	3.50	66	0	5.75	6.50
20	-3.75	6.48	0	44	-2.87	4.97	3.50	67	-2.87	4.97	6.50
21	-6.48	3.75	0	45	-4.97	2.87	3.50	68	-4.97	2.87	6.50
22	-7.50	0	0	46	-5.75	0	3.50	69	-5.75	0	6.50
23	-6.48	-3.75	0	47	-4.97	-2.87	3.50	70	-4.97	-2.87	6.50
24	-3.75	-6.48	0	48	-2.87	-4.97	3.50	71	-2.87	-4.97	6.50
				49	-1.44	-2.48	3.50	72	-1.44	-2.48	6.50
				97	0	0	0	96	0	0	0
				98	0	0	0	95	0	0	0

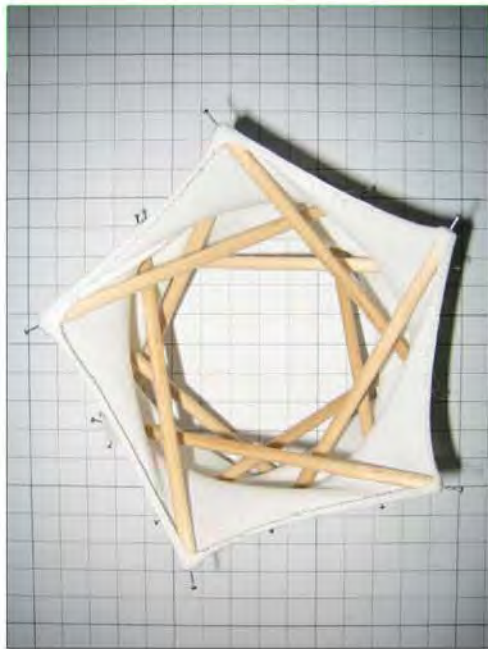
MATERIAL: MEMBRANA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUMINIO
MEMBRANA TEXTIL



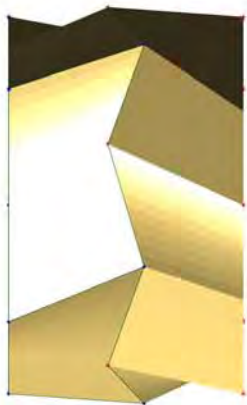
PLANTA



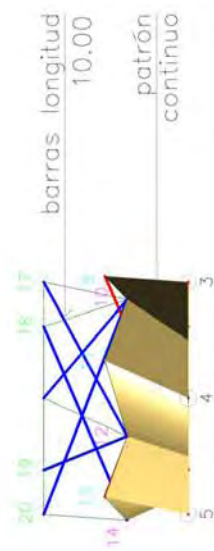
AXONOMETRÍA



FOTOS



ALZADO



PATRONES

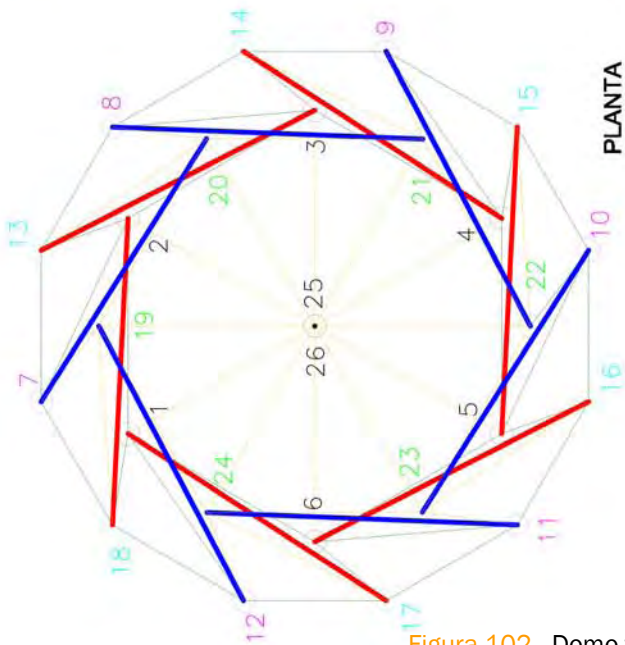
PUNTOS	X	Y	Z
1	0	0	0
2	6.16	0	0
3	8.06	-5.85	0
4	3.08	-9.48	0
5	-1.90	-5.85	0
6	1.46	0.74	2.62
7	4.70	0.74	3.57
8	7.32	-1.15	2.62
9	8.32	-4.24	3.57
10	7.32	-7.32	2.62
11	4.70	-9.22	3.57
12	1.46	-9.22	2.62
13	-1.15	-7.32	3.57
14	-2.16	-4.24	2.62
15	-1.15	-1.15	3.57
16	3.08	1.00	6.19
17	8.06	-2.62	9.19
18	6.16	-6.48	6.19
19	0	-8.48	6.19
20	-1.90	-2.62	6.19

MATERIAL:
 BARRAS: MADERA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUM
 CERRAMIENTO: LONA, TEXTIL

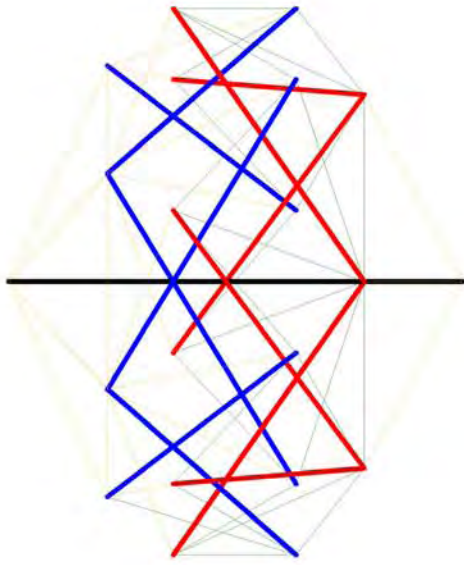
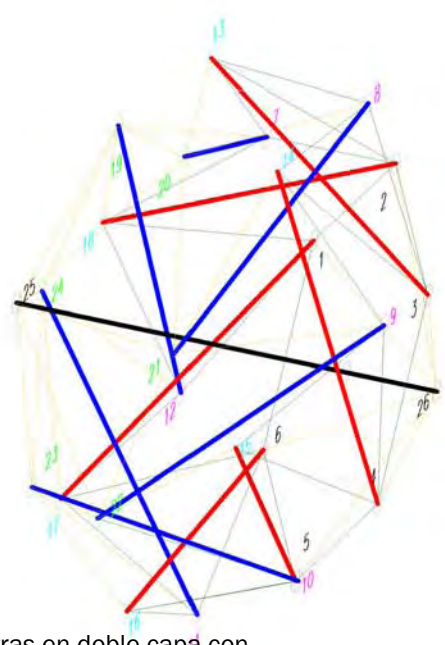
Figura 101. Anillo tensegrity de 10 barras en doble capa con membrana continua.



FOTOS



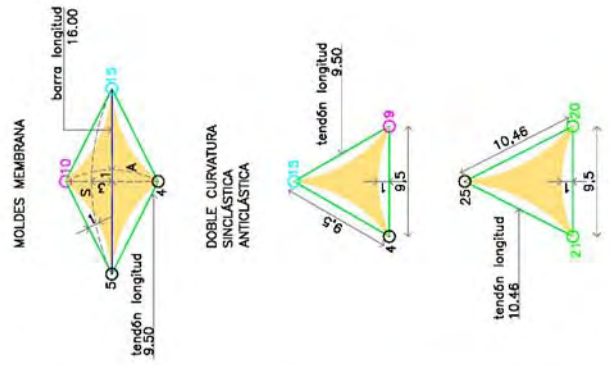
AXONOMETRÍA



ALZADO

PUNTOS	X	Y	Z
1	-4.75	8.22	0
2	4.75	8.22	0
3	9.50	0	0
4	4.75	-8.22	0
5	-4.75	-8.22	0
6	-9.50	0	0
7	-3.33	12.04	3
8	8.78	8.90	3
9	12.09	3.13	3
10	3.33	-12.04	3
11	-8.78	-8.90	3
12	-12.09	3.13	3
13	3.33	13.08	8.4
14	12.09	3.13	8.4
15	8.78	-8.90	8.4
16	-3.33	-12.04	8.4
17	-12.09	-3.13	8.4
18	-8.78	8.90	8.4
19	0	9.51	11.30
20	8.25	4.76	11.30
21	8.23	-4.78	11.30
22	0	-9.48	11.30
23	-8.20	-4.73	11.30
24	-8.21	4.74	11.30
25	0	0	15.86
26	0	0	-4.35

MATERIALES: MADERA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUMINIO
BARRAS: MADERA, FIBRA DE CARBONO, ACERO INOXIDABLE, ALUMINIO
MEMBRANA: TEXTIL



PATRONES

Figura 102. Domo tensegrity de 12 barras en doble capa con membrana en forma de diamante o rómbica, con mástil central.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2.4

1. En este capítulo se demostró que es posible construir modelos en tensegrity a escala utilizando los principios del tensegrity, basados en la geometría y en las investigaciones hechas por Anthony Pugh. En esta primera parte se tuvo en cuenta:
 - Que para entender el sistema era necesario construir modelos en diferentes materiales y ver cual era el más adecuado para continuar con la investigación.
 - Se cumplió uno de los objetivos principales que era remplazar los tendones o cables usados en los tensegrity tradicionales por superficies tensadas, representadas por las membranas textiles.
 - Dentro de la tipología propuesta se definieron 4 opciones que demuestran la estabilidad del sistema. Y por su morfología las diferentes posibilidades de aplicación.
 - Para lograr la estabilidad del sistema además de tener en cuenta los materiales utilizados, también fue necesario tener en cuenta el número y la longitud de las barras utilizadas y su posición en el espacio, en capa sencilla, doble, triple y cuatro capas.
 - Pudimos observar que en la tipología propuesta de los patrones, la opción del patrón en forma de diamante o rombo, nos ayuda a obtener anillos en tensegrity de mayor diámetro, mientras que el diámetro obtenido con la opción del patrón en membrana continua es menor y si agregamos más barras es más inestable y de difícil construcción comparándolo con el primer caso.
 - Se pensó en la ligereza de los materiales versus las luces a cubrir, como lo demostramos con el modelo de $\varnothing 100$ cm que tan sólo pesó 490 gr. Esto es una ventaja a la hora de pensar en un modelo a escala real.
2. También se demostró que es posible realizar modelos informáticos por medio del Autocad y WinTess como herramientas de dibujo. Se concluyó:
 - Que es posible dibujar en 3 dimensiones los diferentes modelos físicos propuestos, en ambos programas.
 - Se tuvo en cuenta la precisión de las coordenadas dadas por el modelo físico, para poderlas pasar al modelo informático, para ello se utilizaron retículas ortogonales en milímetros.
 - En WinTess, al ser un programa informático de cálculo de barras biarticuladas, las barras, tendones y membrana se representan dentro del programa, como barras de diferente tipología. Tipo 0 = tubos, tipo 1 = membrana, tipo 5 = barra perimetral o relinga, tipo 6 = cable libre o viento.
 - Como conclusión final podemos agregar que fue posible dibujar la tipología propuesta No.4, para poder continuar con el estudio del análisis estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 2.5

- [21] Pérez, N., *Folding Closed Tensegrity*, Thesis in Architecture, University National of Colombia, Bogotá, 2003.
- [22] Jáuregui, V., *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*, Master Thesis in Architecture, Queen's University Belfast -UK., 2004.
- [23] Kawaguchi M., *Physical models as powerful weapons in structural design*. IASS International Association for Shell and Spatial Structures, Symposium Montpellier, 2004.
- [24] Sastre, R., *Disseny i Càlcul d'Estructures de Barres Totalment Articulades amb Grans Deformacions*, Ph.D. Thesis, Department of Architectural Technology I - UPC, Barcelona, 1981.

CAPÍTULO 3. **ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

MODELOS SELECCIONADOS	3.1
PARÁMETROS DE ESTUDIO	3.2
DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA - GEOMETRÍA	3.2.1
Nudos	.A
Barras	.B
Membrana	.C
VALORES DE LAS CARGAS ¿DÓNDE ESTÁN APLICADAS?	3.2.2
Pretensión	.A
Peso Propio	.B
Viento y Nieve	.C
Resultados Finales	D
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	3.3
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3.4

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

MODELOS SELECCIONADOS 3.1

Después de tener dibujados geoméricamente las unidades, anillos y domos tensegrity, continuamos con el cálculo estructural de los mismos, por medio del programa de cálculo.

Hemos seleccionado los siguientes modelos para probar el equilibrio ante su propio peso, (el peso de los elementos que lo conforman, barras y membrana) y el pretensado, sin cargas externas de viento y/o nieve.

- Unidad tensegrity de 3 barras en capa sencilla. Estructura en equilibrio. (Figura 103)
- Unidad tensegrity de 6 barras en capa sencilla. Estructura en equilibrio. (Figura 104)
- 6 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla. Estructura en equilibrio. (Figura 105)
- 12 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla. Toro geométrico con mástil central. Estructura en equilibrio. (Figura 106)
- Anillo tensegrity de 10 barras en doble capa con membrana continua. Estructura en equilibrio. (Figura 107)
- Domo tensegrity de 12 barras en doble capa con membrana en forma de diamante o rómbica, con mástil central. Estructura en equilibrio. (Figura 108)

PRINCIPIOS ESTRUCTURALES DEL TENSEGRITY

Las estructuras tensegrity se caracterizan por: [25]

- Elementos discontinuos que trabajan a compresión.
- Pretensados.
- Autoportantes.

Los elementos discontinuos a compresión (barras) causan alta flexibilidad en la estructura, lo cual puede ser reducido conectando los elementos a compresión

con los elementos de tensión (tensores o membrana), por medio de la pretensión para estabilizar la estructura.

Desde el punto de vista estructural el Tensegrity ha demostrado características similares a todas las estructuras pretensadas tales como vigas de cables, redes de cables y membranas estructurales:

- Tienen movimientos indeterminados.
- Requieren de mayor rigidez en los elementos de tensión.
- Para ser estructuras estables sus fuerzas deben estar equilibradas, lo que quiere decir que sus reacciones sean iguales a la suma de sus cargas.

La resistencia de la estructura se puede analizar hoy usando la simulación por ordenador, pero se necesita investigar aún más para conseguir experiencia en:

- el diseño estructural.
- el comportamiento de las cargas.
- y definir un método constructivo del sistema Tensegrity.

Como respuesta a estas incógnitas esta investigación pretende aportar algo al conocimiento de este tipo de estructuras. Se hace un análisis estructural por medio del programa informático WinTess para ver el comportamiento de las cargas en el modelo propuesto:

Tipología No. 4 **anillo tensegrity de veinte barras y patrón en diamante o rómbico de doble capa con domo central**, libre de cualquier soporte interior, donde su geometría es definida por el equilibrio de fuerzas de tensión y compresión y cuyo método constructivo se ha descrito en el capítulo de obtención de la forma.
(Figuras 79,80,85,87)

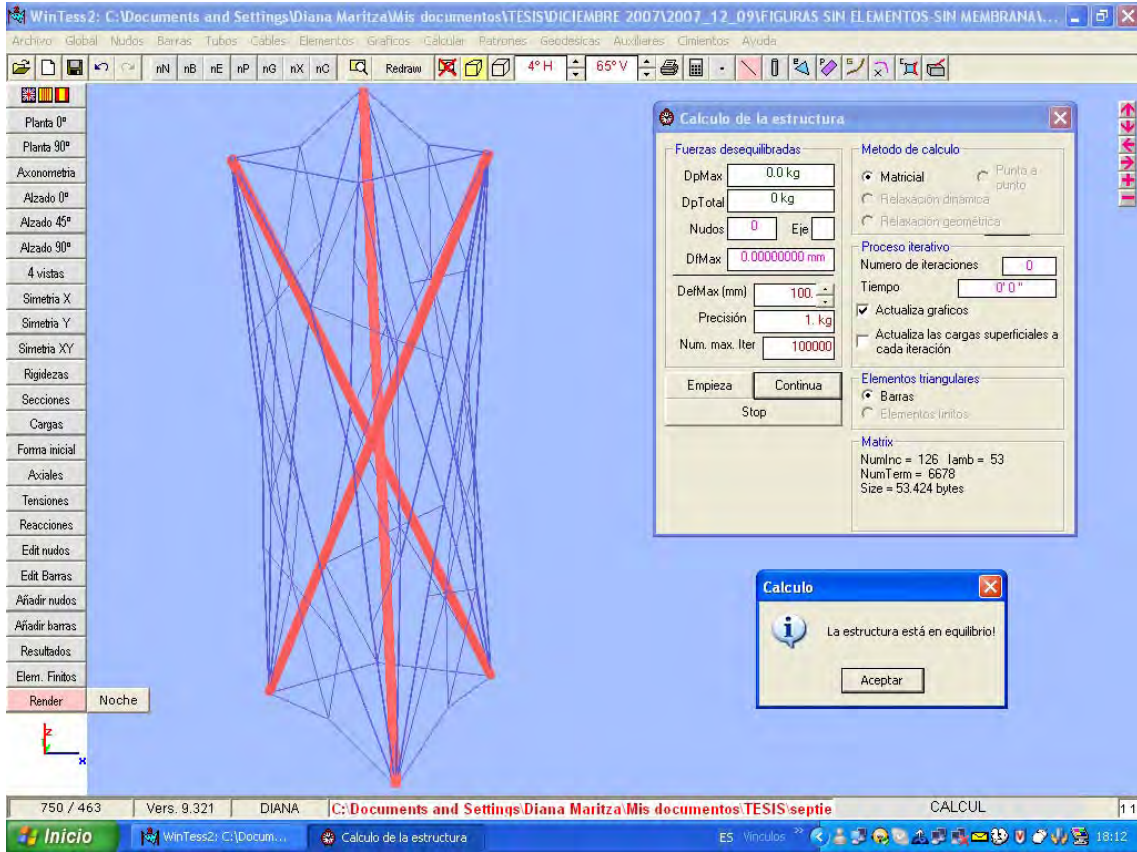


Figura 103. Unidad tensegrity de 3 barras en capa sencilla.

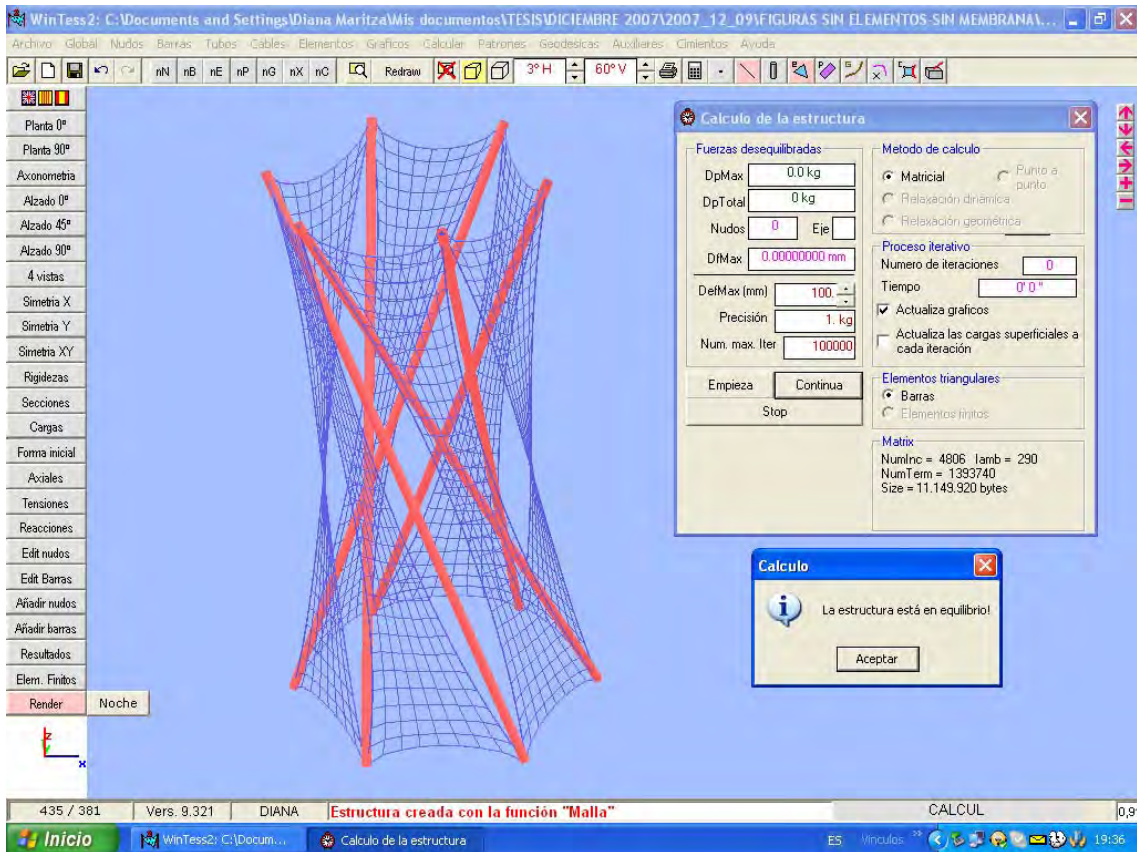


Figura 104. Unidad tensegrity de 6 barras en capa sencilla.

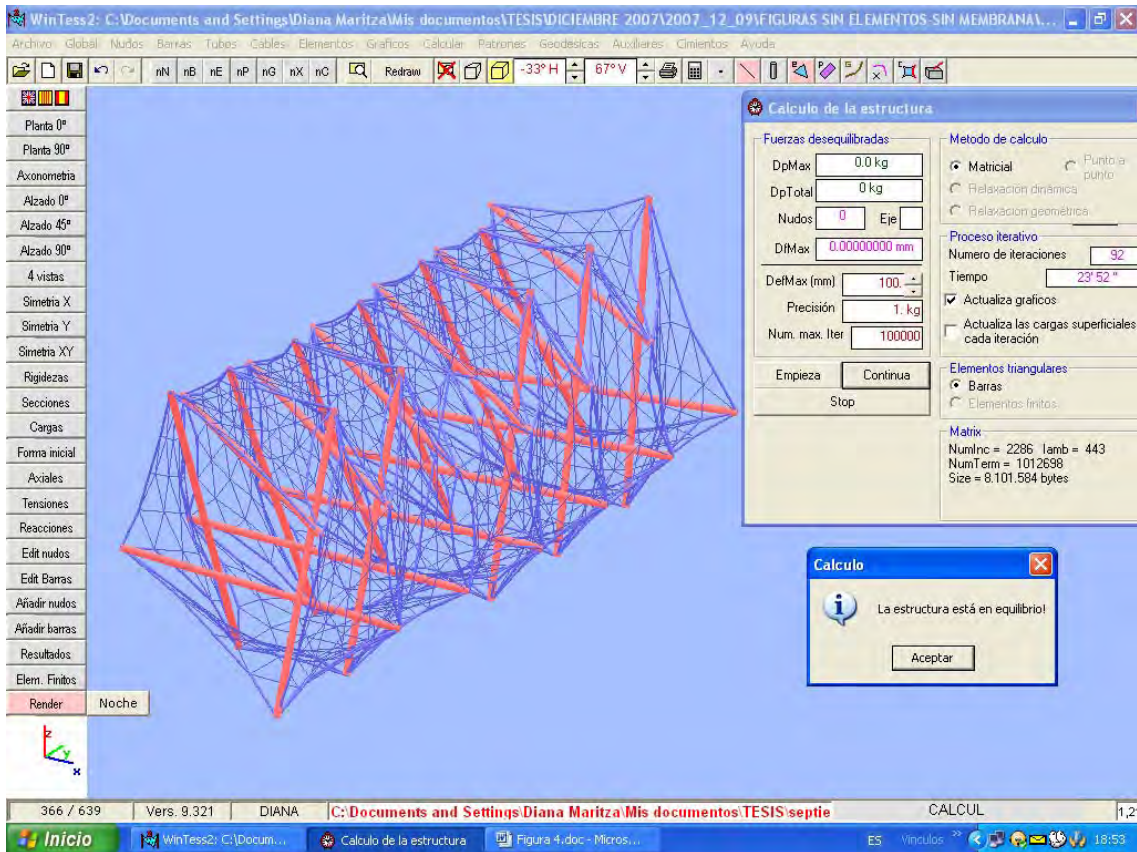


Figura 105. 6 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla.

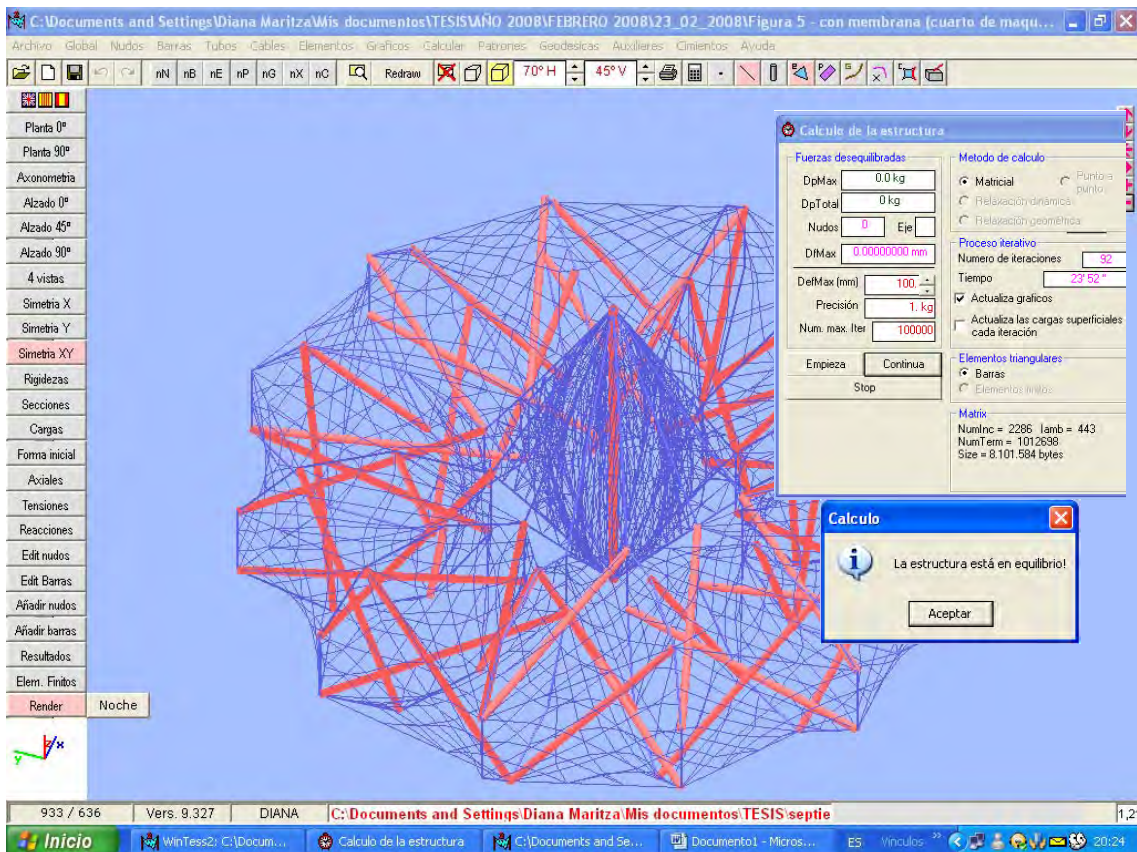


Figura 106. 12 Unidades tensegrity de 4 barras en capa sencilla que conforman un toro geométrico con mástil central.

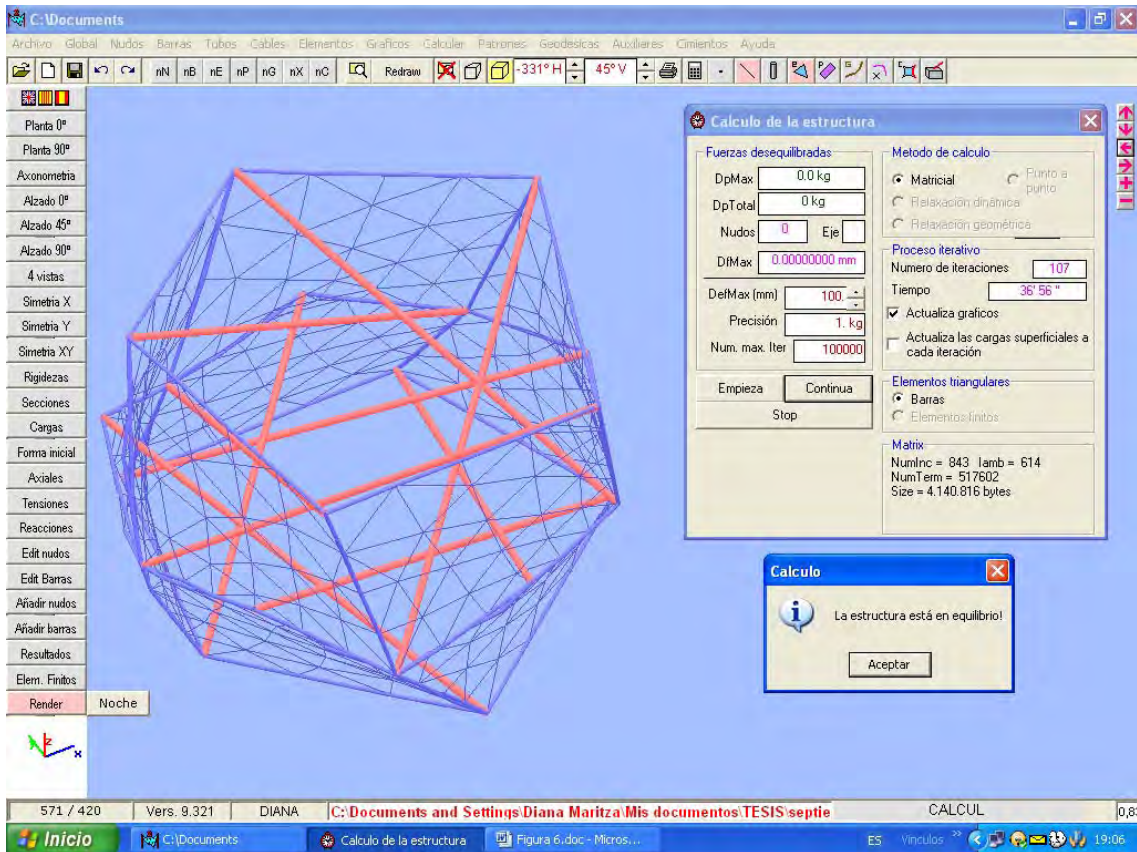


Figura 107. Anillo tensegrity de 10 barras en doble capa con membrana continua.

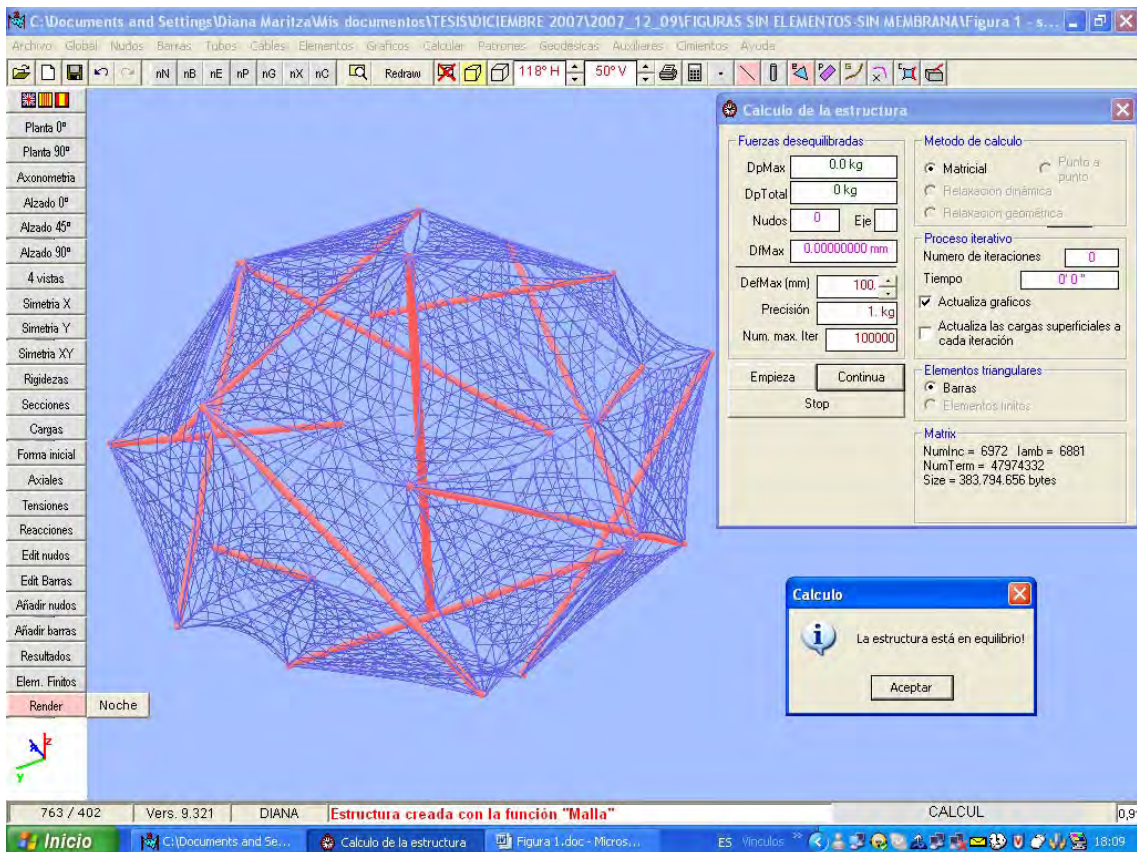


Figura 108. Domo tensegrity de 12 barras en doble capa con patrón en diamante con mástil central.

PARÁMETROS DE ESTUDIO 3.2

Para el cálculo estático de la estructura final seleccionada se tendrá en cuenta los siguientes aspectos:

3.2.1 Definición de la estructura - Geometría.

- A. Nudos, número, tipo y coordenadas.
- B. Barras: número, situación y características mecánicas.
- C. Membrana: ¿cómo se introduce?

3.2.2 Valores de las cargas, ¿dónde están aplicadas?

- A. Pretensión.
- B. Peso propio. Cuadros de análisis:
 - Esfuerzos en las barras y reacciones en los nudos. (Reacciones = a la suma de las cargas).
 - Desplazamientos de los nudos.
Comparación de la forma inicial con la forma final.
- C. Viento y nieve. Cuadros de análisis:
 - Aplicación de los coeficientes del túnel de viento.
 - Esfuerzos en las barras y reacciones en los nudos.
Reacciones = a la suma de las cargas.
 - Desplazamientos de los nudos.
Comparación de la forma inicial con la forma final.
- D. Resultados finales.

DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA 3.2.1

La estructura tridimensional que hemos analizado con el programa de cálculo WinTess está compuesta por barras biarticuladas que soportan cargas de tracción y compresión (Fig.110). Nuestro modelo está formado geométricamente por:

NUDOS A.

- 407 nudos libres.
- 40 nudos fijos.

BARRAS B.

- 41 barras tipo 0 que representan los tubos.
- 405 barras tipo 5 - cables de borde o relinga.
- 60 barras tipo 6 - cables exteriores o vientos.
- 810 barras tipo 1 - membrana.
- 709 elementos que representan la superficie de la membrana.

A. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA.

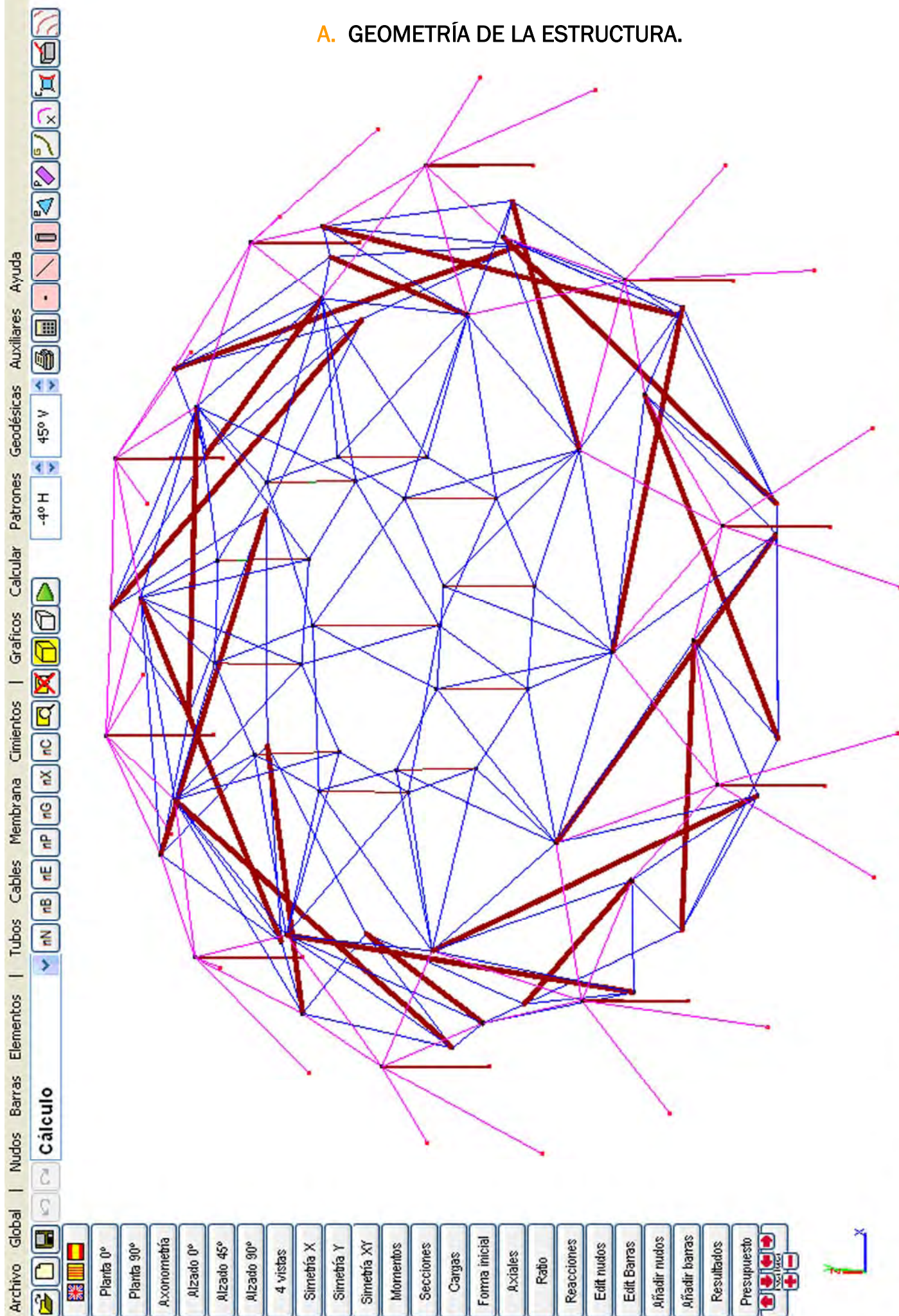


Figura 109. Estructura tridimensional representada en WinTess por barras biarticuladas.

CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO

BASE DE DATOS DE CABLES				
Ø	Sec(mm ²)	Tens(t)	Name	E (t/cm ²)
4	9.6	1.11	1x19-(4mm))Inox	1380
6	21.5	2.51	1x19-(6mm))Inox	1380
8	38.2	4.47	1x19-(8mm))Inox	1380
10	59.7	6.99	1x19-(10mm))Inox	1380
12	86	10.1	1x19-(12mm))Inox	1380
14	117	13.67	1x19-(14mm))Inox	1380
16	151	17.44	1x37-(16mm))Inox	1380
18	191	22.03	1x37-(18mm))Inox	1380
20	236	27.23	1x37-(20mm))Inox	1380
22	281	32.54	1x61-(22mm))Inox	1380
24	335	38.66	1x61-(24mm))Inox	1380
26	393	45.49	1x61-(26mm))Inox	1380
28	456	52.73	1x61-(28mm))Inox	1380
30	523	60.59	1x91-(30mm))Inox	1380
32	595	68.85	1x91-(32mm))Inox	1380
34	672	77.83	1x91-(34mm))Inox	1380
36	753	87.21	1x91-(36mm))Inox	1380
32	676	99.552	WS-2-(32mm)Galv	1635
34	763	112.2	WS-2-(34mm)Galv	1635
36	855	125.46	WS-2-(36mm)Galv	1635
38	953	140.76	WS-2-(38mm)Galv	1635
40	1060	155.04	WS-2-(40mm)Galv	1635
42	1160	171.36	WS-2-(42mm)Galv	1635
44	1280	187.68	WS-2-(44mm)Galv	1635
46	1400	206.04	WS-2-(46mm)Galv	1635
48	1520	224.4	WS-2-(48mm)Galv	1635
50	1650	242.76	WS-2-(50mm)Galv	1635

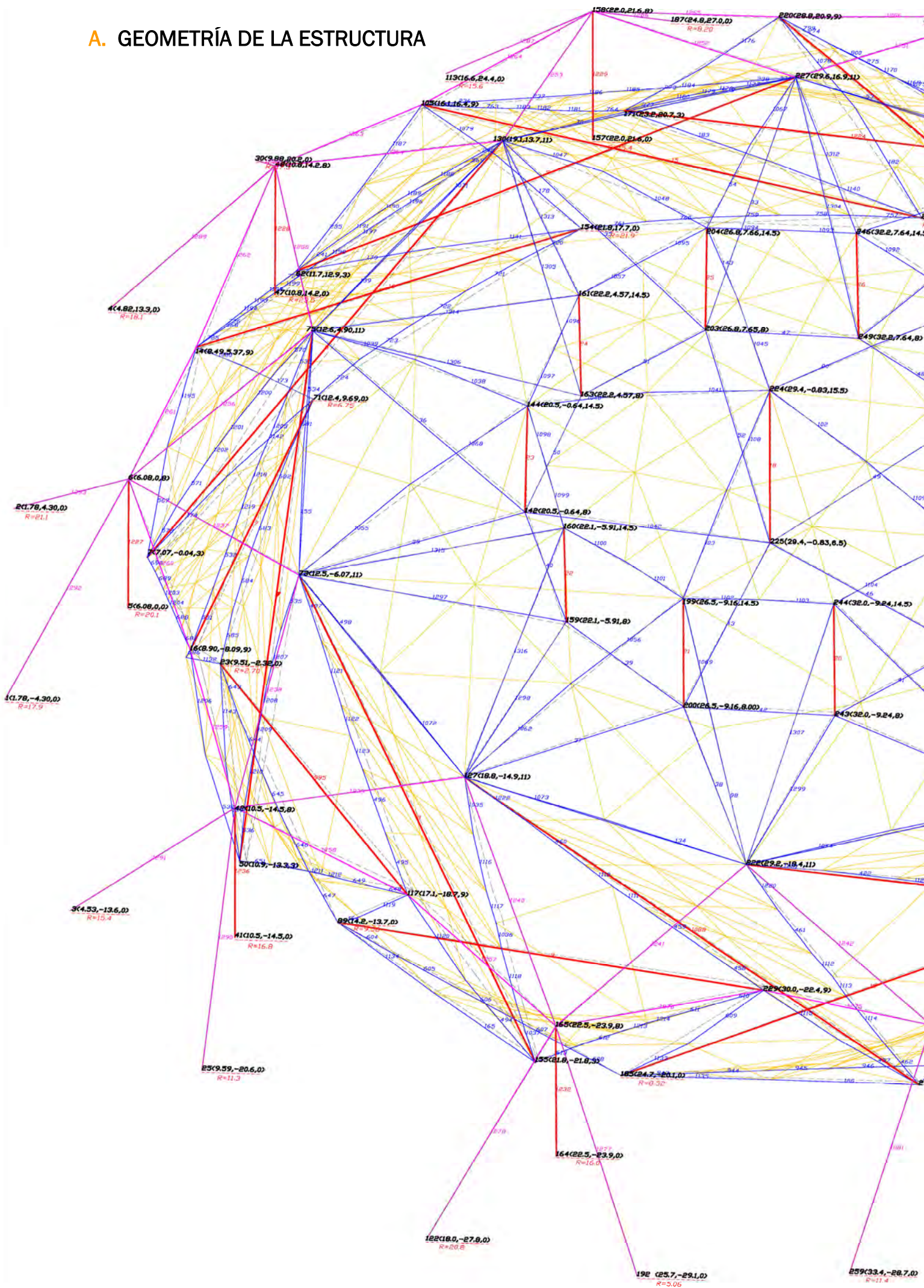
BASE DE DATOS DE TUBOS						
Nom	Ø(mm)	t(mm)	Steel	Sección (cm ²)	Peso (kg/m)	
Ø50-4_S235	50	4	S235	5.781	4.509	
Ø70-4_S235	70	4	S235	8.294	6.469	
Ø90-4_S235	90	4	S235	10.807	8.429	
Ø110-5_S235	110	5	S235	16.493	12.865	
Ø150-5_S235	150	5	S235	22.777	17.766	
Ø200-5_S235	200	5	S235	30.631	23.892	
Ø250-8_S235	250	8	S235	60.821	47.440	
Ø300-8_S235	300	8	S235	73.388	57.243	
Ø350-8_S235	350	8	S235	85.954	67.044	
Ø400-10_S235	400	10	S235	122.522	95.567	
Ø450-10_S235	450	10	S235	138.230	107.819	
Ø500-15_S235	500	15	S235	228.551	178.270	

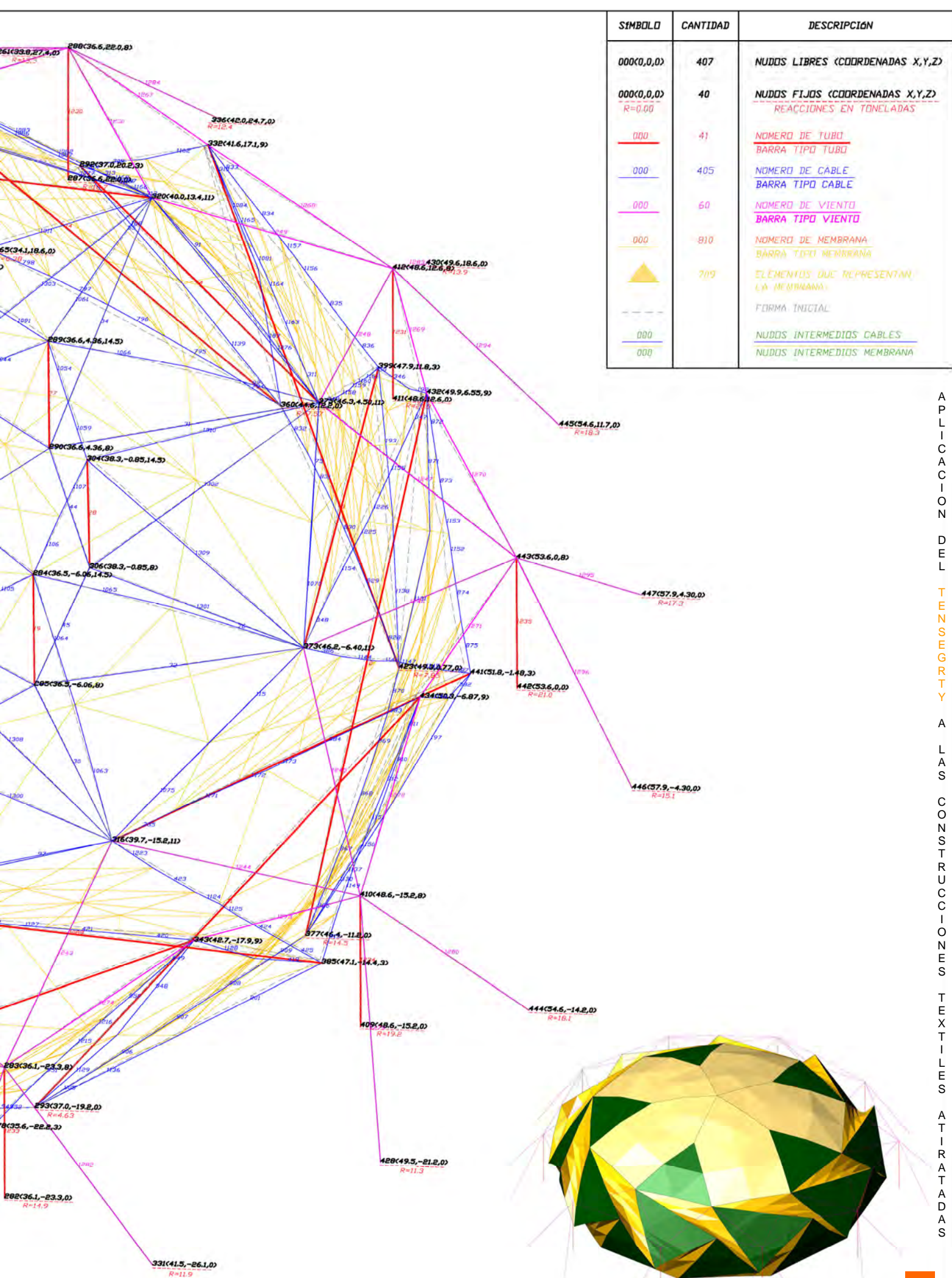
Módulo de elasticidad E= 2100 ton/cm² (210 kN/mm²)
 Densidad D= 7.85 ton/m³ (78.5 kN/m³)

BASE DE DATOS MEMBRANA		
daN/5cm	kg/m ²	Nom/Name
250/250	0.59	Ferrari Fluotop T2 502
300/280	0.75	Ferrari Fluotop T2 702
420/400	1.05	Ferrari Fluotop T2 1002
560/560	1.25	Ferrari Fluotop T2 1202
800/700	1.35	Ferrari Fluotop T2 1302
1000/800	1.50	Ferrari Fluotop T2 1502

Tabla 1. Base de datos de cables, tubos y membranas utilizados en WinTess.

A. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA



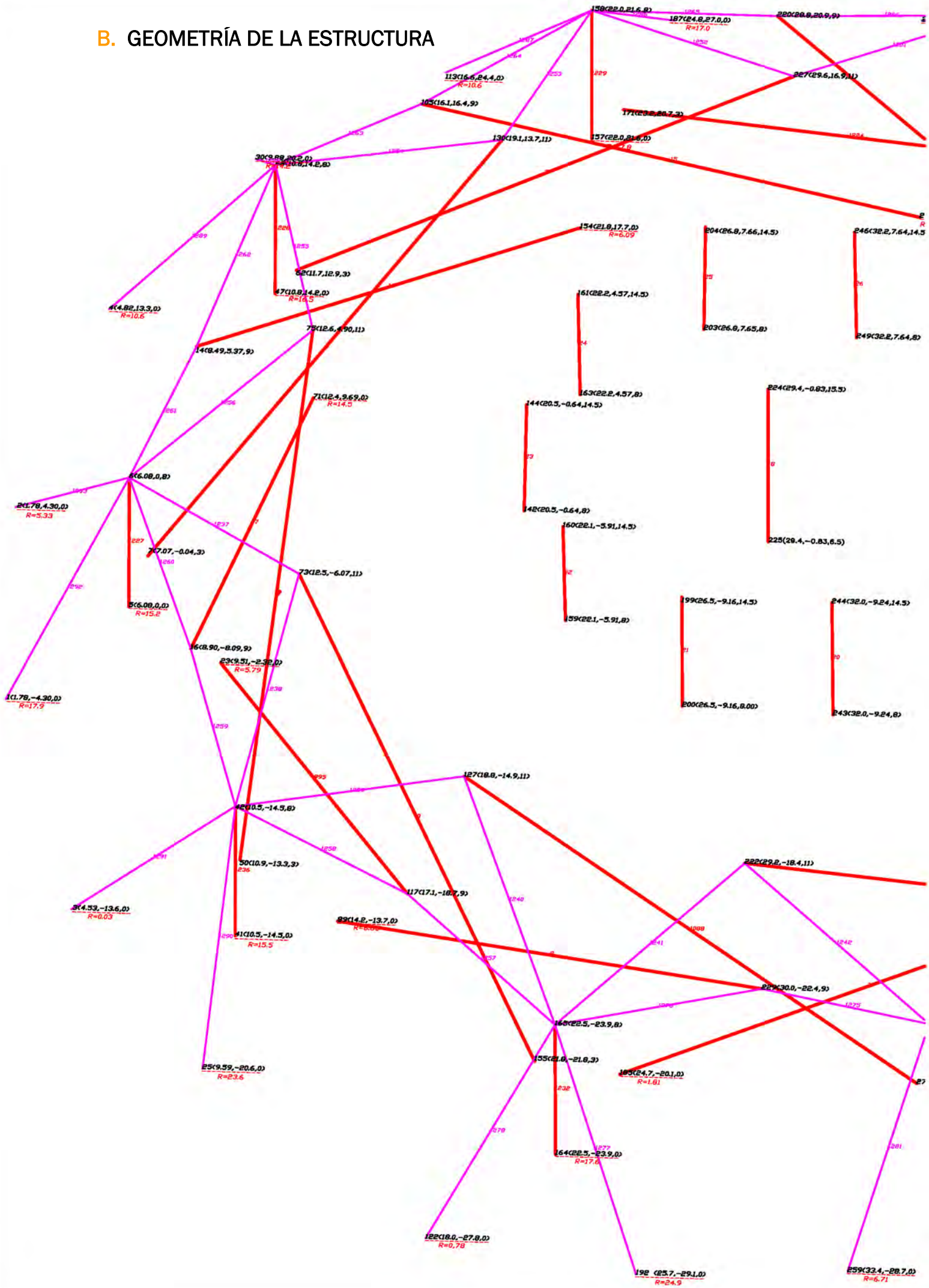


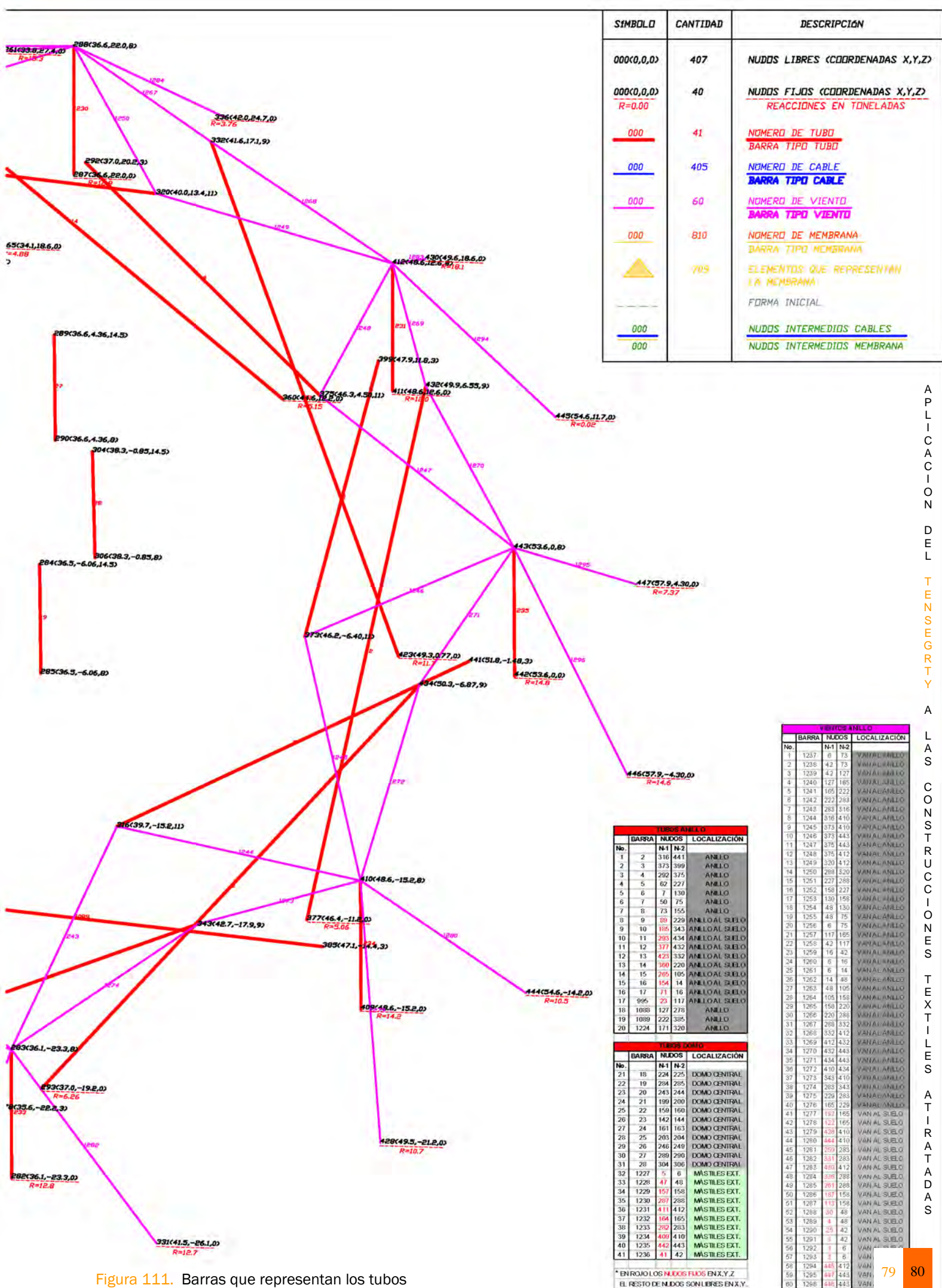
SÍMBOLO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
000(0,0,0)	407	NUDOS LIBRES (COORDENADAS X,Y,Z)
000(0,0,0) R=0.00	40	NUDOS FIJOS (COORDENADAS X,Y,Z) REACCIONES EN TONELADAS
000	41	NOMERO DE TUBO BARRA TIPO TUBO
000	405	NOMERO DE CABLE BARRA TIPO CABLE
000	60	NOMERO DE VIENTO BARRA TIPO VIENTO
000	810	NOMERO DE MEMBRANA BARRA TIPO MEMBRANA
▲	709	ELEMENTOS QUE REPRESENTAN LA MEMBRANA
- - -		FORMA INICIAL
000		NUDOS INTERMEDIOS CABLES
000		NUDOS INTERMEDIOS MEMBRANA

APLICACION DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATRACTADAS

Figura 110. Estructura tridimensional representada en WinTess por barras biarticuladas.

B. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA





SÍMBOLO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
000(0,0,0)	407	NUDOS LIBRES (COORDENADAS X,Y,Z)
000(0,0,0) R=0.00	40	NUDOS FIJOS (COORDENADAS X,Y,Z) REACCIONES EN TONELADAS
000	41	NOMERO DE TUBO BARRA TIPO TUBO
000	405	NOMERO DE CABLE BARRA TIPO CABLE
000	60	NOMERO DE VIENTO BARRA TIPO VIENTO
000	810	NOMERO DE MEMBRANA BARRA TIPO MEMBRANA
	709	ELEMENTOS QUE REPRESENTAN LA MEMBRANA
		FORMA INICIAL
000		NUDOS INTERMEDIOS CABLES
000		NUDOS INTERMEDIOS MEMBRANA

APLICACION DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATIRADAS

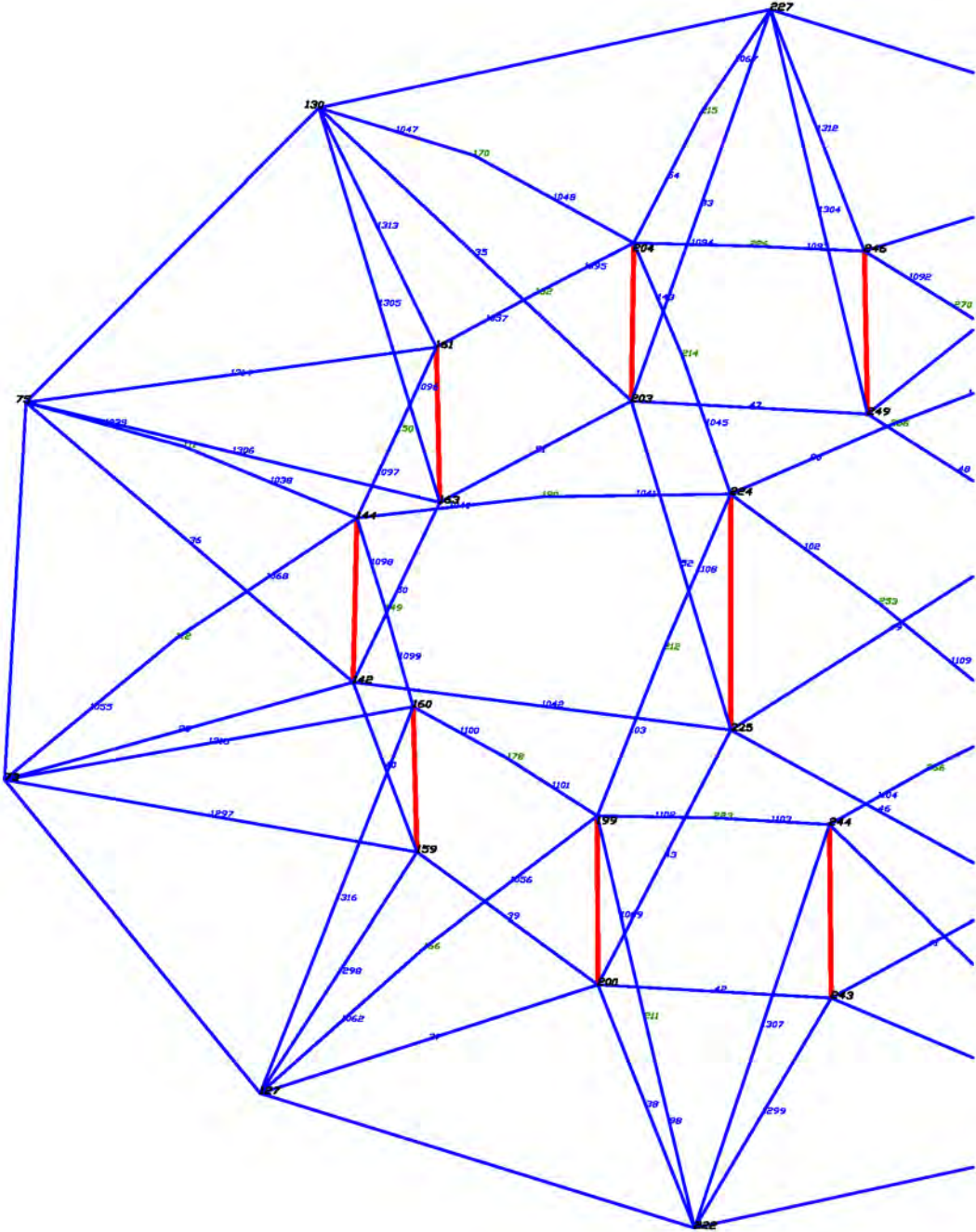
VIENTOS ANILLO			
No.	BARRA	NUDOS	LOCALIZACIÓN
1	1237	6 73	VAN AL ANILLO
2	1238	42 73	VAN AL ANILLO
3	1239	42 127	VAN AL ANILLO
4	1240	127 185	VAN AL ANILLO
5	1241	105 232	VAN AL ANILLO
6	1242	222 283	VAN AL ANILLO
7	1243	283 316	VAN AL ANILLO
8	1244	316 410	VAN AL ANILLO
9	1245	373 410	VAN AL ANILLO
10	1246	373 443	VAN AL ANILLO
11	1247	376 443	VAN AL ANILLO
12	1248	376 412	VAN AL ANILLO
13	1249	320 412	VAN AL ANILLO
14	1250	288 320	VAN AL ANILLO
15	1251	227 288	VAN AL ANILLO
16	1252	158 227	VAN AL ANILLO
17	1253	130 158	VAN AL ANILLO
18	1254	48 130	VAN AL ANILLO
19	1255	48 75	VAN AL ANILLO
20	1256	6 75	VAN AL ANILLO
21	1257	117 185	VAN AL ANILLO
22	1258	42 117	VAN AL ANILLO
23	1259	16 42	VAN AL ANILLO
24	1260	6 16	VAN AL ANILLO
25	1261	6 14	VAN AL ANILLO
26	1262	14 48	VAN AL ANILLO
27	1263	48 105	VAN AL ANILLO
28	1264	105 158	VAN AL ANILLO
29	1265	158 220	VAN AL ANILLO
30	1266	220 288	VAN AL ANILLO
31	1267	288 332	VAN AL ANILLO
32	1268	332 412	VAN AL ANILLO
33	1269	412 432	VAN AL ANILLO
34	1270	432 443	VAN AL ANILLO
35	1271	434 443	VAN AL ANILLO
36	1272	410 434	VAN AL ANILLO
37	1273	343 410	VAN AL ANILLO
38	1274	283 343	VAN AL ANILLO
39	1275	229 283	VAN AL ANILLO
40	1276	165 229	VAN AL ANILLO
41	1277	157 165	VAN AL ANILLO
42	1278	121 165	VAN AL ANILLO
43	1279	438 410	VAN AL ANILLO
44	1280	343 410	VAN AL ANILLO
45	1281	259 383	VAN AL ANILLO
46	1282	331 283	VAN AL ANILLO
47	1283	480 412	VAN AL ANILLO
48	1284	308 283	VAN AL ANILLO
49	1285	291 288	VAN AL ANILLO
50	1286	197 158	VAN AL ANILLO
51	1287	413 158	VAN AL ANILLO
52	1288	30 48	VAN AL ANILLO
53	1289	4 48	VAN AL ANILLO
54	1290	25 42	VAN AL ANILLO
55	1291	5 42	VAN AL ANILLO
56	1292	1 6	VAN AL ANILLO
57	1293	1 8	VAN AL ANILLO
58	1294	145 412	VAN AL ANILLO
59	1295	347 443	VAN AL ANILLO
60	1296	436 443	VAN AL ANILLO

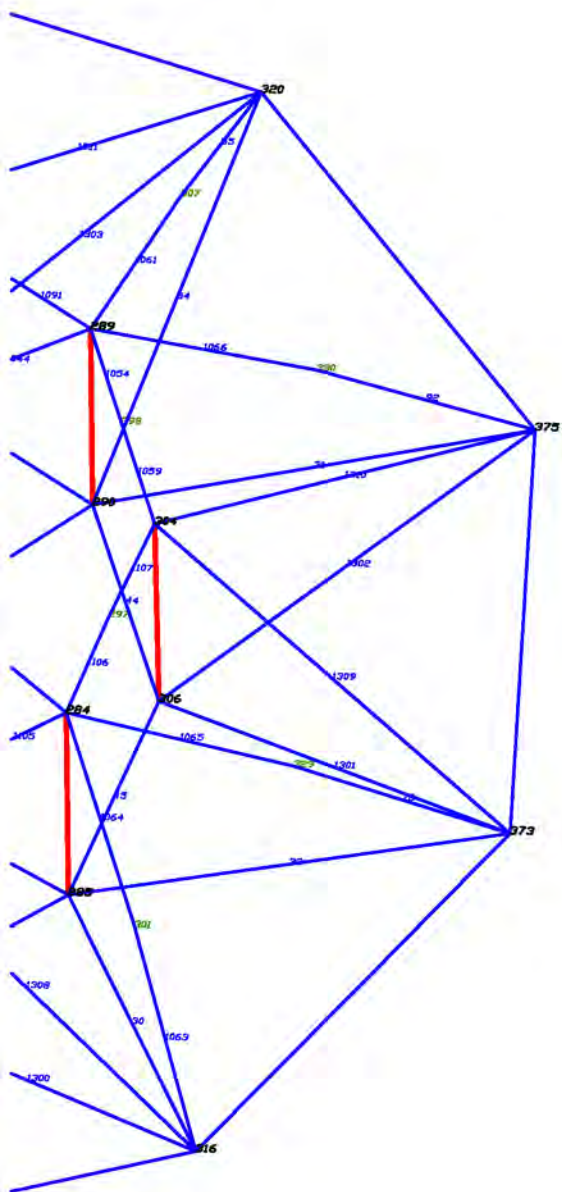
TUBOS ANILLO			
No.	BARRA	NUDOS	LOCALIZACIÓN
1	2	316 441	ANILLO
2	3	373 399	ANILLO
3	4	292 375	ANILLO
4	5	62 227	ANILLO
5	6	7 130	ANILLO
6	7	50 75	ANILLO
7	8	73 155	ANILLO
8	9	89 229	ANILLO AL SUELO
9	10	155 343	ANILLO AL SUELO
10	11	293 434	ANILLO AL SUELO
11	12	377 432	ANILLO AL SUELO
12	13	423 332	ANILLO AL SUELO
13	14	360 220	ANILLO AL SUELO
14	15	295 105	ANILLO AL SUELO
15	16	154 14	ANILLO AL SUELO
16	17	71 16	ANILLO AL SUELO
17	995	23 117	ANILLO AL SUELO
18	1088	127 278	ANILLO
19	1089	222 385	ANILLO
20	1224	171 320	ANILLO

TUBOS DOMO			
No.	BARRA	NUDOS	LOCALIZACIÓN
21	15	224 225	DOMO CENTRAL
22	19	294 295	DOMO CENTRAL
23	20	243 244	DOMO CENTRAL
24	21	199 200	DOMO CENTRAL
25	22	159 160	DOMO CENTRAL
26	23	142 144	DOMO CENTRAL
27	24	161 163	DOMO CENTRAL
28	25	203 204	DOMO CENTRAL
29	26	246 249	DOMO CENTRAL
30	27	289 290	DOMO CENTRAL
31	28	304 306	DOMO CENTRAL
32	1227	5 6	MÁSTILES EXT.
33	1228	47 48	MÁSTILES EXT.
34	1229	157 158	MÁSTILES EXT.
35	1230	287 288	MÁSTILES EXT.
36	1231	411 412	MÁSTILES EXT.
37	1232	164 165	MÁSTILES EXT.
38	1233	292 293	MÁSTILES EXT.
39	1234	409 410	MÁSTILES EXT.
40	1235	442 443	MÁSTILES EXT.
41	1236	41 42	MÁSTILES EXT.

Figura 111. Barras que representan los tubos y vientos de la estructura.

B. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA





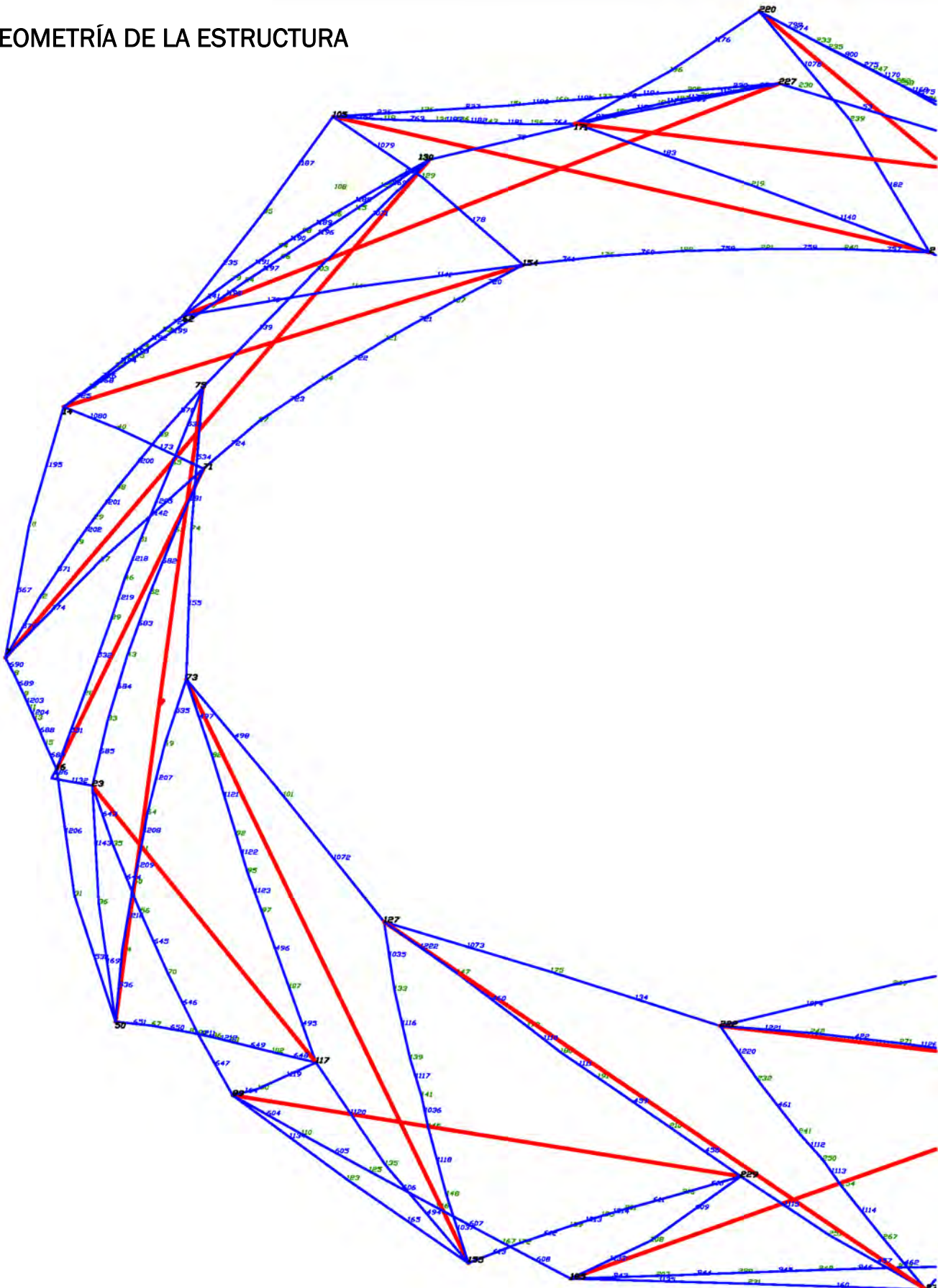
SÍMBOLO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
000<u>0,0,0</u>	407	NUDOS LIBRES (COORDENADAS X,Y,Z)
000<u>0,0,0</u> R=0.00	40	NUDOS FIJOS (COORDENADAS X,Y,Z) REACCIONES EN TONELADAS
<u>000</u>	41	NOMERO DE TUBO BARRA TIPO TUBO
<u>000</u>	405	NOMERO DE CABLE BARRA TIPO CABLE
<u>000</u>	60	NOMERO DE VIENTO BARRA TIPO VIENTO
<u>000</u>	610	NOMERO DE MEMBRANA BARRA TIPO MEMBRANA
	709	ELEMENTOS QUE REPRESENTAN LA MEMBRANA
		FORMA INICIAL
<u>000</u>		NUDOS INTERMEDIOS CABLES
<u>000</u>		NUDOS INTERMEDIOS MEMBRANA

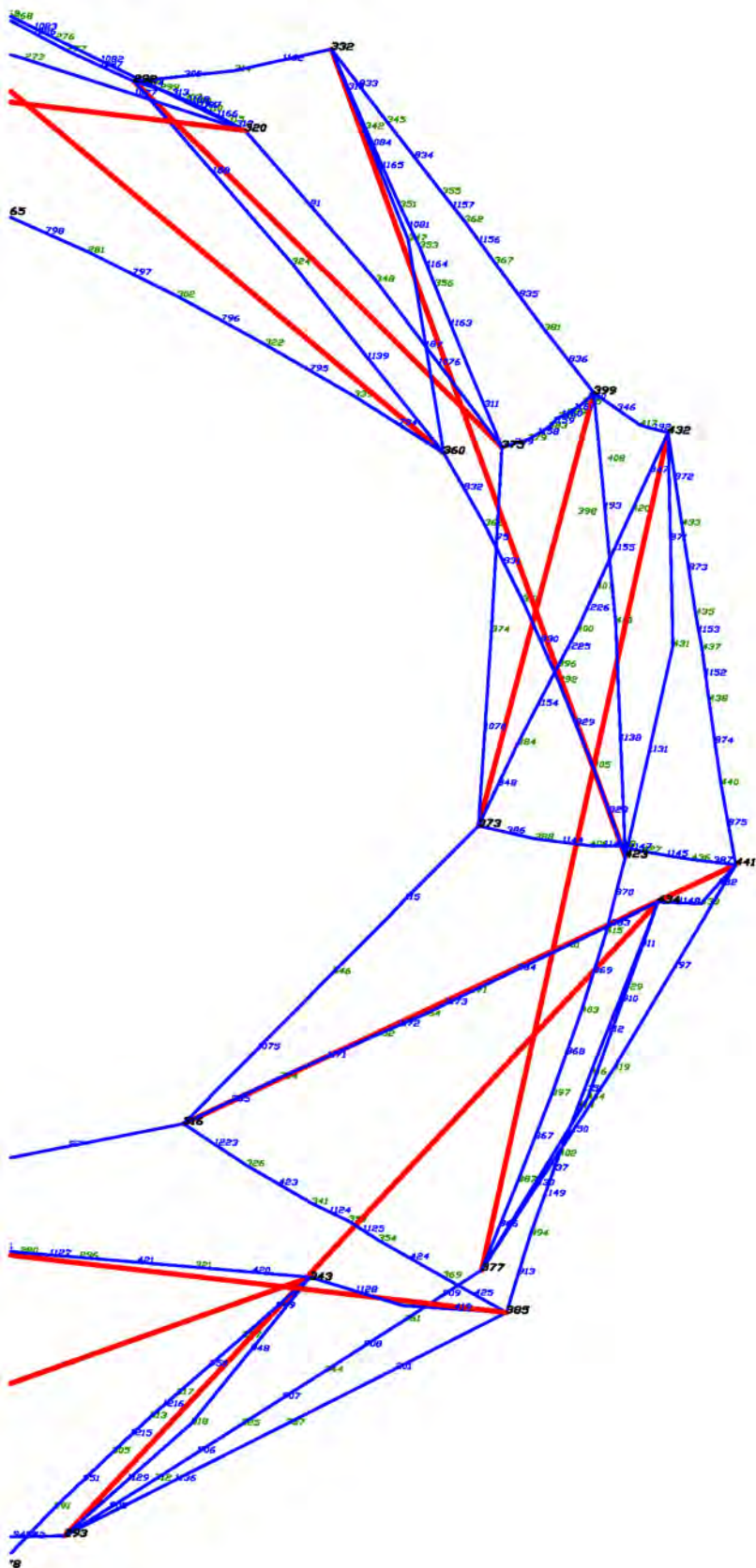
CABLES DOMO		
No.	BARRA	NUDOS
	N-1	N-2
1	29	73 142
2	30	285 316
3	31	290 375
4	32	285 373
5	34	290 320
6	35	130 203
7	38	75 142
8	37	127 200
9	38	200 222
10	39	159 200
11	40	142 159
12	41	243 285
13	42	200 243
14	43	200 225
15	44	290 306
16	45	285 306
17	46	225 285
18	47	203 249
19	48	249 290
20	49	225 290
21	50	142 163
22	51	163 203
23	52	203 225
24	54	204 215
25	55	307 320
26	76	329 373
27	80	224 256
28	92	330 375
29	98	211 222
30	102	224 253
31	103	109 212
32	143	204 214
33	1038	111 144
34	1039	75 111
35	1040	144 190
36	1041	190 224
37	1042	142 225
38	1044	256 289
39	1045	214 234
40	1047	130 170
41	1048	170 204
42	1054	289 298
43	1055	73 112
44	1056	166 199
45	1057	161 182
46	1059	298 304
47	1061	289 307
48	1062	127 166
49	1063	301 316
50	1064	284 301
51	1065	284 329
52	1066	289 330
53	1067	215 227
54	1068	112 144
55	1069	199 211
56	1091	270 289
57	1092	246 270
58	1093	226 246
59	1094	204 226
60	1095	162 204
61	1096	150 161
62	1097	144 150
63	1098	144 149
64	1099	149 160
65	1100	160 178
66	1101	178 199
67	1102	199 223
68	1103	223 244
69	1104	244 266
70	1105	266 284
71	1106	284 297
72	1107	297 304
73	1108	212 224
74	1109	253 284
75	1138	413 423
76	1297	73 159
77	1298	127 159
78	1299	222 243
79	1300	243 316
80	1301	306 373
81	1302	306 375
82	1303	249 320
83	1304	227 249
84	1305	130 163
85	1306	75 163
86	1307	222 244
87	1308	244 316
88	1309	304 373
89	1310	304 375
90	1311	246 320
91	1312	227 246
92	1313	130 161
93	1314	75 161
94	1315	73 160
95	1316	127 160

APLICACION DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATRITADAS

Figura 112. Barras que representan los cables del domo superior.

B. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA





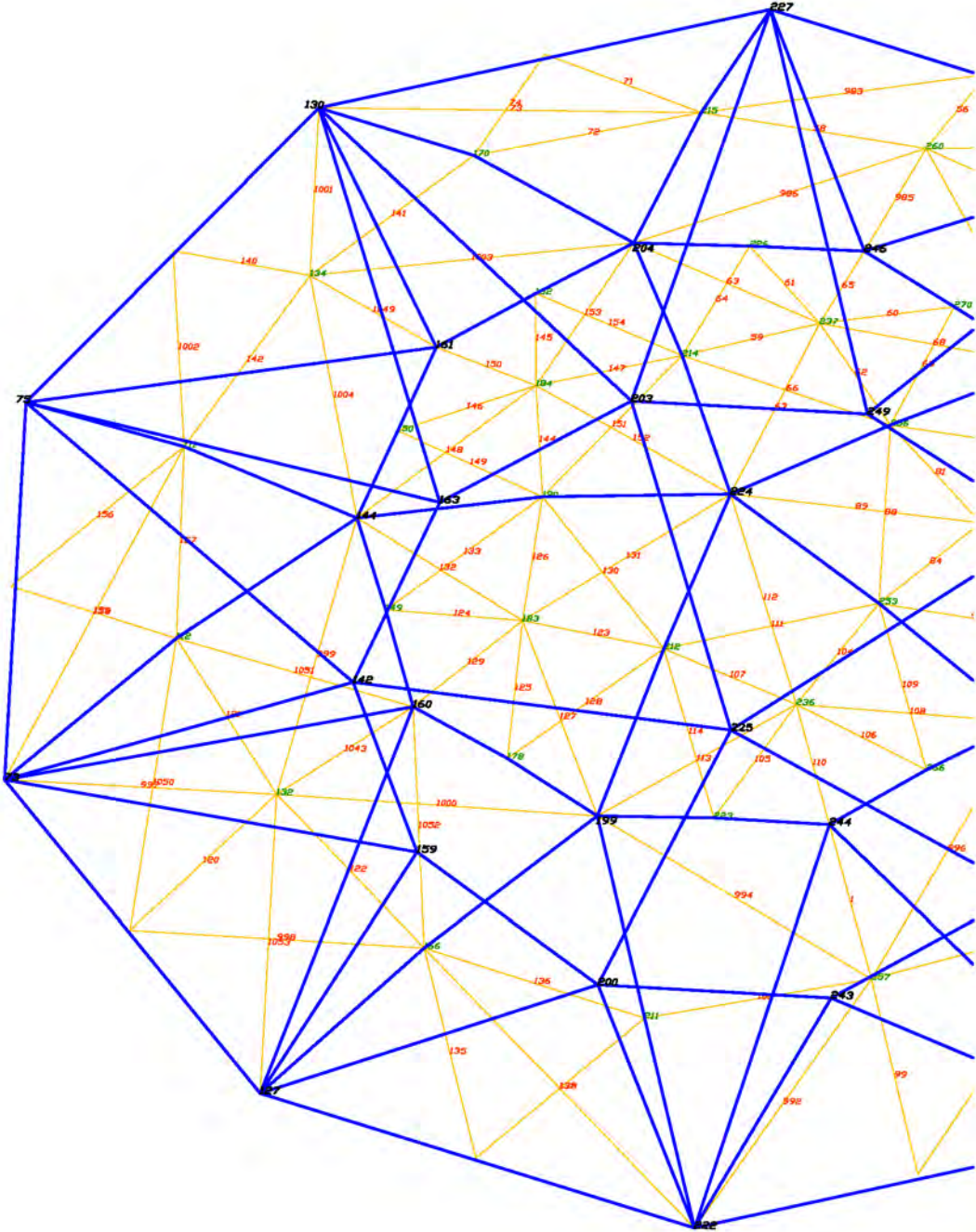
SÍMBOLO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
$000<0,0,0>$	407	NUDOS LIBRES (COORDENADAS X,Y,Z)
$000<0,0,0>$ $R=0.00$	40	NUDOS FIJOS (COORDENADAS X,Y,Z) REACCIONES EN TONELADAS
000	-41	NOMERO DE TUBO BARRA TIPO TUBO
000	405	NOMERO DE CABLE BARRA TIPO CABLE
000	60	NOMERO DE VIENTO BARRA TIPO VIENTO
000	610	NOMERO DE MEMBRANA BARRA TIPO MEMBRANA
	709	ELEMENTOS QUE REPRESENTAN LA MEMBRANA
---		FORMA INICIAL
000		NUDOS INTERMEDIOS CABLES
000		NUDOS INTERMEDIOS MEMBRANA

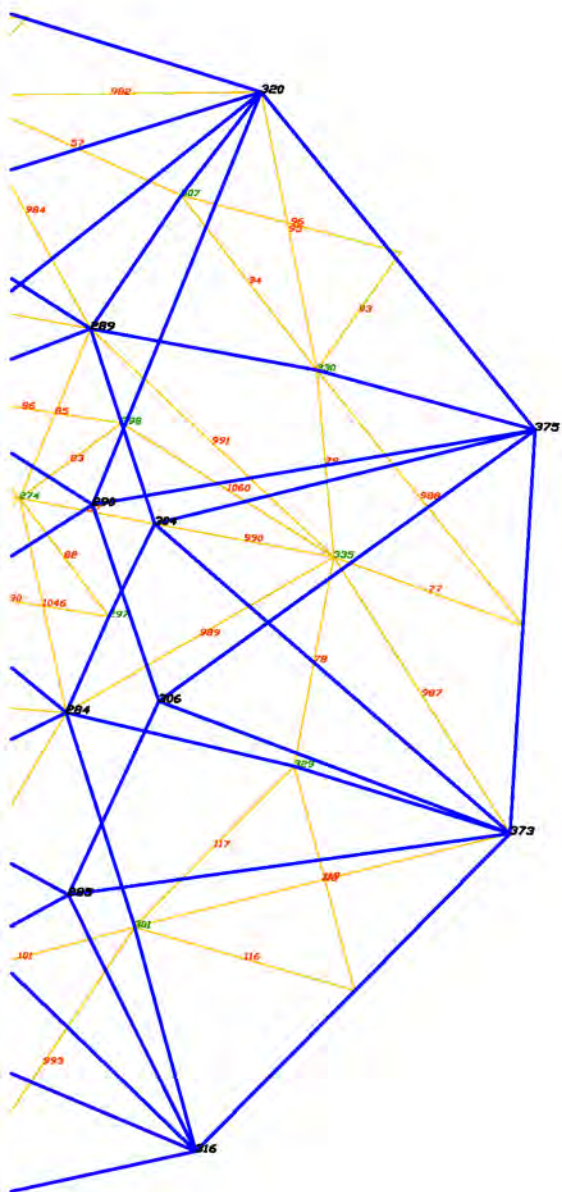
CABLES ANILLO			CABLES ANILLO			CABLES ANILLO		
BARRA	NUDOS		BARRA	NUDOS		BARRA	NUDOS	
No.	N-1	N-2	No.	N-1	N-2	No.	N-1	N-2
96	33	203	227	200	851	50	87	303
97	53	227	273	201	881	63	71	304
98	70	130	179	202	882	52	63	305
99	75	374	375	203	883	43	52	306
100	91	320	348	204	884	33	43	307
101	97	260	216	205	885	23	33	308
102	115	848	273	206	886	16	17	309
103	134	175	222	207	887	15	16	310
104	139	75	103	208	888	13	15	311
105	155	72	34	209	889	8	9	312
106	180	231	278	210	890	7	8	313
107	164	85	100	211	730	137	154	514
108	165	123	155	212	721	121	137	515
109	169	36	50	213	722	104	121	316
110	173	40	71	214	723	97	104	317
111	174	7	27	215	724	71	87	318
112	178	129	154	216	725	14	16	319
113	179	62	114	217	726	18	32	320
114	182	239	265	218	727	53	62	321
115	183	171	219	219	757	240	285	322
116	187	347	380	220	758	221	240	323
117	188	292	324	221	759	198	221	324
118	192	417	432	222	760	178	198	325
119	193	399	413	223	761	154	178	326
120	197	419	441	224	762	105	119	327
121	201	333	585	225	763	119	131	328
122	233	472	85	226	764	156	171	329
123	238	105	126	227	794	339	360	330
124	237	126	151	228	795	322	339	331
125	238	205	227	229	796	302	322	332
126	239	179	227	230	797	281	302	333
127	240	120	130	231	798	268	281	334
128	241	62	79	232	799	220	233	335
129	273	171	196	233	800	233	247	336
130	274	220	235	234	828	405	433	337
131	275	235	258	235	829	392	405	338
132	276	217	227	236	830	378	392	339
133	277	171	181	237	831	368	378	340
134	309	292	314	238	832	360	368	341
135	310	332	342	239	833	332	345	342
136	311	395	375	240	834	345	355	343
137	312	312	320	241	835	387	381	344
138	313	299	303	242	836	361	369	345
139	314	292	299	243	838	377	387	346
140	348	399	417	244	867	357	397	347
141	347	420	432	245	868	397	403	348
142	348	372	394	246	869	403	415	349
143	349	376	376	247	870	410	423	350
144	350	395	395	248	871	431	432	351
145	382	430	441	249	872	432	433	352
146	383	401	434	250	873	433	435	353
147	384	371	401	251	874	438	440	354
148	385	318	354	252	875	440	441	355
149	386	373	388	253	905	293	312	356
150	387	436	441	254	906	312	325	357
151	419	363	385	255	907	325	344	358
152	420	321	343	256	908	344	361	359
153	421	296	321	257	909	361	377	360
154	422	242	271	258	910	404	434	361
155	423	328	341	259	911	424	434	362
156	424	354	366	260	917	416	439	363
157	425	369	385	261	913	386	394	364
158	457	251	279	262	943	165	207	365
159	458	210	229	263	944	207	228	366
160	459	191	210	264	945	228	248	367
161	460	147	173	265	946	248	272	368
162	461	232	241	266	947	272	293	369
163	462	267	278	267	948	318	343	370
164	494	135	195	268	949	327	343	371
165	495	107	117	269	950	317	327	372
166	496	87	107	270	951	291	305	373
167	497	73	82	271	952	278	291	374
168	498	73	101	272	1035	227	133	375
169	530	31	50	273	1036	141	146	376
170	531	163	28	274	1037	159	161	377
171	532	28	39	275	1070	373	374	378
172	533	65	75	276	1071	103	130	379
173	534	74	75	277	1072	101	127	380
174	535	89	73	278	1073	127	175	381
175	536	50	54	279	1074	222	269	382
176	567	7	10	280	1075	316	346	383
177	568	14	45	281	1076	348	375	384
178	569	115	130	282	1077	273	320	385
179	570	59	75	283	1078	220	239	386
180	571	12	19	284	1079	105	129	387
181	572	7	12	285	1080	14	40	388
182	604	89	110	286	1081	351	353	389
183	605	110	125	287	1082	278	300	390
184	606	125	149	288	1083	268	276	391
185	607	144	167	289	1084	334	347	392
186	608	167	185	290	1088	763	277	393
187	609	208	229	291	1087	277	292	394
188	610	216	229	292	1110	173	180	395
189	611	201	216	293	1111	180	191	396
190	612	172	189	294	1112	241	250	397
191	613	155	172	295	1113	250	254	398
192	643	33	35	296	1114	254	267	399
193	644	35	56	297	1115	229	251	400
194	645	56	70	298	1116	133	139	401
195	646	70	80	299	1117	139	141	402
196	647	80	89	300	1118	145	148	403
197	648	102	117	301	1119	100	117	404
198	649	93	102	302	1120	117	135	405
199	650	87	81					


Figura 113. Barras que representan los cables del anillo tensegrity.

APLICACION DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATTRADAS

C. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA





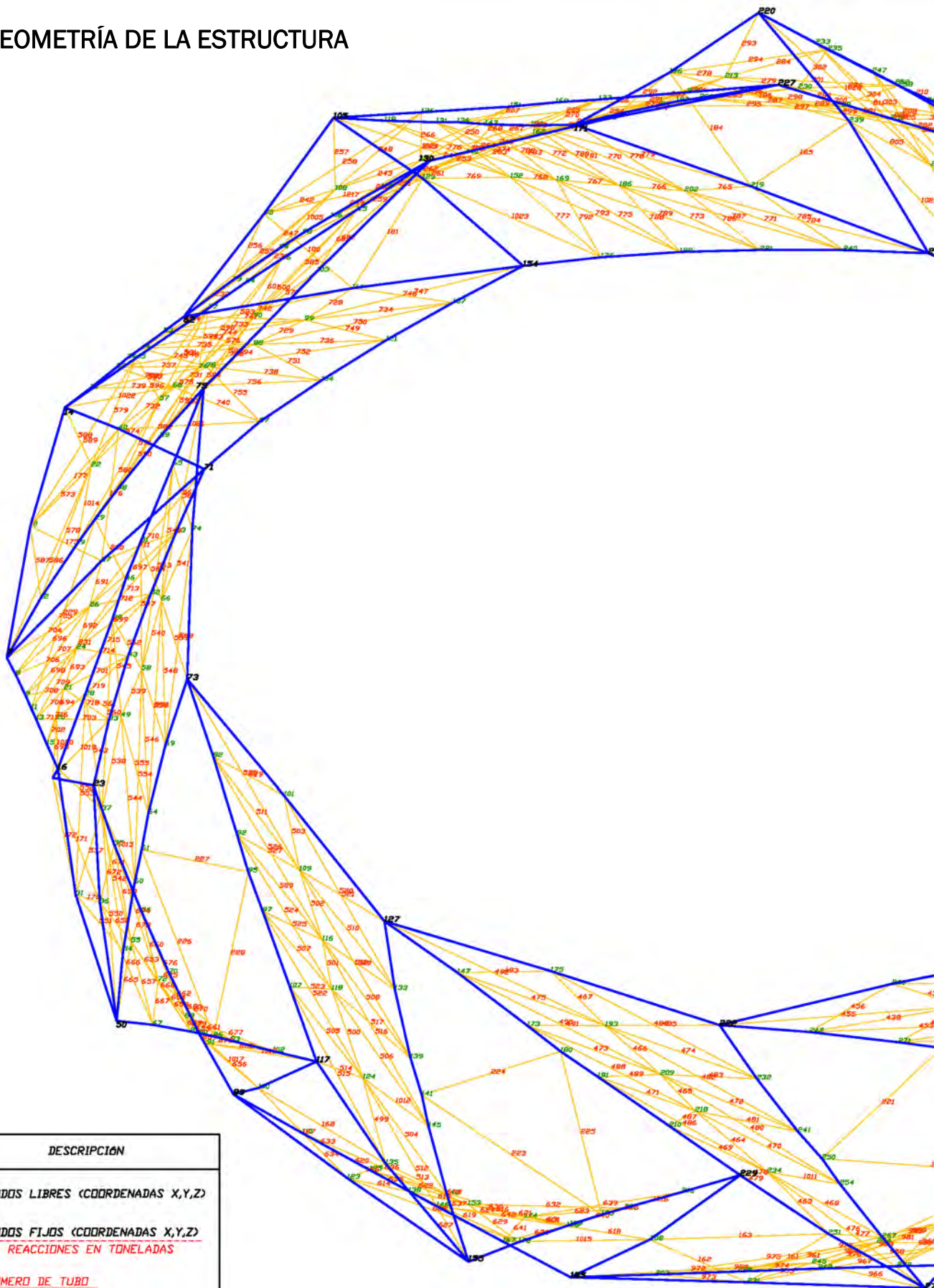
SÍMBOLO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
000<0,0,0>	407	NUDOS LIBRES (COORDENADAS X,Y,Z)
000<0,0,0> R=0.00	40	NUDOS FIJOS (COORDENADAS X,Y,Z) REACCIONES EN TONELADAS
000	41	NOMERO DE TUBO BARRA TIPO TUBO
000	405	NOMERO DE CABLE BARRA TIPO CABLE
000	60	NOMERO DE VIENTO BARRA TIPO VIENTO
000	810	NOMERO DE MEMBRANA BARRA TIPO MEMBRANA
	709	ELEMENTOS QUE REPRESENTAN LA MEMBRANA
		FORMA INICIAL
000		NUDOS INTERMEDIOS CABLES
000		NUDOS INTERMEDIOS MEMBRANA

MEMBRANA DOMO			MEMBRANA DOMO		
No.	BARRA	NUDOS	No.	BARRA	NUDOS
1	1	244 257	61	126	183 190
2	56	260 273	62	127	183 199
3	67	260 307	63	128	178 212
4	58	215 260	64	120	180 183
5	59	214 237	65	130	190 212
6	60	237 270	66	131	183 224
7	61	226 237	67	132	144 183
8	62	237 256	68	133	149 190
9	63	204 237	69	135	166 175
10	64	214 226	70	136	168 211
11	65	237 246	71	137	166 222
12	66	214 256	72	138	175 211
13	67	224 237	73	140	103 134
14	68	237 289	74	141	134 170
15	69	256 270	75	142	111 134
16	71	179 215	76	144	164 190
17	72	170 215	77	145	162 184
18	73	130 215	78	146	150 184
19	74	170 179	79	147	164 214
20	77	335 374	80	148	144 184
21	78	339 335	81	149	150 180
22	79	330 335	82	150	161 184
23	81	256 274	83	151	180 214
24	82	274 297	84	152	184 224
25	83	274 298	85	153	184 204
26	84	253 274	86	154	182 214
27	85	274 289	87	156	74 111
28	86	256 298	88	157	111 112
29	87	274 304	89	158	73 111
30	88	253 256	90	159	74 112
31	89	224 274	91	162	260 320
32	90	253 297	92	163	215 273
33	93	330 348	93	164	260 289
34	94	307 330	94	165	246 260
35	95	320 330	95	166	204 260
36	96	307 348	96	167	335 373
37	99	257 269	97	168	330 374
38	100	211 257	98	169	284 335
39	101	257 301	99	170	304 335
40	104	236 253	100	171	289 335
41	105	223 236	101	172	227 257
42	106	256 266	102	173	269 301
43	107	212 236	103	174	199 257
44	108	236 284	104	175	257 284
45	109	253 266	105	176	73 132
46	110	236 244	106	177	101 166
47	111	212 253	107	178	132 144
48	112	224 236	108	179	132 199
49	113	199 236	109	180	130 134
50	114	212 223	110	181	103 111
51	116	301 346	111	182	134 204
52	117	301 329	112	183	134 144
53	118	307 373	113	184	132 160
54	119	329 346	114	185	274 284
55	120	101 132	115	186	134 161
56	121	112 132	116	187	101 112
57	122	132 166	117	188	112 160
58	123	183 212	118	189	160 166
59	124	149 183	119	190	127 132
60	125	178 183	120	191	298 335

Figura 114. Barras que representan las membranas domo superior.

APLICACION DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATIRADAS

C. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA



SÍMBOLO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
000(0,0,0)	407	NUDOS LIBRES (COORDENADAS X,Y,Z)
000(0,0,0) R=0,00	40	NUDOS FIJOS (COORDENADAS X,Y,Z) REACCIONES EN TONELADAS
000	41	NOMERO DE TUBO BARRA TIPO TUBO
000	405	NOMERO DE CABLE BARRA TIPO CABLE
000	60	NOMERO DE VIENTO BARRA TIPO VIENTO
000	810	NOMERO DE MEMBRANA BARRA TIPO MEMBRANA
▲	709	ELEMENTOS QUE REPRESENTAN LA MEMBRANA
---		FORMA INICIAL
000		NUDOS INTERMEDIOS CABLES
000		NUDOS INTERMEDIOS MEMBRANA

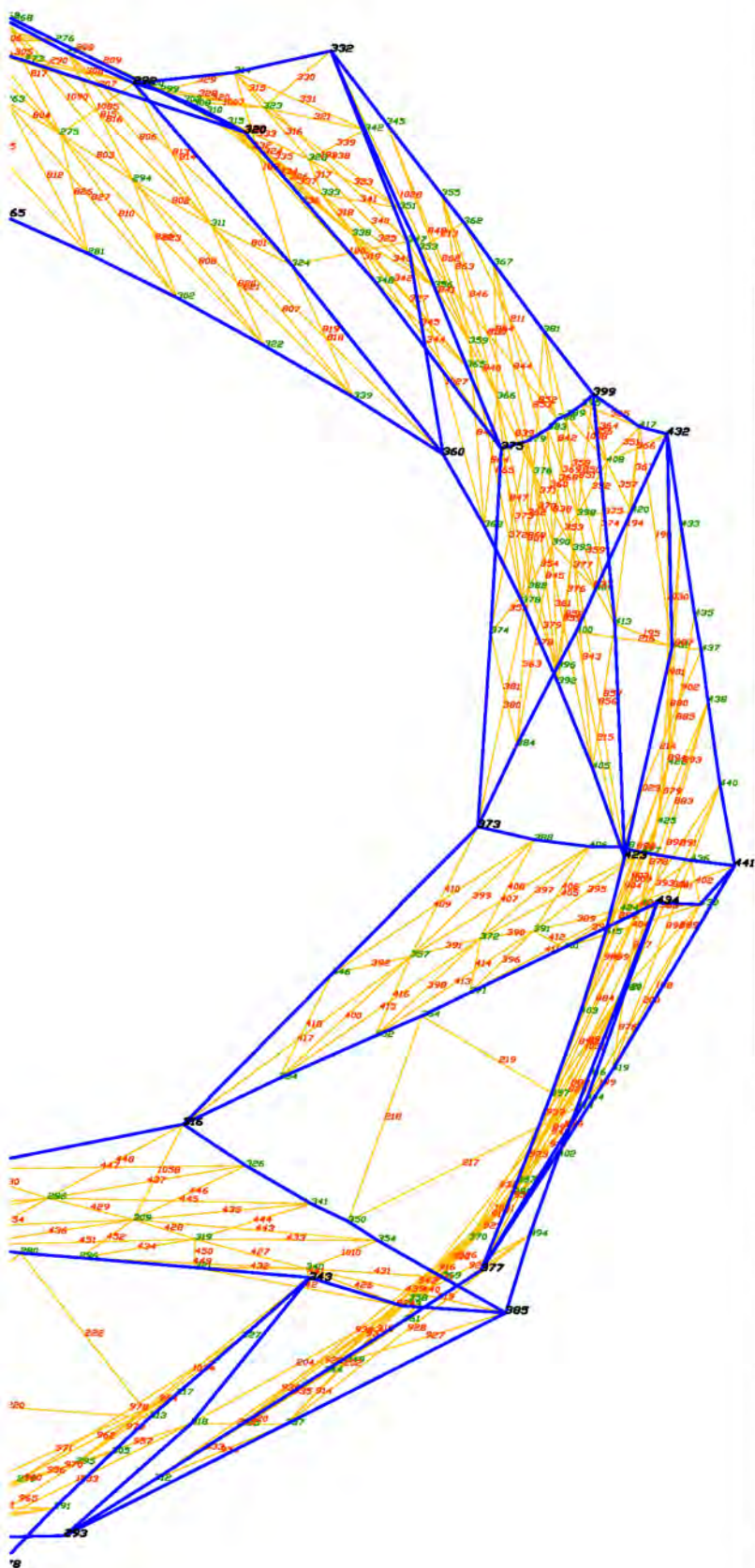


Figura 115. Barras que representan las membranas del anillo tensegrity.

El programa de cálculo WinTess está formado por: (Ver apéndice B) y manual WinTess [26]

- Nudos: dan la geometría
- Barras: dan el cálculo
- Elementos: dan las cargas.

En las figuras anteriores hemos desarrollado la geometría de la estructura, en ellas podemos leer la tipología de las barras según WinTess.

- Barras tipo 0 = Tubos (Fig.111)
- Barras tipo 1 = Membrana (Fig.114,115)
- Barras tipo 5 = Cables (Fig.112,113)
- Barras tipo 6 = Vientos (Fig.111)

La tabla N°1 describe las características mecánicas de las barras utilizadas para el cálculo estructural.

- En los tubos se describe el material, el nombre comercial, el diámetro, la sección, el peso, la densidad y el módulo de elasticidad.
- En los datos de los cables se describe el nombre comercial, el material, el diámetro, la sección, la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión.
- En los datos de la membrana se describe el nombre comercial, la resistencia, el módulo de elasticidad, el peso. Todos estos datos importantes a la hora de realizar el cálculo.

MEMBRANA. C

Las barras que simulan la membrana se describen dentro del programa de la siguiente forma:



Figura 116. Representación de la membrana en WinTess.

En WinTess aparecen los elementos que simulan una superficie. Semejan una estructura de cables (líneas) muy tupidas, lo cual hace que imitan la membrana, aunque si creamos un rombo de barras se puede alargar, si fuese una membrana no sería así.



Figura 117. Representación de barras y elementos en WinTess.

En el programa se generan unas diagonales para que los cuadrados no se deformen (Fig.117); en el modelo de estudio de la tesis la estructura está formada por elementos triangulares.

En nuestro caso se calcula una estructura en membrana por un programa de barras.

¿Por qué aparecen superficies?

Por dos razones:

1. Por aspecto formal: para ver las estructuras y entenderlas.
2. Para poder aplicar las cargas: se aplican sobre una superficie en el caso del WinTess en los elementos.

Después de estos datos básicos procederemos a aplicar las cargas, peso propio, pretensado, viento y nieve.

VALORES DE LAS CARGAS Y DÓNDE ESTÁN APLICADAS 3.2.2.

Las cargas se aplican en los nudos en el caso de cargas puntuales como por ejemplo si colgamos un objeto, una luminaria, un elemento de sonido, etc.



Figura 118. Representación de cargas puntuales en WinTess.

La carga se divide en tres, en los elementos se reparten por sus respectivos nudos.

Un nudo con área más grande entonces tendrá una carga más grande. La carga que llega a cada nudo se puede ver al tocar el nudo dentro de los íconos del programa. A la izquierda hay un icono que muestra la magnitud de las cargas que llegan a cada nudo. Sale la dimensión en toneladas.

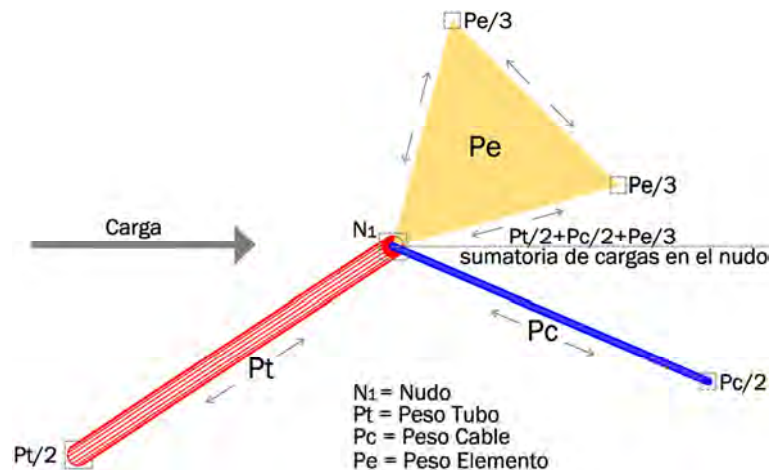


Figura 119. Esquema de cargas en WinTess.

En el esquema de cargas Fig. 119 podemos observar que en el nudo N1, antes de poner cualquier carga si hacemos la sumatoria corresponde al peso propio de los elementos que lo conforman, tubos, cables y membrana.

Esto corresponde al estado inicial del sistema, de pretensión y rigidez de los elementos que lo componen.

Cuando aplicamos una carga como por ejemplo el viento, ésta se suma al estado inicial del sistema.

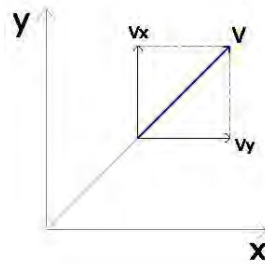
$$F_{\text{nudo}} = A_{\text{nudo}} \times W \times C_p$$

Donde: F_{nudo} = fuerza del viento en un punto.
 A_{nudo} = área por nudo.
 W = Presión dinámica. (KN/m² ó Kg/m²)
 C_p = coeficiente de presión.

En el WinTess el viento siempre lo considera horizontal.

$$P = f(V, \alpha)$$

La dirección del viento depende de (Vx, Vy)



V= Viento - resultante de la suma de los dos valores.

Y sus reacciones serán:

$$R_T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$

¿Cómo están aplicadas las cargas?

Cómo explicamos anteriormente el programa WinTess es un software de barras, estas barras pueden ser cables de acero, tubos de acero, o pueden ser una membrana.

Una barra que representa la membrana tiene un ancho del material que es el que usamos como membrana, evidentemente cuando viene otra barra de membrana los anchos se solapan, el resultado es como un tejido de membranas; este ancho sale más o menos de la mitad de las barras paralelas, casi siempre son mallas regulares, sea triangular o sea cuadrada la malla.

El ancho de las barras se deduce automáticamente en el programa, e intenta buscar este ancho de franja; cuando no son paralelas, por ejemplo en el triángulo, lo que hace es un ancho paralelo, el programa supone que hay otra barra paralela.

Representación de cargas

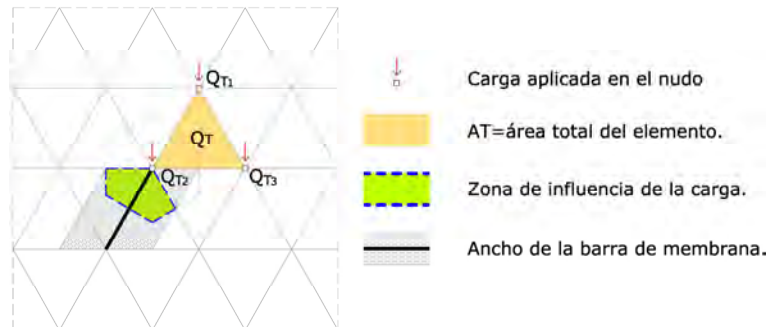


Figura 120. Representación de cargas superficiales en WinTess.

Cargas en WinTess:

- Peso Propio
- Pretensado
- Viento
- Nieve
- Presión Interna

Estas tres últimas son cargas superficiales sino hubiera tela no habría cargas, no se podrían aplicar.

La tela está dada por triángulos cuyos vértices, por supuesto, coinciden con los nudos de la malla (Fig.120) por tanto si la malla es cuadrada habrán dos triángulos (Fig. 117).

Si la malla es triangular coincide el triángulo con la malla misma, si fuera un pentágono por ejemplo, tendría varios triángulos.

El triángulo recibe la carga de viento, nieve o presión interna porque tiene superficie.

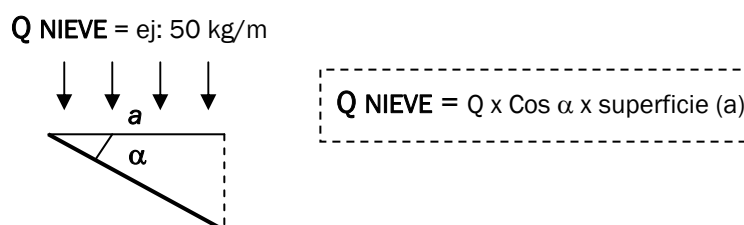
Las cargas se aplican en la superficie y dan un valor, la superficie tiene un área T , donde:

AT = Área total del triángulo, multiplicada por la presión de viento, o por la presión de la nieve, o por la presión interna, da la **carga del elemento**. (Fig.120)

$$Q_T = A_T \times \text{carga}$$

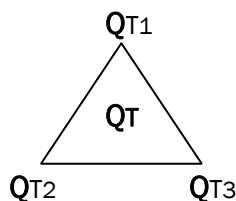
La presión del viento se halla según la velocidad y el ángulo al que llega el viento, o en WinTess se puede escribir manualmente el coeficiente de presión.

En el caso de la nieve tiene una proyección vertical con una carga determinada, la Q de nieve, si el elemento está en determinada posición, según el ángulo se multiplica directamente por la superficie proyectada a . Si el elemento estuviera vertical la carga sería 0.



Ejemplo de las **cargas en el triángulo:**

$$Q_T = Q_{T1} + Q_{T2} + Q_{T3}$$



El triángulo tiene una carga T esta carga se divide en 3 partes que no son iguales, el programa se encarga de dividir esta T en T_1 , T_2 , T_3 , tal que la carga que hemos calculado, el triángulo la divide en los 3 nudos.

Esto lo hace con todos los triángulos de la estructura, por tanto al final por ejemplo la **carga de viento en un nudo** es la sumatoria de cargas asignadas al nudo que vienen de cada triángulo:

$$Q_{TN} = Q_{T1EI} + Q_{T1EJ} + Q_{T1EL} + N \text{ (elementos)}$$

(viento)

Para reforzar la idea: al nudo le llegan una serie de cargas que salen de haber dividido la carga del triángulo en 3 partes no iguales, son proporcionales al ángulo interior del triángulo.

Por otra parte un punto representa otras áreas de los triángulos que tiene al lado, esta área del triángulo se divide en un trozo de área, un punto no tiene área sino una zona de influencia, según el matemático Georgy Voronoi “cada punto tiene un área que le corresponde”, el punto es como si fuera el núcleo del área.

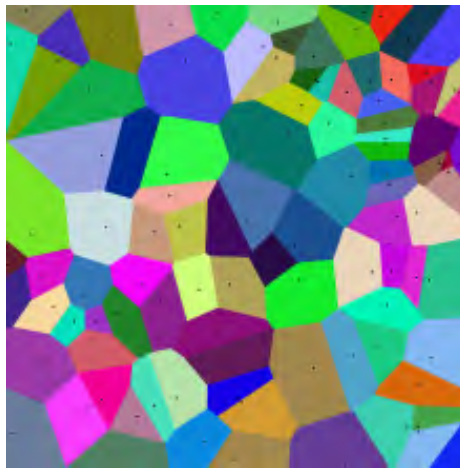


Figura 121. Diagrama de Voronoi.

Después de este ejemplo ya tenemos explicada el área de influencia del nudo, entonces si yo divido Q_{TN} por el área del nudo, es igual a la presión del nudo.

$$\frac{Q_{TN}}{A_N} = \text{Presión del nudo}$$

Este valor en WinTess el programa lo genera, la presión está aplicada en el triángulo y pueden haber diferentes presiones que se contrarresten y den cero.

Si pensamos en la carga de viento primero la buscamos en el punto, que es la suma vectorial de las cargas que le llegan por cada triángulo que contribuye al punto.

Para definir la presión de viento en un nudo es la carga de viento dividida por el área de influencia del nudo.

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Superficie}}$$

Y sus unidades están dadas por ejemplo en Newtons/mm², kg/m², ton/ m², etc.

PRETENSIÓN A.

Este punto es clave en nuestro estudio porque ayuda al equilibrio de la estructura. La pretensión está aplicada dentro del programa en la membrana y en los modelos físicos construidos a escala también.

El pretensado es la tensión de la membrana antes de la aplicación de cargas, este valor lo usará la estructura en el cálculo. Las barras que son membranas asumen las características mecánicas que le hemos asignado como membrana según tabla N°1.

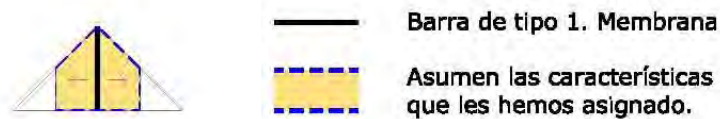


Figura 122. Representación de la membrana en WinTess.

Esquema de pretensión

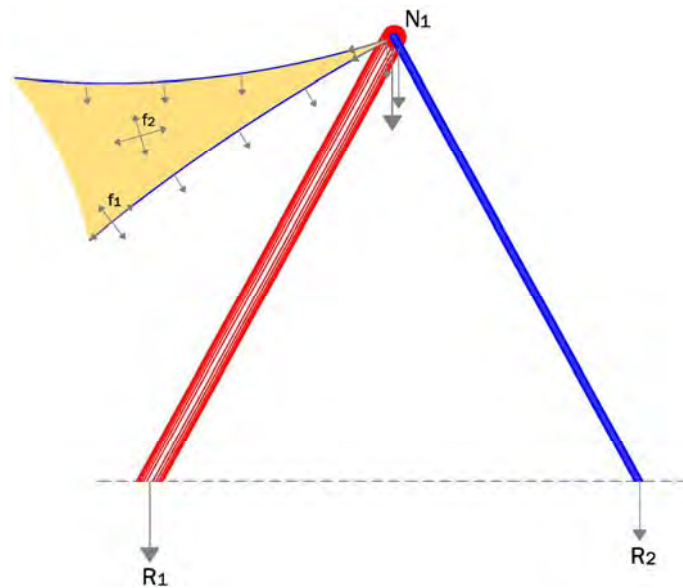


Figura 123. Pretensión en WinTess.

En el esquema tengo un cable, la membrana y un mástil, todos tienen su peso propio. WinTess pone la mitad del peso arriba y abajo, en el caso del mástil y del cable. En el caso del cable de borde de la membrana (relinga) lo pone en todos los nudos de borde. En el caso de la membrana también pone el peso en los nudos.

En el punto superior **N1** del esquema todo son fuerzas. Si se pretensa la membrana, aparecen fuerzas en el borde **f1**, cuando se esté en un punto del medio **f2**, la fuerza se distribuye en 4 direcciones y esto da casi 0 en los nudos del medio, es casi plano, excepto en los bordes. Resumiendo en el punto **N1**:

$$F_{npt} = F_{npppt} - F_{npp}$$

Donde:

F_{npt}= Fuerza n de pretensado.

F_{npppt}= Fuerza desequilibrada n de peso propio y pretensado.

F_{npp}= Fuerza n desequilibrada de peso propio.

Estos valores dependen de la forma, lo que se tiene en cuenta son las fuerzas de las barras, el pretensado de las barras, la tensión de las barras.

Entonces para la pretensión de la membrana en el programa de cálculo, lo que se observa es la fuerza de las barras con y sin pretensado, se ve la importancia del % de pretensado. En WinTess pones la fuerza de pretensión, lo equilibras y entonces las barras quedan pretensadas.

Pretensado

Los niveles de pretensado se eligen como resultado de la obtención de la forma y tienen que aplicarse y mantenerse durante el montaje y la vida útil de la estructura. El pretensado mínimo exigido a las membranas depende de la rigidez, de la resistencia del material y de la eficacia de la superficie (es decir, de la curvatura).

En el pretensado hay la idea de en cuanto más mejor, pero hay un límite lógico porque cuánto más, entonces más cuesta físicamente de pretensar y más grande es la estructura, por tanto es ilógico hacer una estructura con elementos enormes para aguantar solamente el pretensado.

El límite es práctico, es empírico, se usan valores como recomienda la guía europea de: por ejemplo en las estructuras de poliéster con protección en PVC no debe ser menor al 1.3% del promedio de la resistencia a la rotura del material en las dos direcciones de urdimbre y trama.

En una estructura cerrada como la nuestra, al inicio se tiene una membrana más pequeña y cuando la pones en su sitio es cuando se pretensa. En membranas abiertas como por ejemplo un paraboloide se pueden pretensar los cables para que la pretensión pase a la membrana. En nuestro caso teniendo en cuenta la guía europea de diseño hemos usado la membrana Ferrari Floutop T2 1302 con una resistencia de 16000 Kg/m y la estamos pretensando un 1.5% de la resistencia de su urdimbre y 1.7% de la trama, que corresponde a 240 kg/m. (Fig.124)

Módulo de elasticidad de la membrana usada Ferrari Floutop 1302 es de 80 toneladas.

$$\begin{aligned} \text{Tensión} &= E \times \sigma \\ \sigma &= E \times \varepsilon \end{aligned}$$

$\sigma = 80 \times 0.3 \% = 0.24 \text{ ton} = 240 \text{ kg.}$ (% teniendo en cuenta la guía europea de diseño)

Ejemplo de una barra pretensada

barra tipo 1	-dl (mm)	+axial (ton)	+tensión (kg/m)	ratio
barra 1001	-3.0	0.206	206	0.06

dl: diferencia de longitud inicial & longitud final.

axial: fuerza axial (por el eje) puede ser compresión o tracción.

tensión: axial/sección de la barra.

Si una barra tipo 1 membrana pretensada tiene axial positivo y ha disminuido su longitud inicial, quiere decir que sigue en tracción debido al pretensado.

¿Qué es la ratio?

La resistencia de cálculo en un elemento depende de su resistencia a la rotura, de su límite elástico, de su geometría, etc. y del coeficiente de seguridad aplicado. La ratio (es un porcentaje) en cables (tracción) y membrana (tracción) se define como:

$$\frac{\text{axil} \times \text{coeficiente de seguridad total}^*}{\text{resistencia a rotura}}$$

* total= incluye mayoración de cargas y minoración del material

La ratio (compresión) en tubos se define como:

$$\frac{\text{axil} \times \text{coeficiente de seguridad} \times \text{coeficiente de pandeo}^*}{\text{resistencia a rotura}}$$

*pandeo= según Eurocódigo 3. En el análisis de nuestra estructura no pandea ningún tubo porque la ratio siempre es <1.

Los coeficientes de seguridad utilizados son dados por WinTess que tienen en cuenta la guía europea:

- en la membrana = 5
- en los tubos = 1,65
- en los cables = 3

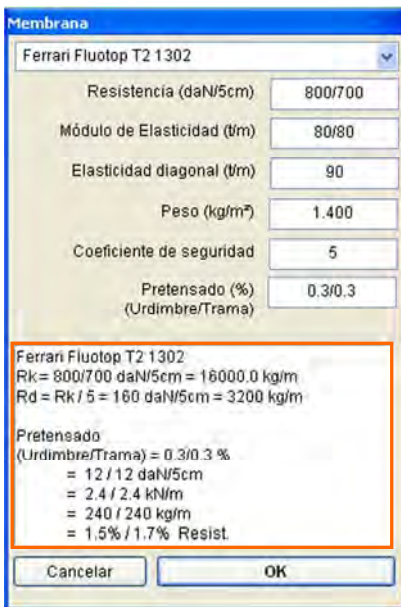


Figura 124.

Resistencia de la membrana Ferrari Fluotop T2 1302 y pretensado según la guía europea de diseño.

Unidades de tensión en WinTess

- En las barras tipo 1 que representan la membrana la unidad de tensión es kg/m ó Ton/m.
- En las barras tipo 0 que representan los tubos la unidad de tensión es kg/cm².
- En las barras tipo 5 y 6 tipo cables y vientos la unidad de tensión es kp/cm².

Unidades de carga y reacciones en WinTess

La carga puede ser repartida (Ton/m²) o puntual (Ton). En WinTess las unidades de las reacciones son sólo en toneladas.

Las reacciones si son en un punto son en toneladas, si hubiera una reacción en línea que no es el caso sería entonces ton/m y en una zapata Ton/m².

La tensión en las barras es diferente, la carga es la misma. Las barras tienen una fuerza en el eje que es la axial, su unidad es en toneladas y la tensión es dividirla si es lona por el ancho de la lona, si es tubo por la sección del mismo, etc.

Si es una barra rígida o tiene peso propio hay que sumarle la flexión, a la tensión total. En nuestra estructura no hay barras rígidas pero si hay flexiones de peso propio de las barras tipo tubo.

En WinTess las cargas que se aplican en una membrana son superficiales, se llevan a que sean cargas puntuales, a base de que cada nudo tiene una superficie, entonces esta superficie por la carga repartida me da la carga puntual del nudo. (Fig.118)

En el caso del pretensado en un ejemplo sencillo para entender el concepto básico, si tenemos una tela, le aplicamos una carga, un peso, la tela se hunde, si tiro de ella, el peso se deforma menos; pero sin pretensar aguanta el peso más deformado. Concluyendo, simplemente si le quitas el pretensado hay más deformación.

PESO PROPIO B.

Como lo explicamos en la figura 119 el estado inicial de la estructura corresponde a su propio peso + la pretensión del sistema. El **peso propio** de la estructura está dado en las características de cada barra (tubos, cables y membrana), en nuestro caso el peso total de la estructura es de **60.864 kg**.

Para el análisis y la definición de los elementos que conforman la estructura, se procedió a hacer diferentes casos de estudio:

- **Caso 1.** primero se probó la estructura básica ante su propio peso, sin membrana, sólo cables
- **Caso 2.** estructura básica ante su propio peso, sin membrana, sólo cables y reforzada con más cables.
- **Caso 3.** estructura básica ante su propio peso, sin membrana, sólo cables y reforzada con más cables y tubos exteriores.
- **Caso 4.** se probó la estructura ante su propio peso, con membrana, cables y tubos exteriores.

Las tablas de datos que arroja el programa, analizan los siguientes ítems:

Nudos datos finales (coordenadas, desplazamientos y reacciones)

Nudo	Xf(m)	Yf(m)	Zf(m)	Rx(T)	Ry(T)	Rz(T)	RT(T)	dx/mm	dy/mm	dz/mm	dT/mm
298	37.342	1.759	13.814	0	0	0	0	-94.	-13.	-468.	478.

Barras datos finales (axiales, tensiones y ratio)

Barra	N-1	N-2	Tipo	Lf	A	Axial	dL	Tensión	Ratio
381	374	384	1	2.906	1.525	0.666	8.7	0.437	0.19

Elementos datos finales (área, coeficiente de presión y pendiente)

Elem.	N1	N2	N3	Ax	Ay	Az	At	Peso	Coef.	Pendiente
1	273	260	320	1.081	5.292	11.740	12.923	16.861	0.00	24.7°

Cargas totales (peso propio)

Nudo	Ax(m ²)	Ay(m ²)	Az(m ²)	At(m ²)	Ptx(T)	Pty(T)	Ptz(T)	Ptt(T)	kg/m ²
20	0	0	0	0	0	0	-0.695	0.695	-

CASO 1. CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ANTE SU PROPIO PESO SIN MEMBRANA (SIN ELEMENTOS) - SÓLO CABLES.

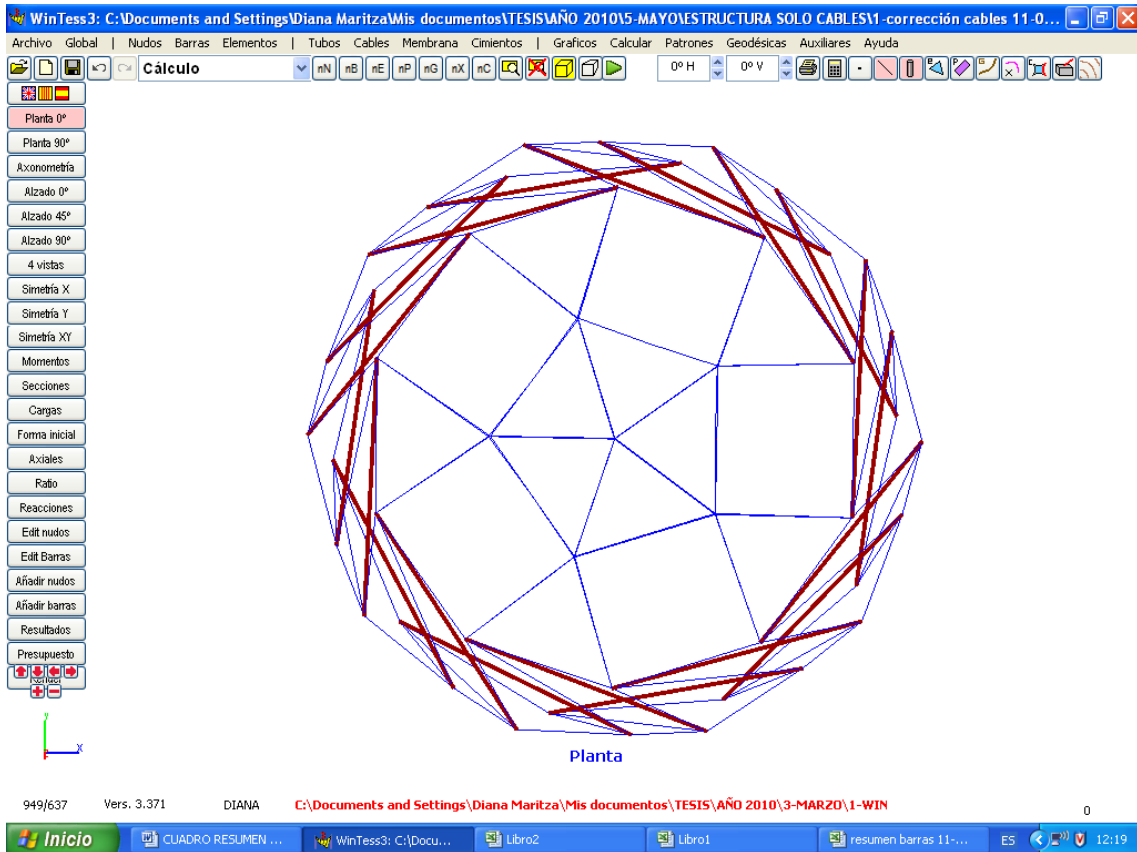


Figura 125. Vista en planta de la estructura.

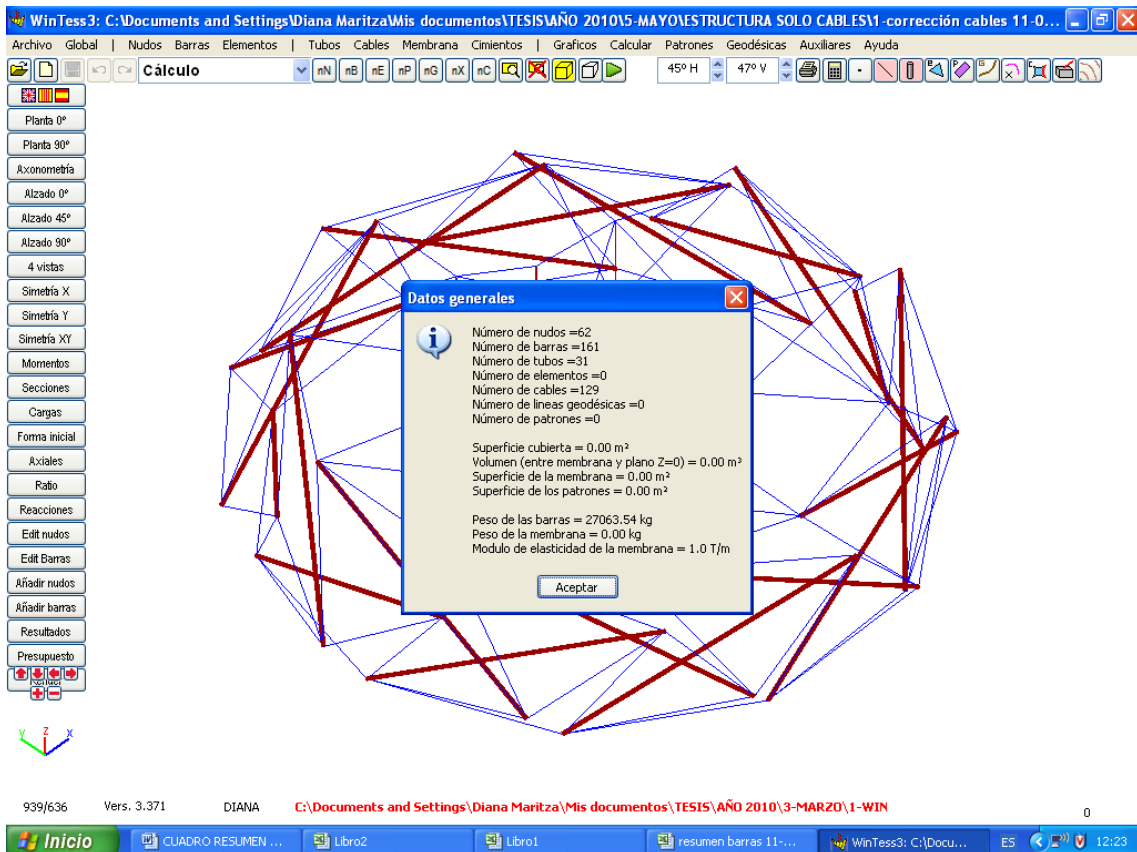


Figura 126. Datos generales de la estructura.

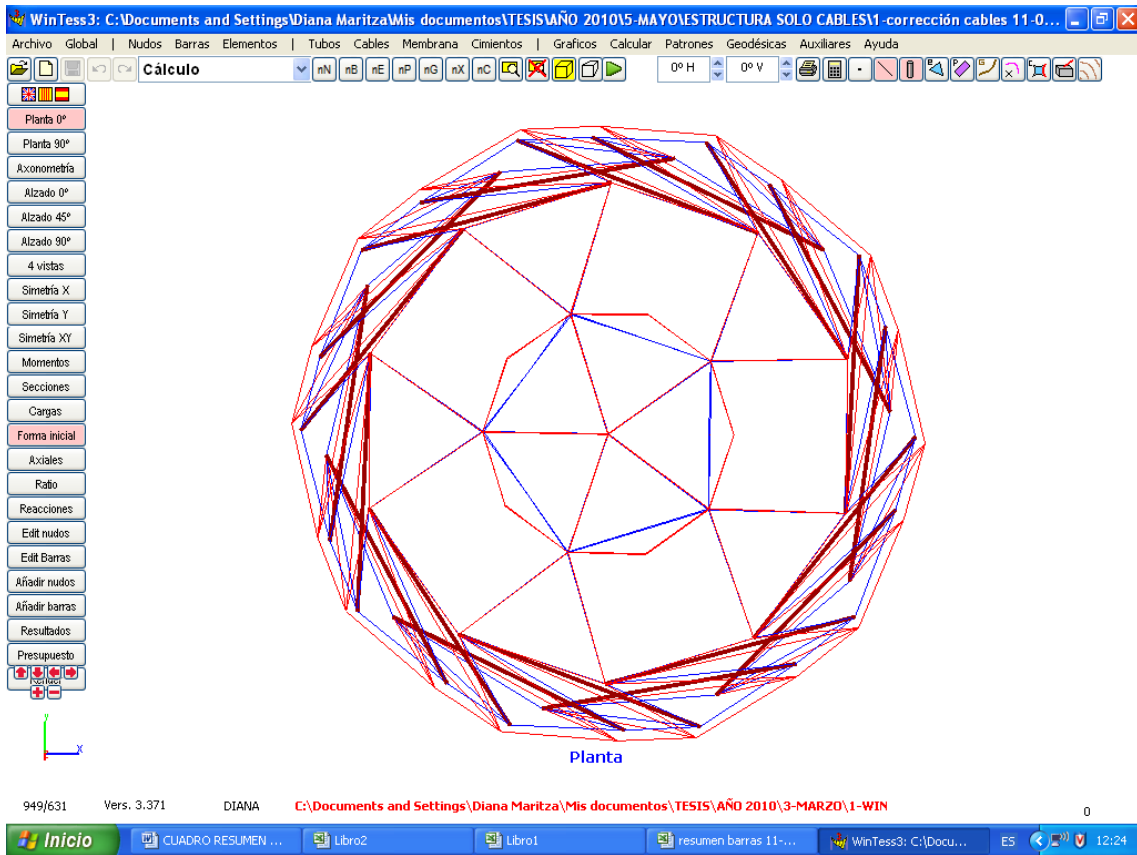


Figura 127. Planta - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

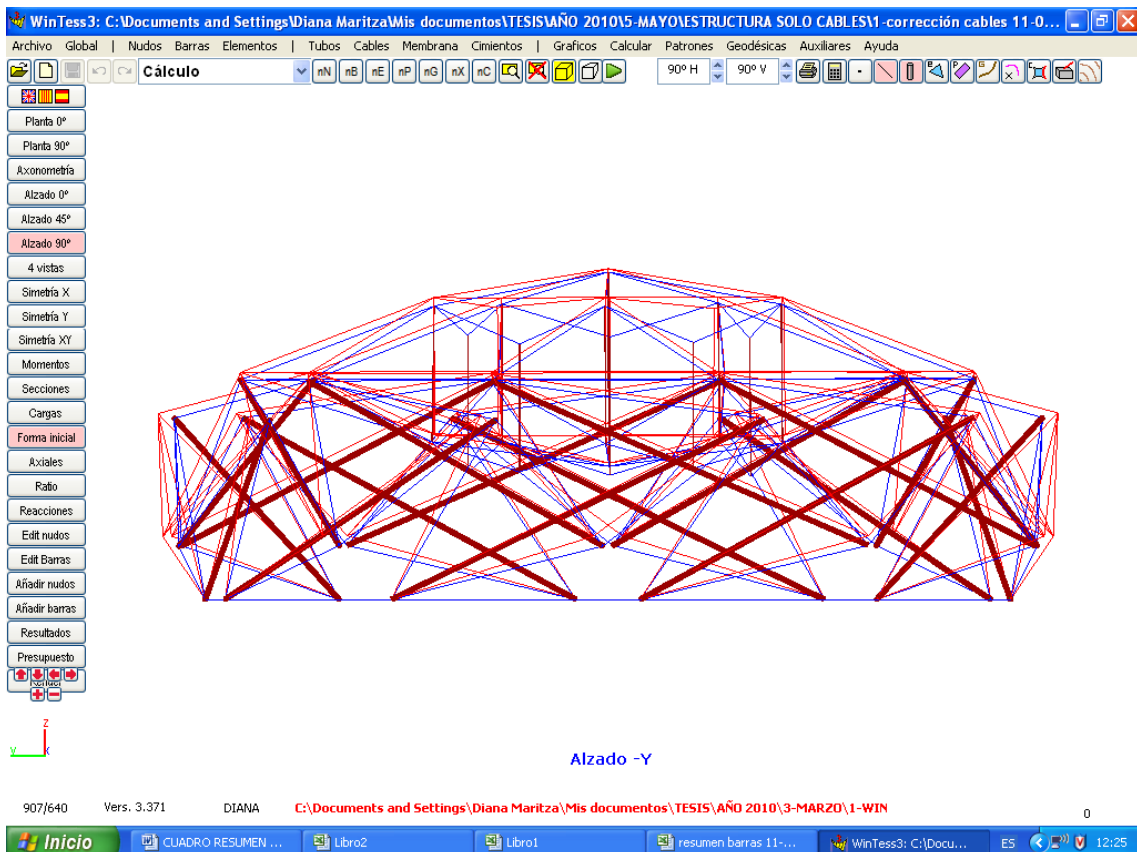


Figura 128. Alzado - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

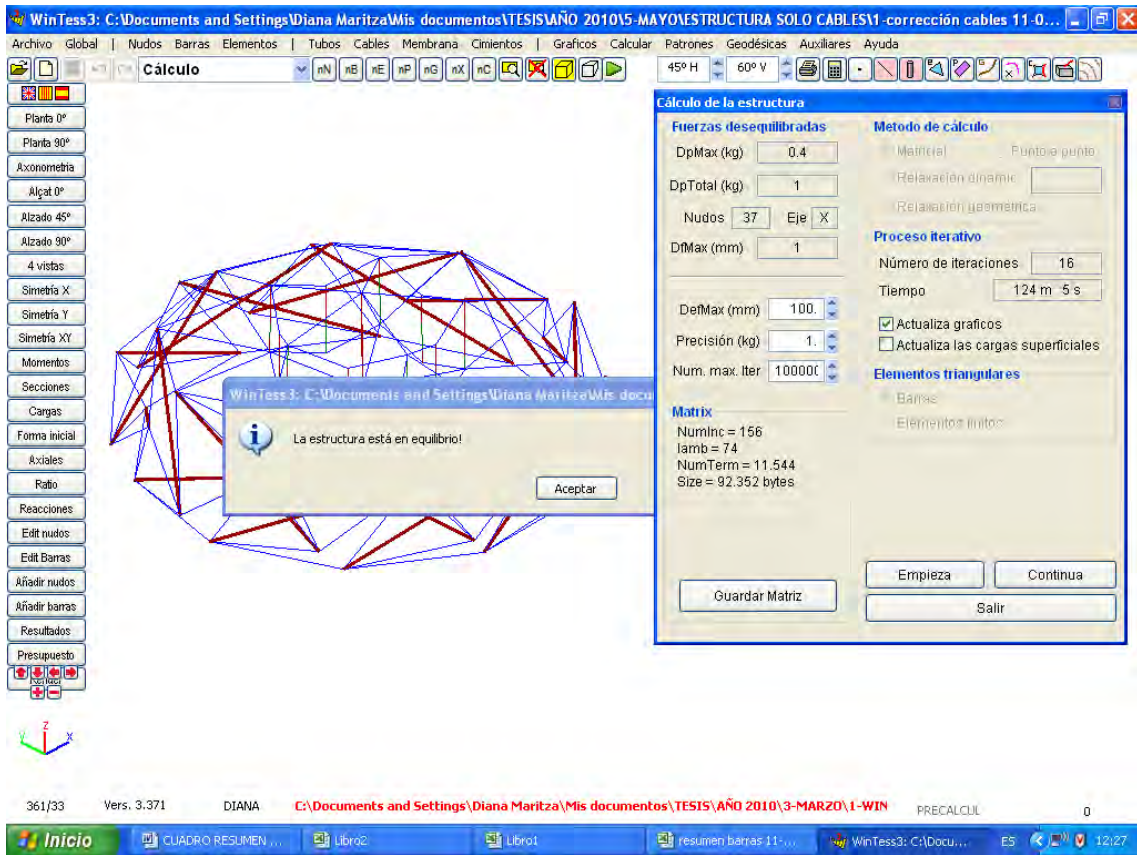


Figura 129. La estructura está en equilibrio ante su propio peso.

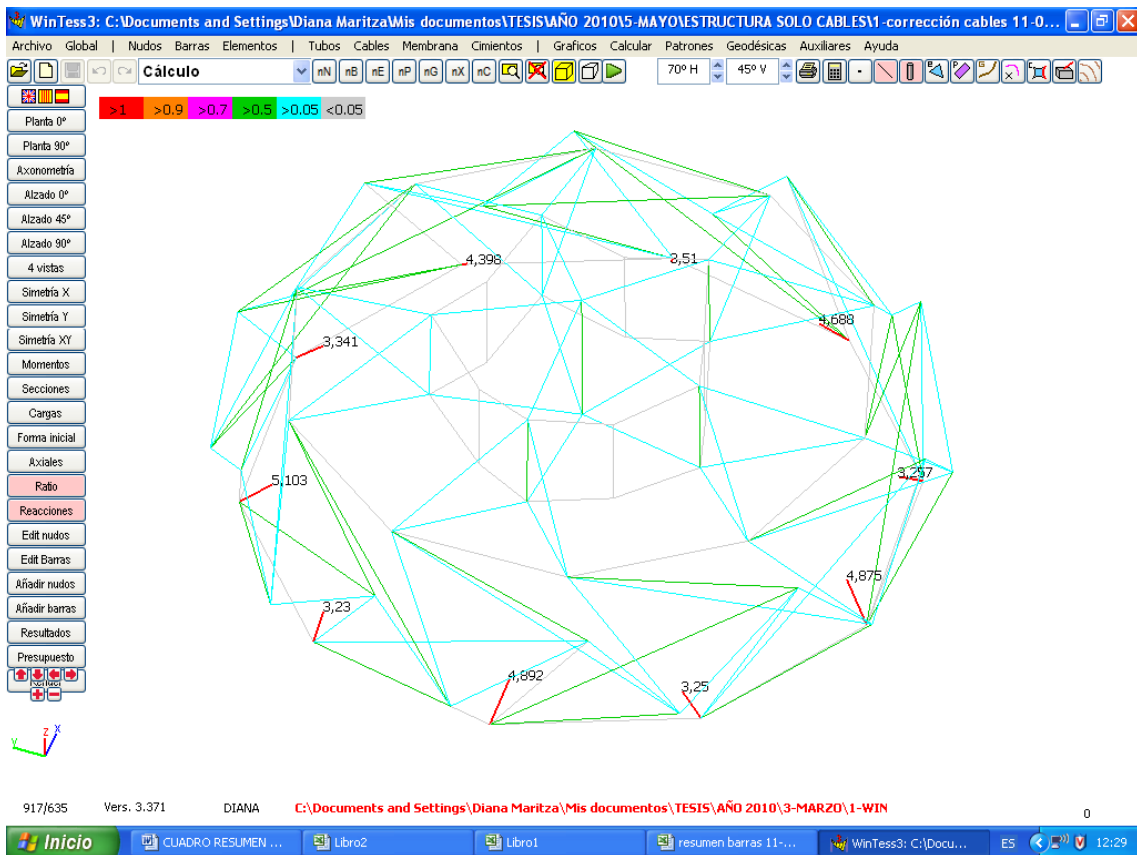


Figura 130. Esquema de ratio y reacciones de la estructura.

CASO 2. CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ANTE SU PROPIO PESO SIN MEMBRANA, SÓLO CABLES – REFORZADA CON MÁS CABLES

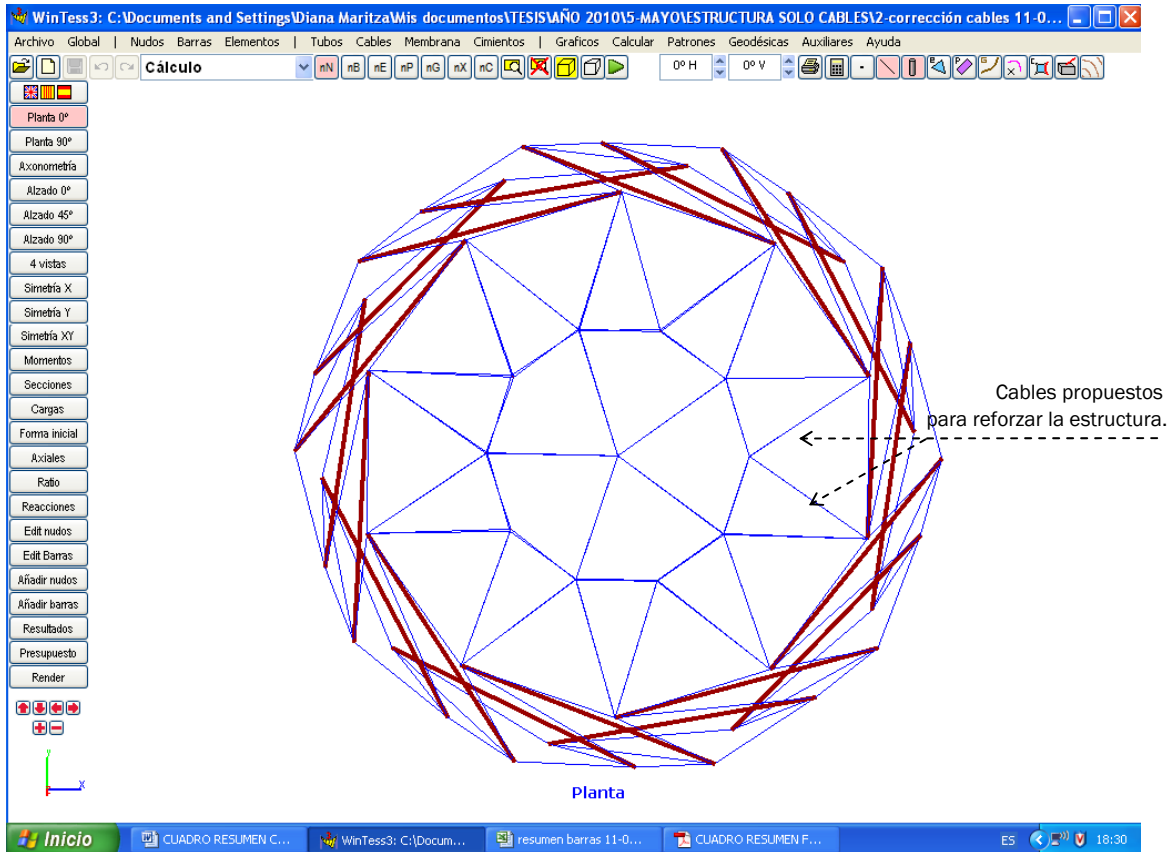


Figura 131. Vista en planta de la estructura.

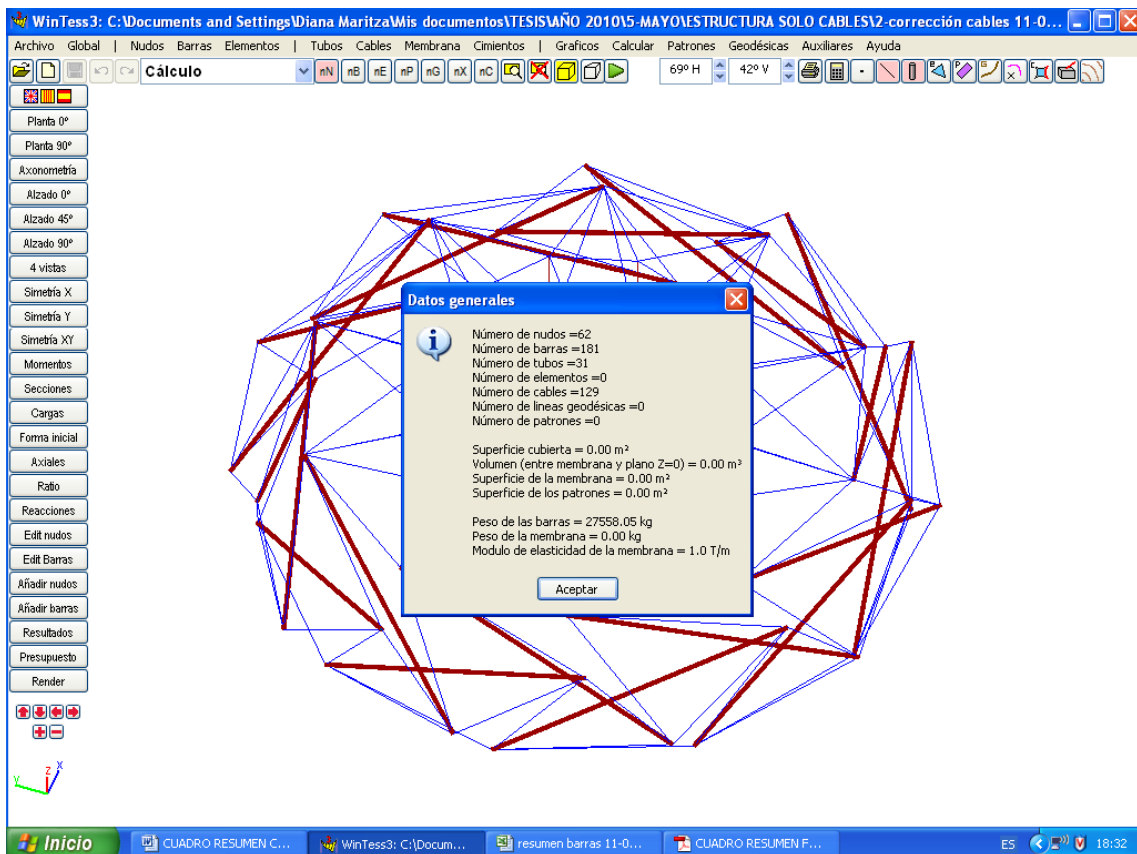


Figura 132. Datos generales de la estructura.

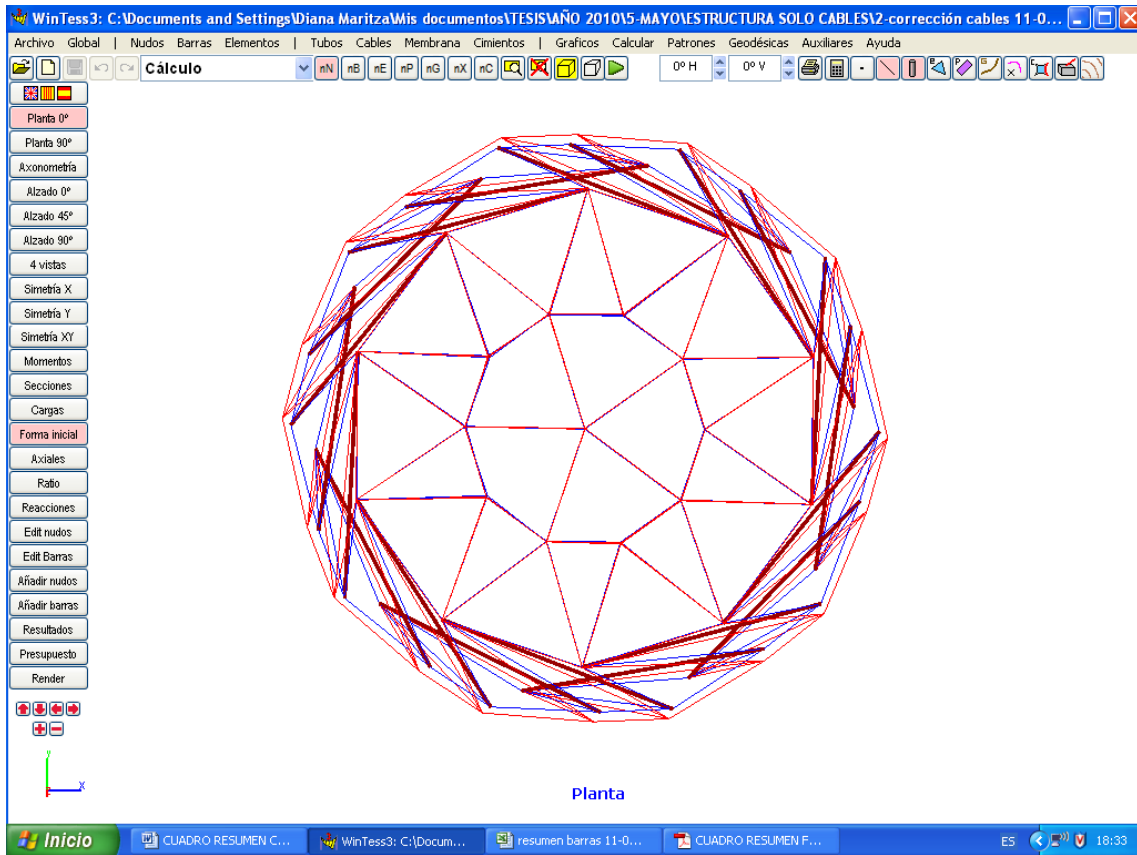


Figura 133. Planta - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

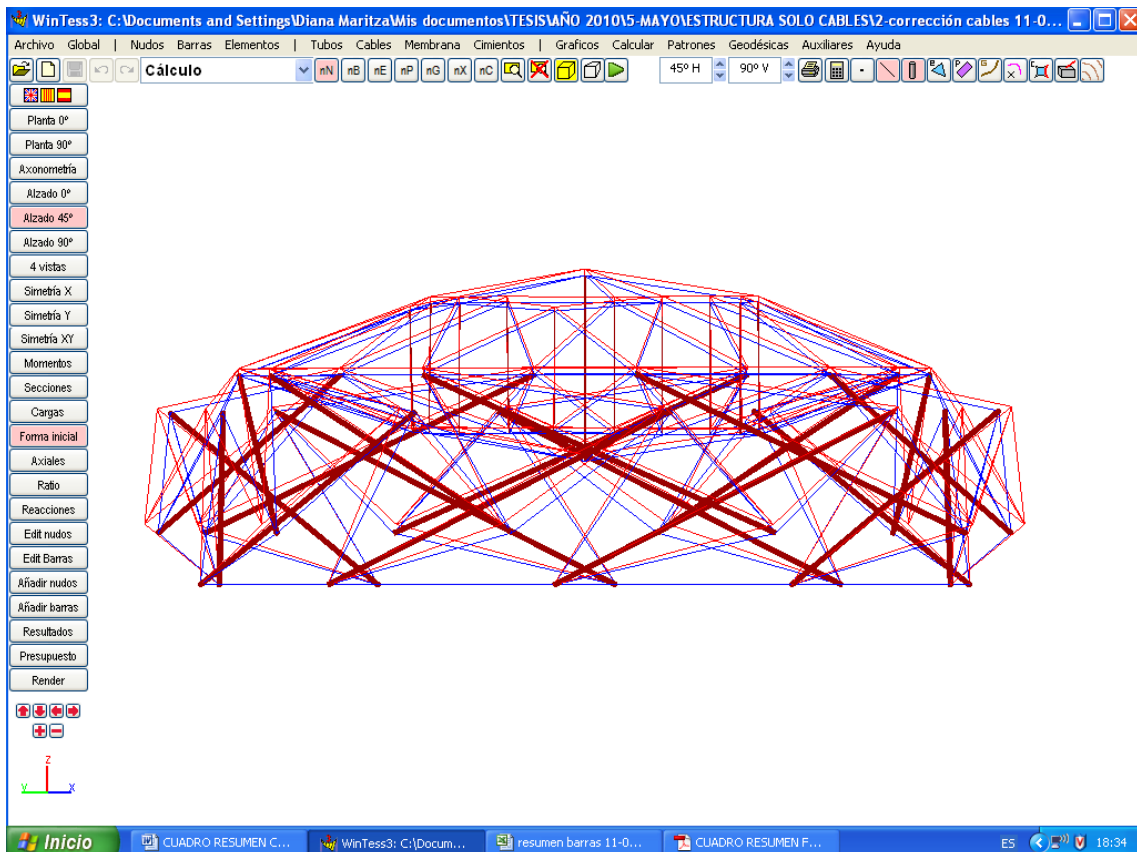


Figura 134. Alzado - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

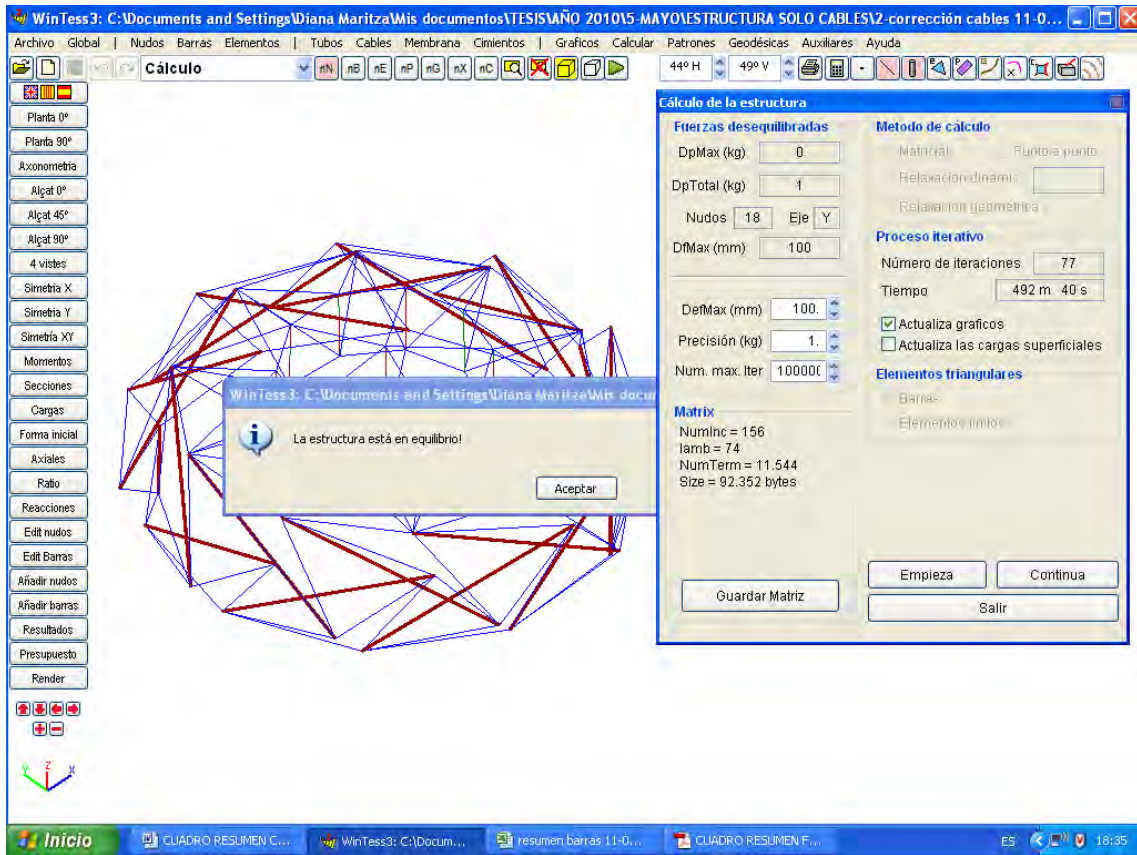


Figura 135. La estructura está en equilibrio ante su propio peso.

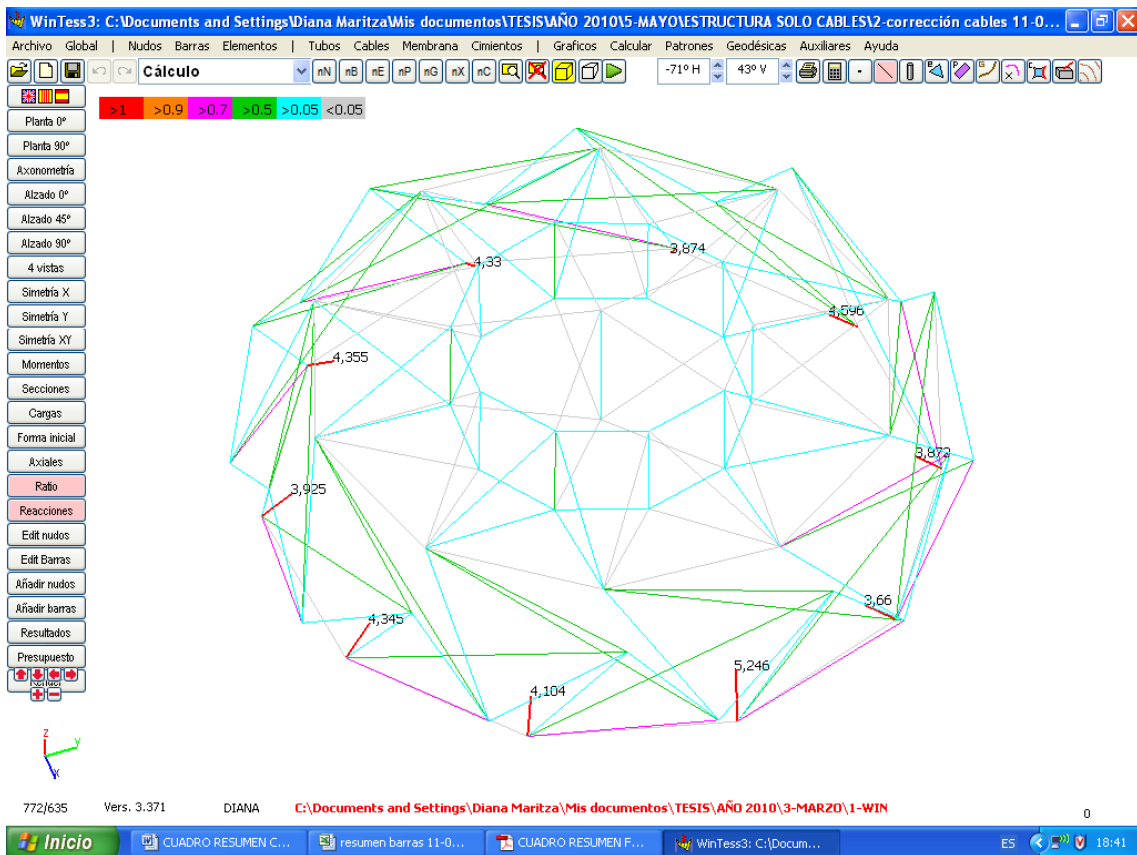


Figura 136. Esquema de ratio y reacciones de la estructura.

CASO 3. CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ANTE SU PROPIO PESO SÓLO CABLES – REFORZADA CON MÁS CABLES Y TUBOS EXTERIORES.

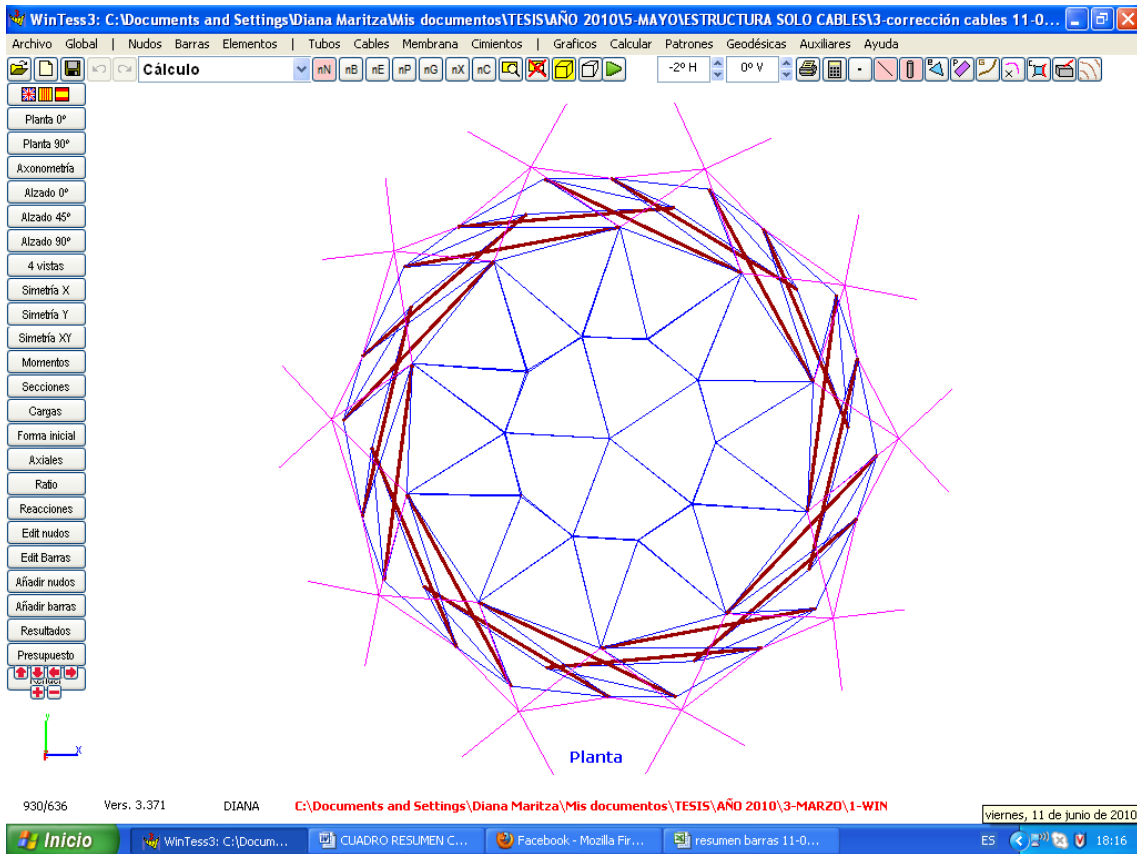


Figura 137. Vista en planta de la estructura.

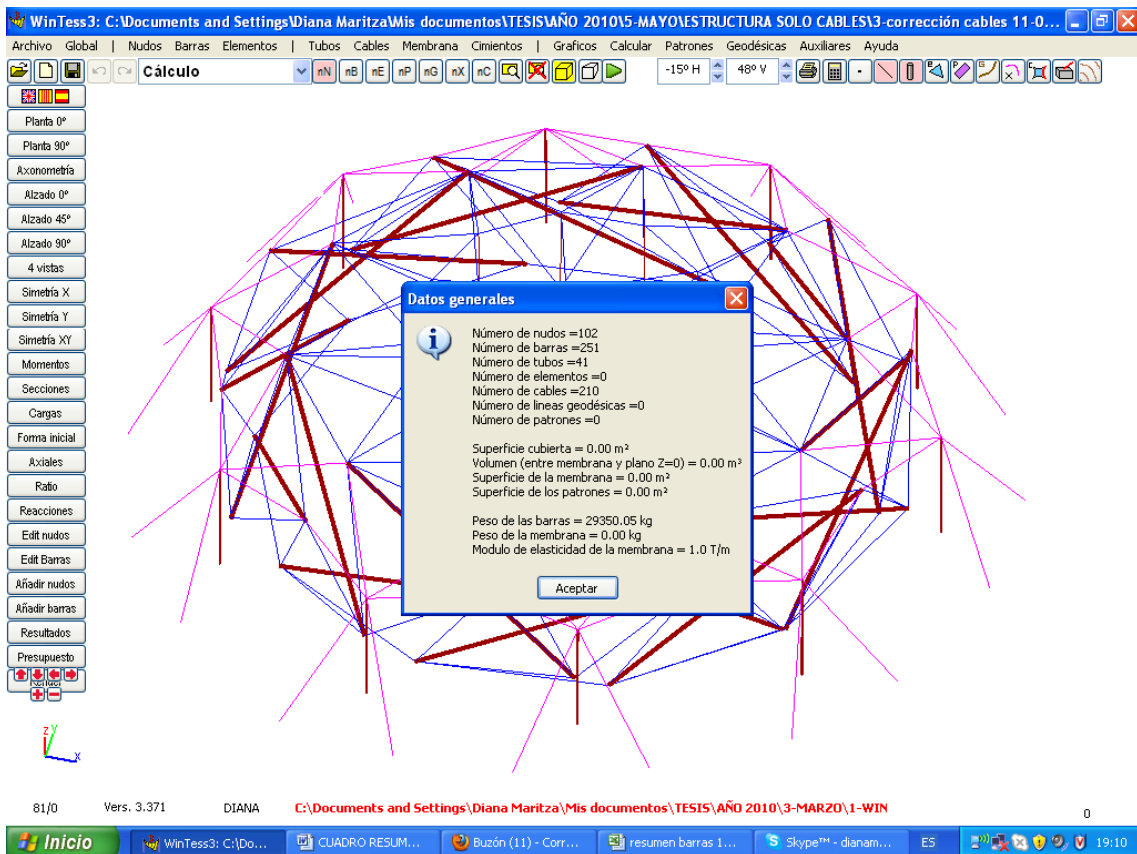


Figura 138. Datos generales de la estructura.

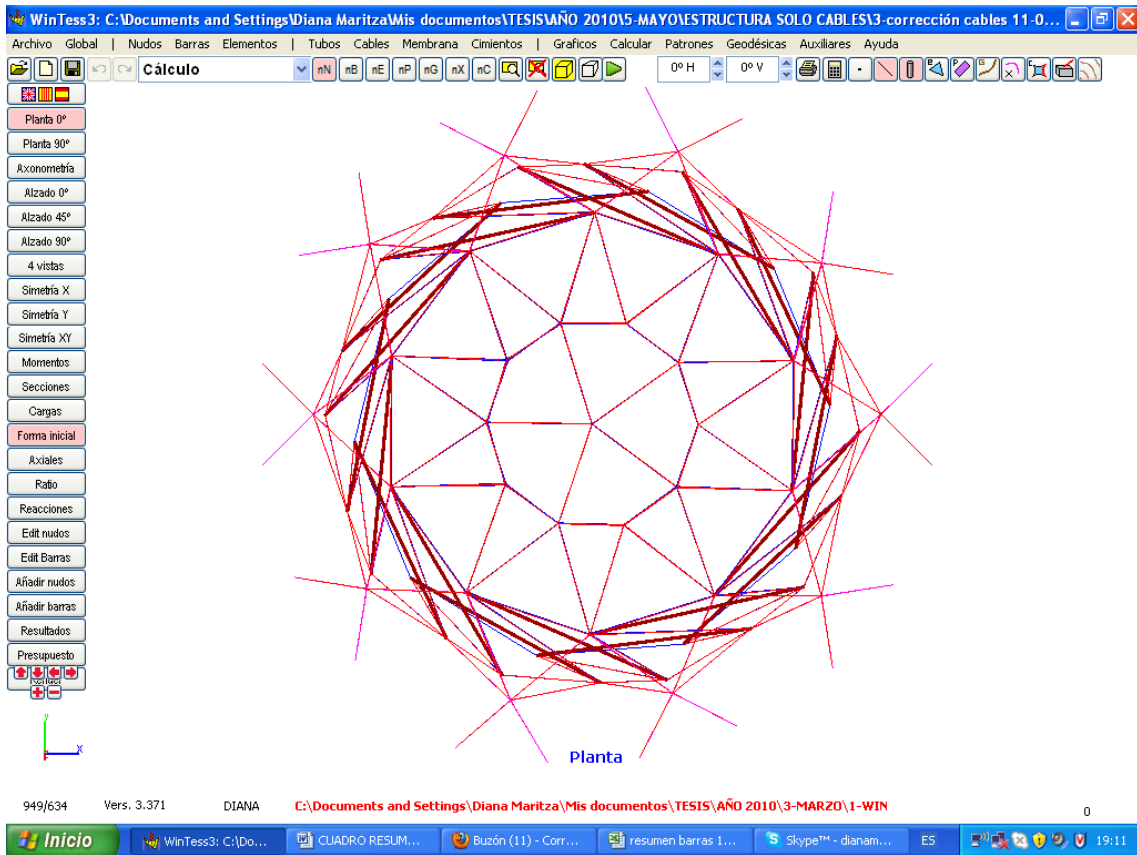


Figura 139. Planta - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

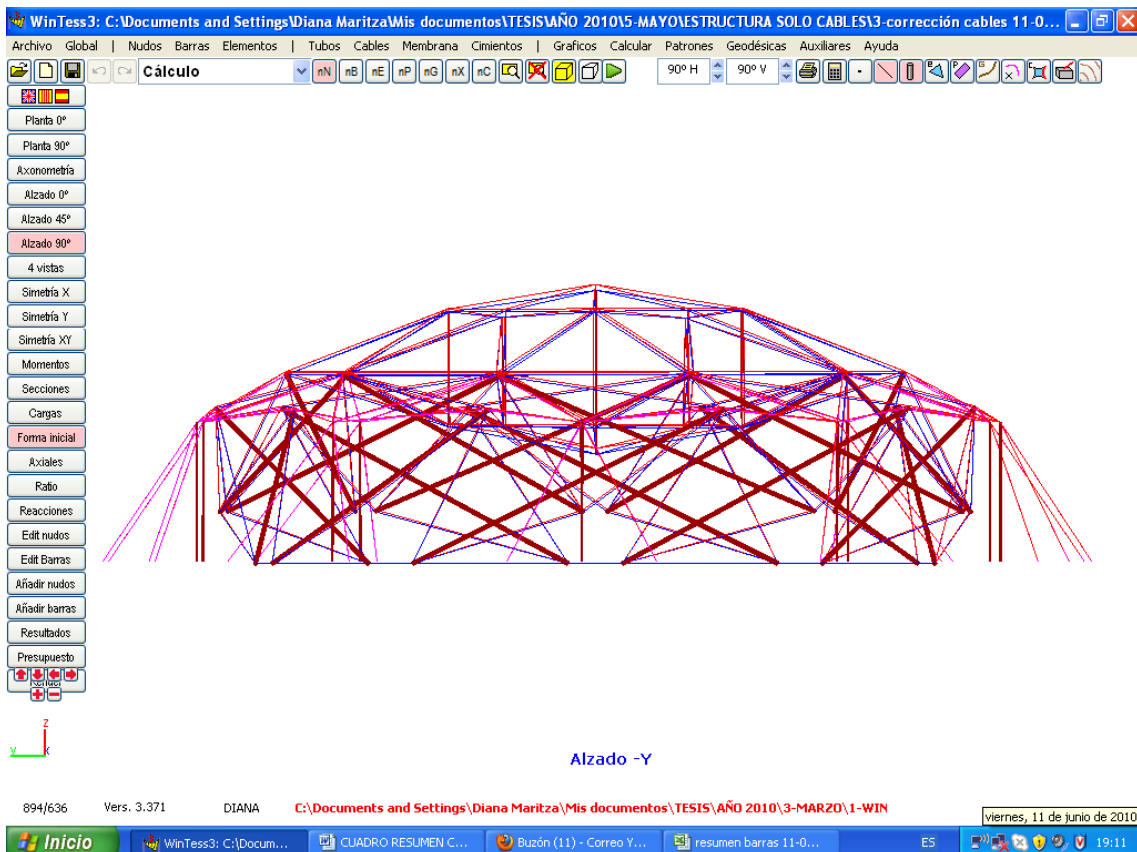


Figura 140. Alzado - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

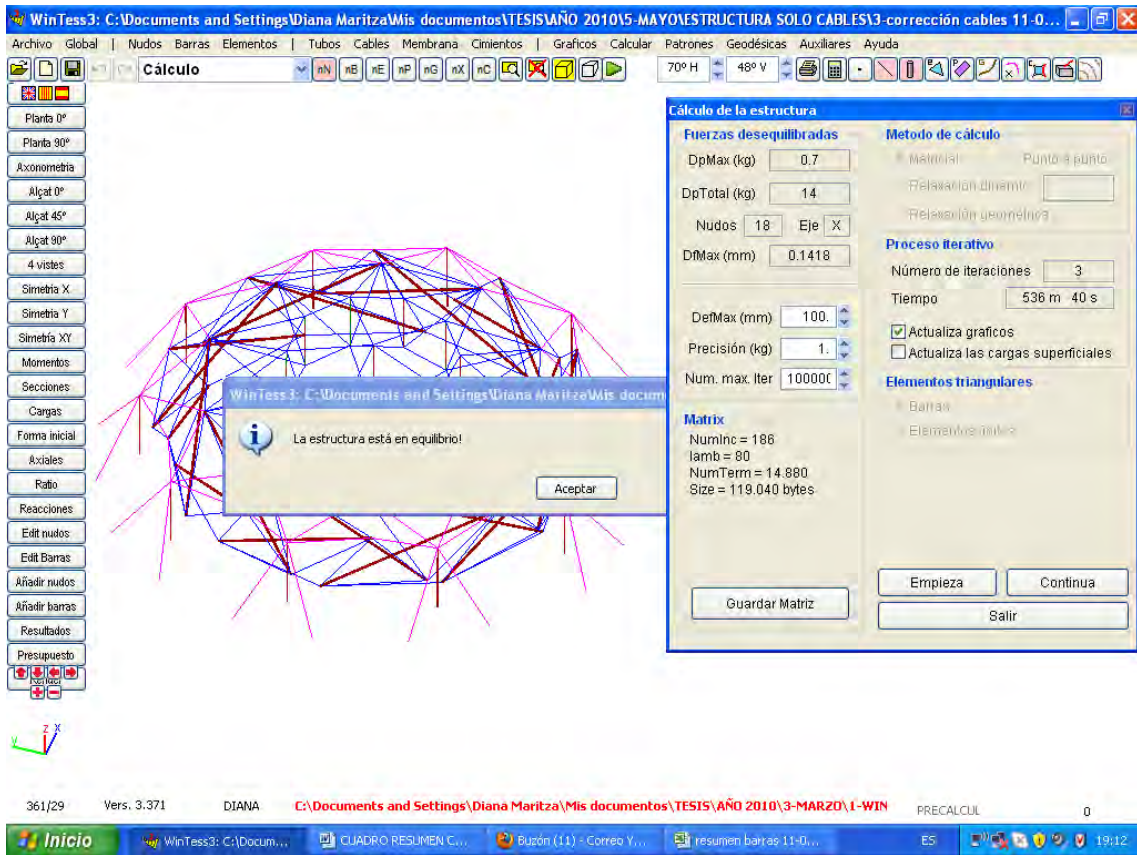


Figura 141. La estructura está en equilibrio ante su propio peso.

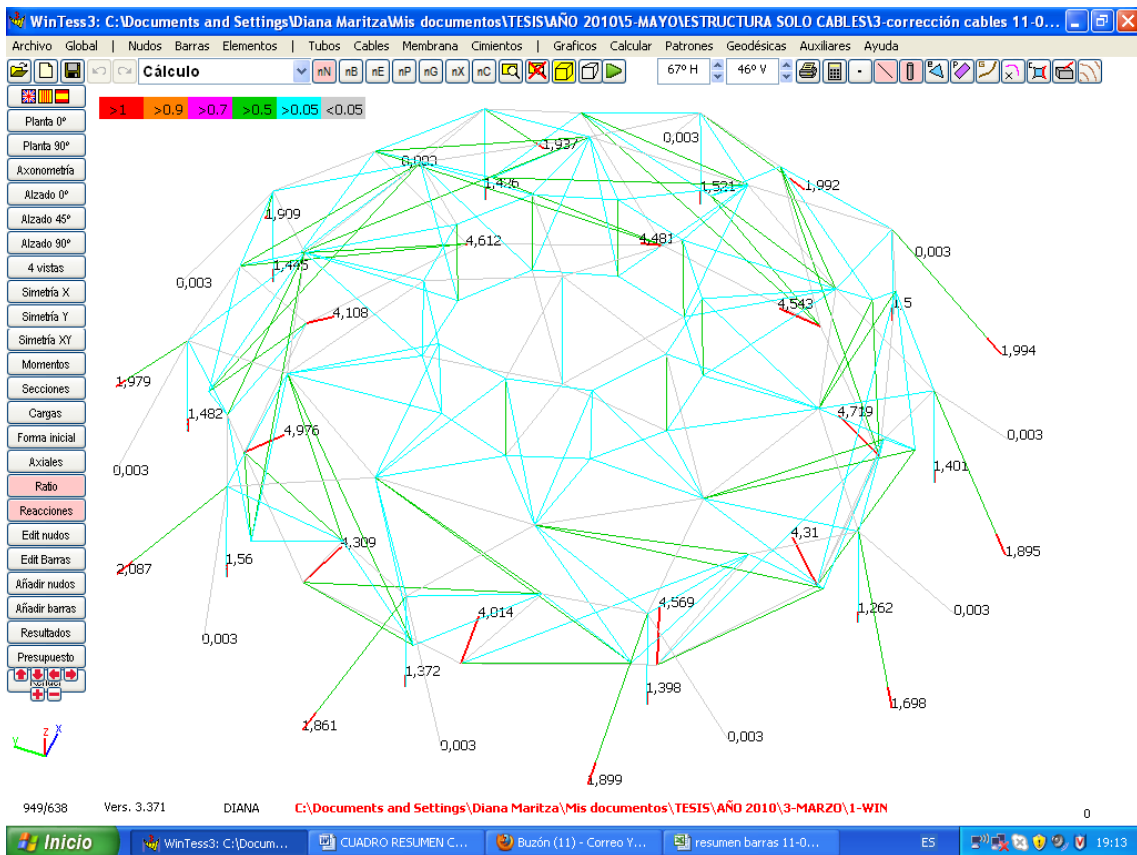


Figura 142. Esquema de ratio y reacciones de la estructura.

CASO 4. CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ANTE SU PROPIO PESO CON MEMBRANA, REFORZADA CON CABLES Y TUBOS EXTERIORES.

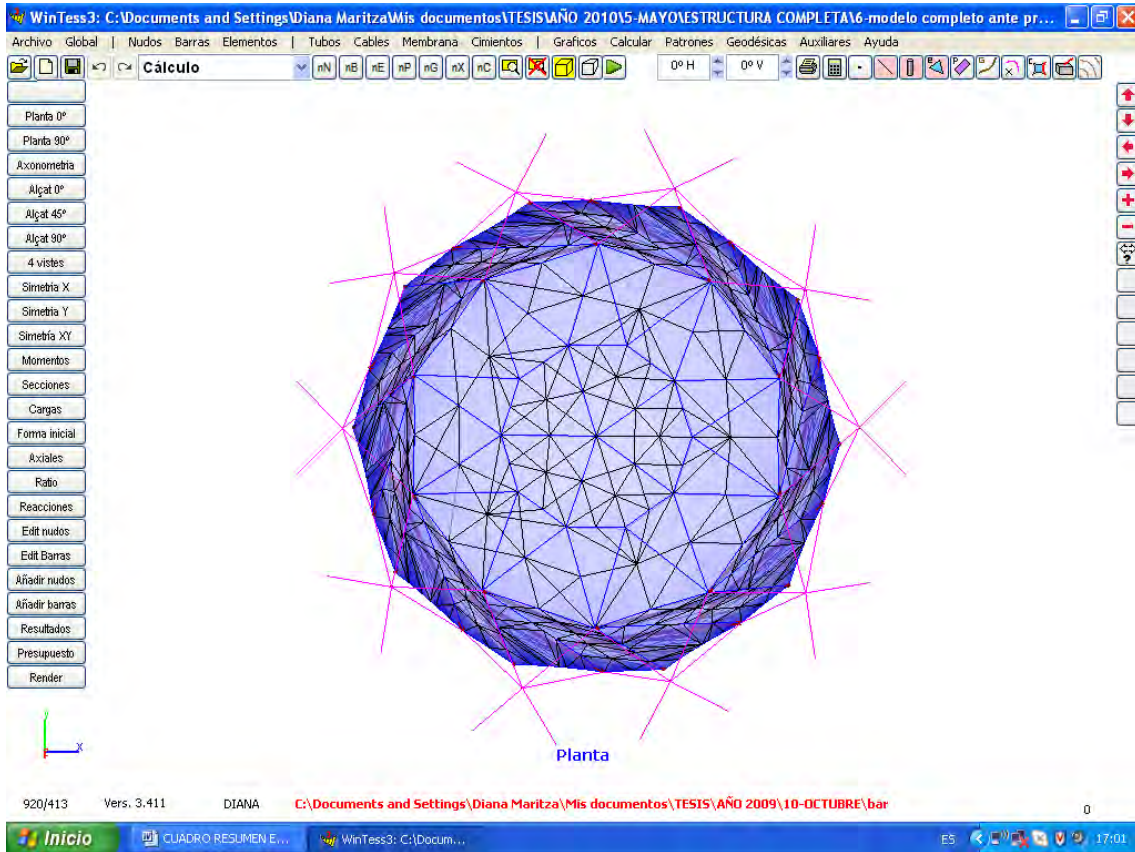


Figura 143. Vista en planta de la estructura.

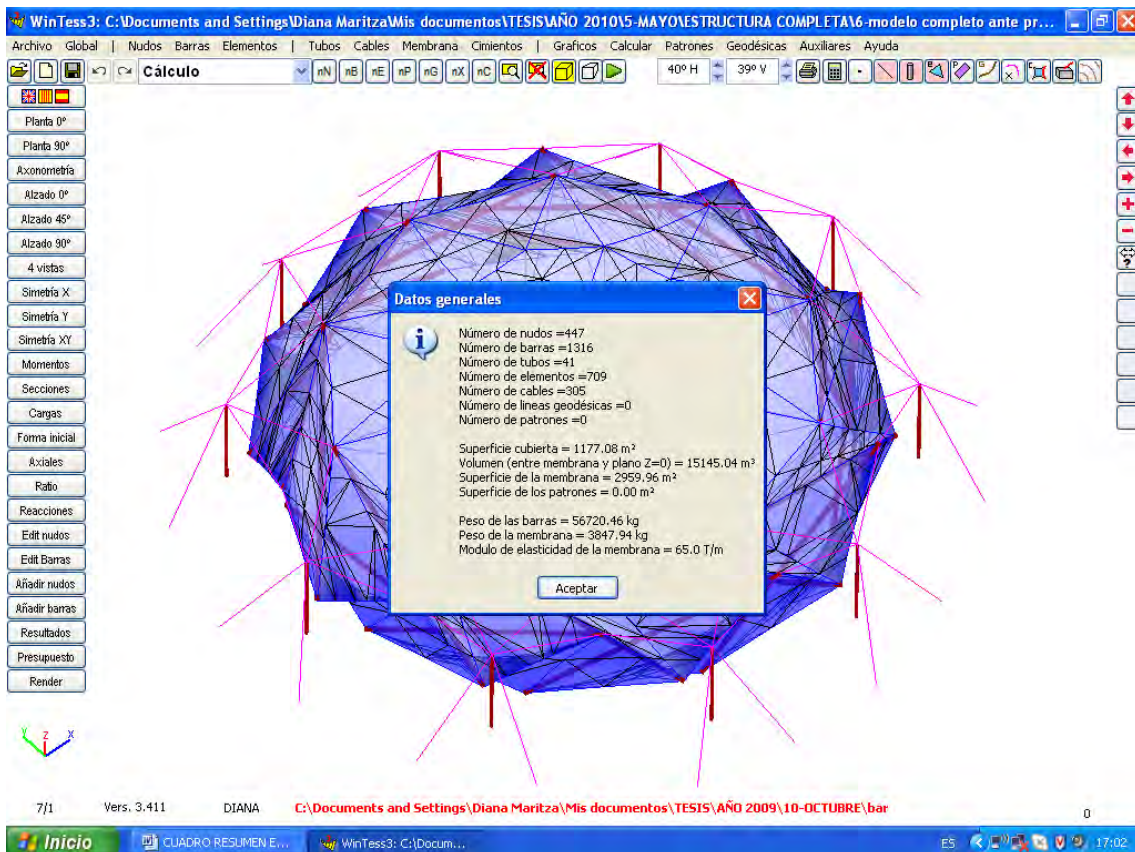


Figura 144. Datos generales de la estructura.

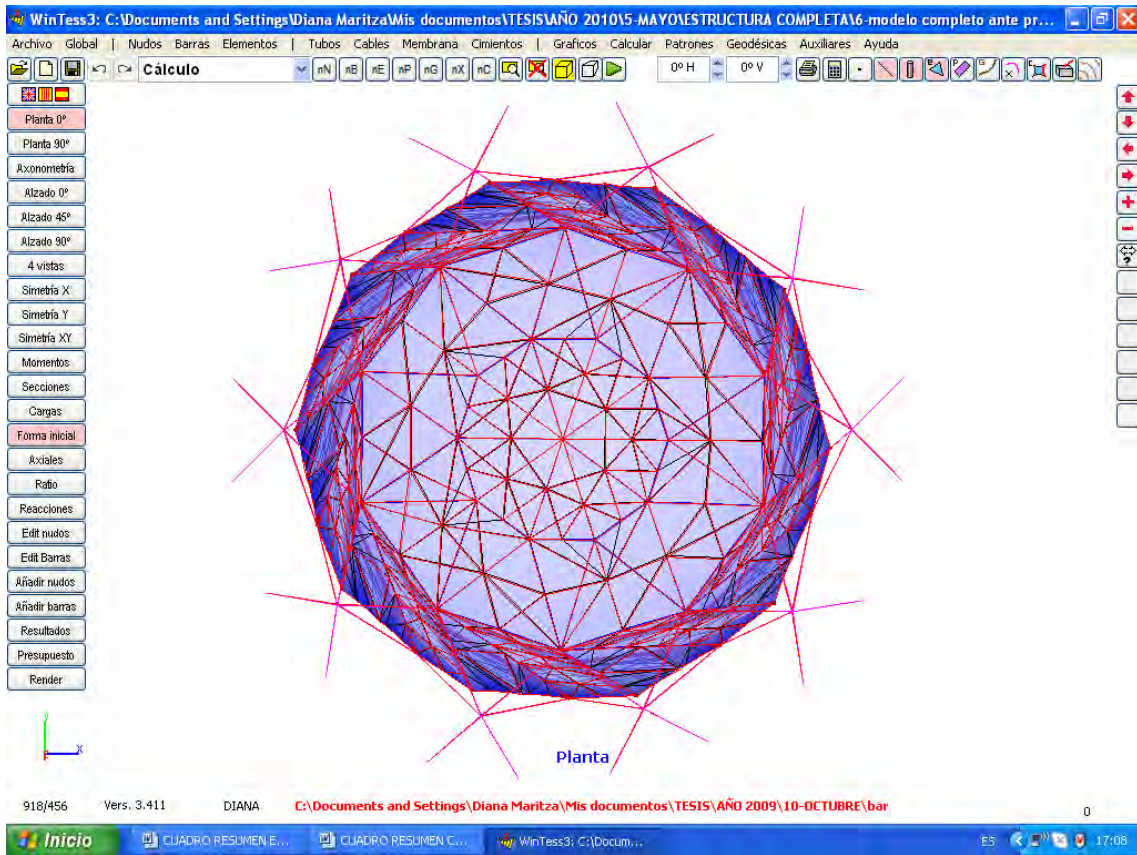


Figura 145. Planta - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

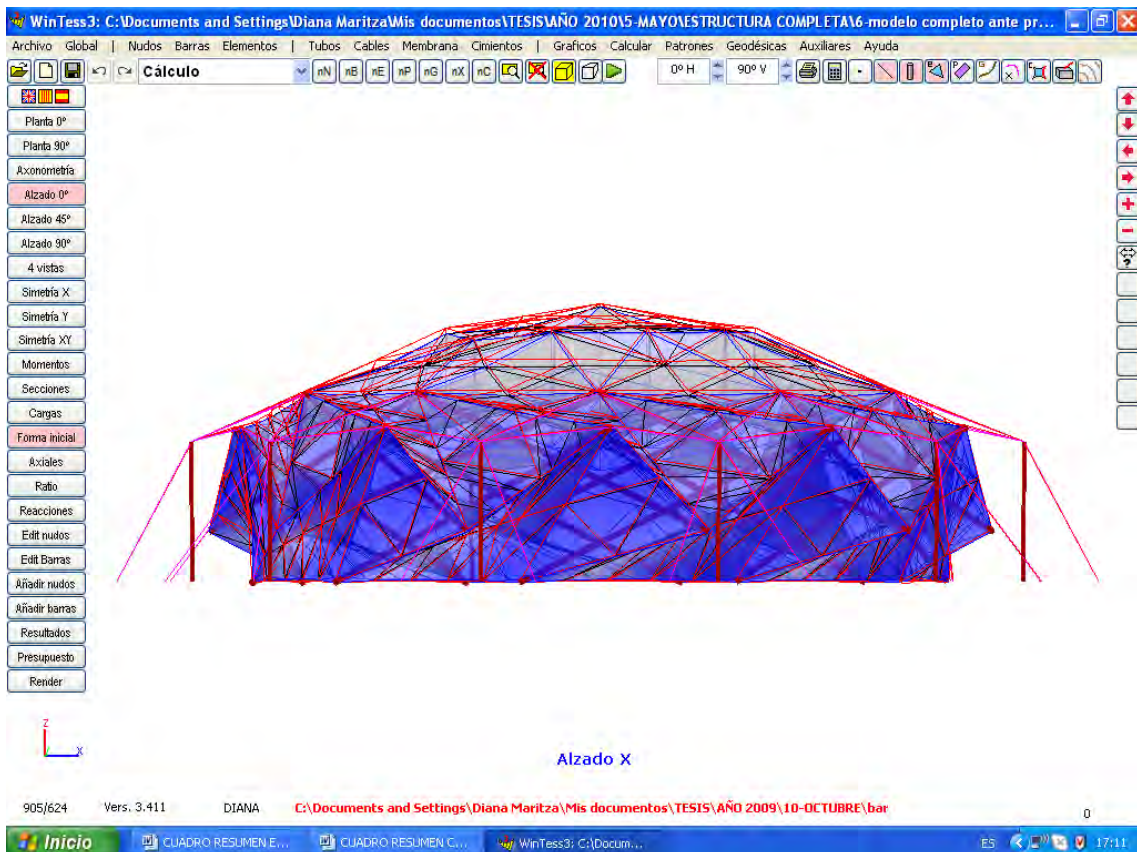


Figura 146. Alzado - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

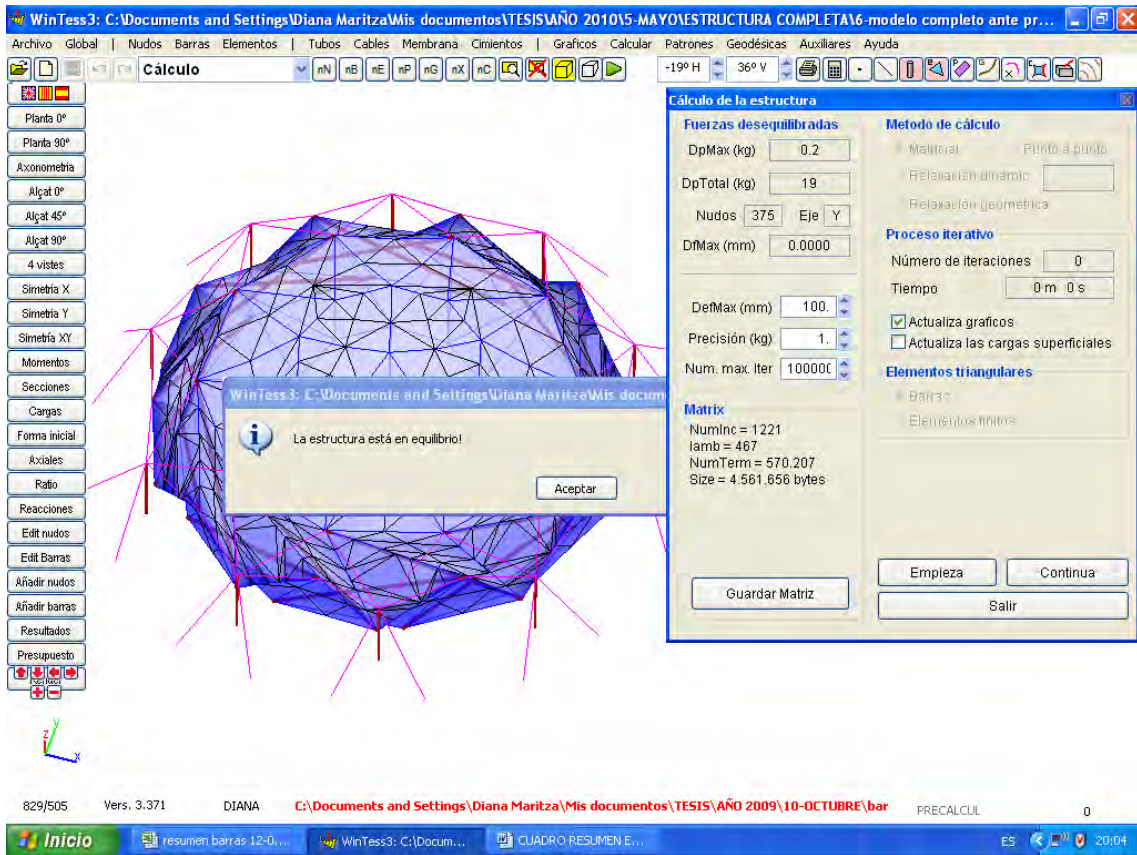


Figura 147. La estructura está en equilibrio ante su propio peso.

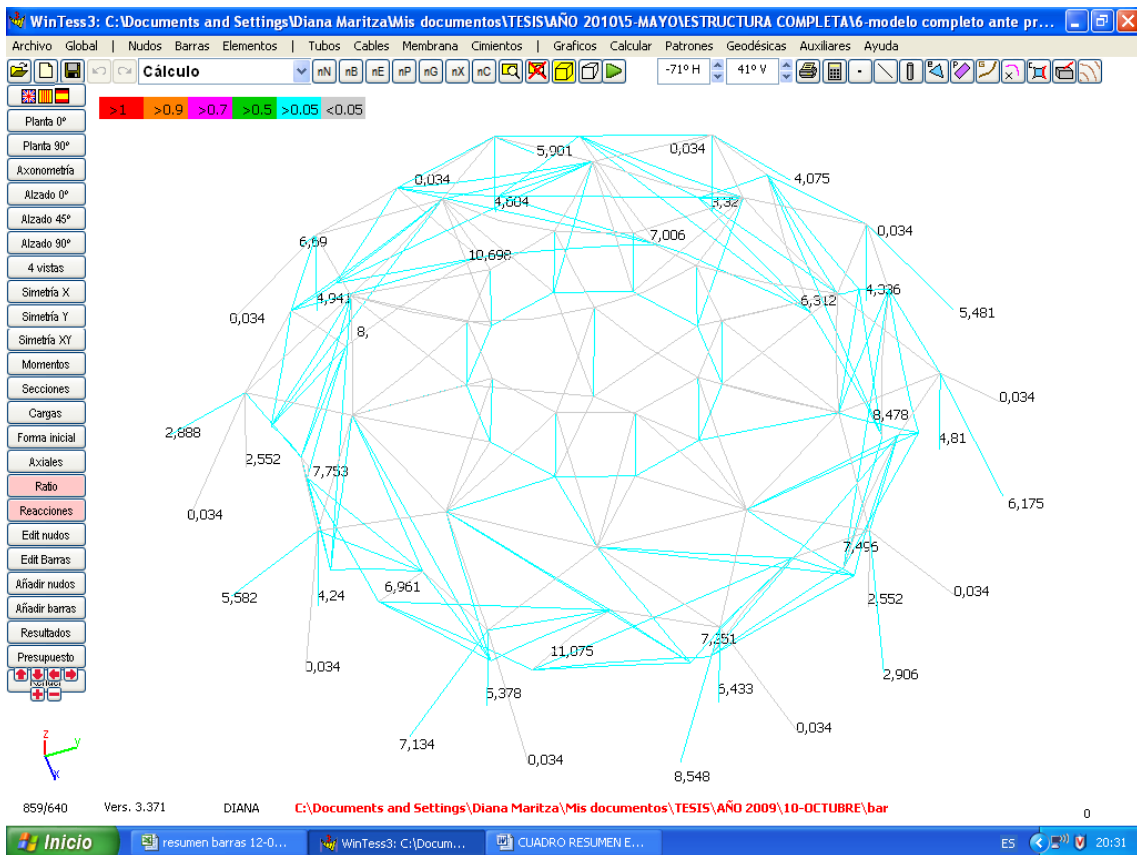


Figura 148. Esquema de ratio y reacciones de la estructura.

1. CUADRO RESUMEN (CASO 1 Y 2) ESTRUCTURA SIN ELEMENTOS (SÓLO CABLES) - SIN TUBOS EXTERIORES
DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE SU PROPIO PESO

CASO 1.

Barra	Nudo-1	Nudo-2	Longitud m	Sección cm ²	Axial T	dL mm	Tensión kg/cm ²	Ratio	Carga (T)		Reacción (T)		desplazamiento mm		Carga (T)		desplazamiento mm		Reacción (T)				
									Ratio		Nudo-1		Nudo-2		Nudo-1		Nudo-2			Nudo-1		Nudo-2	
1	49	62	20.00	73.388	-11.054	-1.4	-209	0.50	0.663	0.628	0	0	332	950	0.663	0.628	898	0.689	0	0			
2	54	58	20.00	73.388	-11.209	-1.5	-218	0.51	0.662	0.628	0	0	360	948	0.662	0.628	887	0.689	0	0			
3	55	45	20.00	73.388	-11.364	-1.5	-229	0.51	0.663	0.629	0	0	336	962	0.663	0.629	890	0.690	0	0			
4	33	6	20.00	73.388	-10.875	-1.4	-197	0.49	0.663	0.628	0	0	349	960	0.663	0.628	892	0.690	0	0			
5	14	1	20.00	73.388	-11.231	-1.5	-219	0.51	0.662	0.627	0	0	378	934	0.662	0.627	880	0.689	0	0			
6	9	5	20.00	73.388	-10.922	-1.4	-199	0.49	0.662	0.627	0	0	348	926	0.662	0.627	873	0.688	0	0			
7	8	18	20.00	73.388	-11.064	-1.4	-209	0.50	0.662	0.628	0	0	347	918	0.662	0.628	878	0.689	0	0			
8	13	40	20.00	73.388	-10.931	-1.4	-202	0.50	0.663	0.629	0	0	327	935	0.663	0.629	885	0.690	0	0			
9	30	57	20.00	73.388	-11.173	-1.4	-216	0.51	0.663	0.628	0	0	348	935	0.663	0.628	899	0.690	0	0			
10	50	23	20.00	73.388	-11.353	-1.5	-228	0.51	0.662	0.628	0	0	368	944	0.662	0.628	895	0.689	0	0			
11	10	34	20.00	73.388	-9.493	-1.2	-118	0.44	0.644	0.638	3.250	0	0	933	933	0.644	0.638	900	0.644	4.355	0		
12	24	52	20.00	73.388	-11.369	-1.5	-242	0.53	0.644	0.638	4.875	0	0	949	949	0.644	0.638	912	0.644	3.925	0		
13	46	61	20.00	73.388	-9.624	-1.3	-127	0.45	0.644	0.638	3.257	0	0	947	947	0.644	0.638	918	0.644	4.345	0		
14	56	60	20.00	73.388	-11.138	-1.5	-227	0.52	0.644	0.638	4.688	0	0	966	966	0.644	0.638	908	0.644	4.104	0		
15	59	51	20.00	73.388	-10.157	-1.3	-161	0.47	0.643	0.638	3.510	0	0	956	956	0.643	0.638	902	0.643	5.246	0		
16	53	29	20.00	73.388	-11.273	-1.5	-235	0.52	0.643	0.637	4.398	0	0	972	972	0.643	0.637	911	0.643	3.660	0		
17	39	11	20.00	73.388	-9.684	-1.3	-129	0.45	0.643	0.637	3.341	0	0	949	949	0.643	0.637	906	0.643	3.872	0		
18	17	2	20.00	73.388	-11.604	-1.5	-256	0.54	0.644	0.638	5.103	0	0	958	958	0.644	0.638	897	0.644	4.596	0		
19	7	3	20.00	73.388	-9.583	-1.3	-123	0.44	0.644	0.638	3.230	0	0	932	932	0.644	0.638	887	0.644	3.874	0		
20	4	12	20.00	73.388	-11.278	-1.5	-236	0.52	0.446	0.638	4.892	0	0	933	933	0.446	0.638	893	0.644	4.330	0		
21	31	32	9.00	16.493	-1.678	-0.5	-794	0.56	0.120	0.120	0	0	161	164	0.120	0.120	336	0.099	0	0			
22	41	42	6.50	8.294	-0.619	-0.2	-748	0.53	0.075	0.075	0	0	278	279	0.075	0.075	284	0.075	0	0			
23	36	35	6.50	8.294	-0.007	-0.0	-4.92	0.01	0.036	0.036	0	0	2628	2633	0.036	0.036	334	0.063	0	0			
24	25	26	6.50	8.294	-0.646	-0.2	-772	0.54	0.075	0.075	0	0	338	339	0.075	0.075	323	0.075	0	0			
25	20	19	6.50	8.294	0.034	0.0	35.16	0.02	0.034	0.034	0	0	2431	2394	0.034	0.034	208	0.061	0	0			
26	16	15	6.50	8.294	-0.651	-0.2	-764	0.54	0.075	0.074	0	0	412	411	0.075	0.074	368	0.075	0	0			
27	21	22	6.50	8.294	0.034	0.0	35.53	0.02	0.035	0.034	0	0	2514	2463	0.035	0.034	200	0.061	0	0			
28	28	27	6.50	8.294	-0.580	-0.2	-664	0.47	0.075	0.074	0	0	401	401	0.075	0.074	351	0.075	0	0			
29	37	38	6.50	8.294	-0.036	-0.0	-42.03	0.03	0.036	0.036	0	0	2495	2459	0.036	0.036	284	0.063	0	0			
30	43	44	6.50	8.294	-0.587	-0.2	-692	0.49	0.075	0.075	0	0	295	297	0.075	0.075	277	0.075	0	0			
31	47	48	6.50	8.294	-0.025	-0.0	-25.99	0.02	0.036	0.036	0	0	3606	2553	0.036	0.036	348	0.063	0	0			

OBSERVACIONES:		promedio desplaz.	Total carga	promedio desplaz.	Total carga
Nudos de los apoyos - barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento = 0		0	27,064		27,568
Nudos de las barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 950 mm.		950			
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 941 mm.		941			
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity, se unen con el domo superior - desplazamiento promedio = 349 mm.		349			
MAYORES DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS DE LAS BARRAS DEL ANILLO TENSEGRITY QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO QUE NO TIENEN NI APOYO, NI UNIÓN CON EL DOMO SUPERIOR					
Nudo superior del mástil central del domo tensegrity - desplazamiento = 164 mm.		164			
Nudo inferior del mástil central - desplazamiento = 164mm.		164			
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 345 mm.		345			
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 345 mm.		345			
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 2 cables - desplazamiento = 2533 mm.		2533			
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 2 cables - desplazamiento = 2500 mm.		2500			
MAYORES DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS DEL DOMO, SUJETOS SÓLO POR 2 CABLES. SE PROPONEN FILACIONES CON 4 CABLES MÁS PARA LOS MÁSTILES MENORES DEL DOMO. ASI DISMINUYE EL DESPLAZAMIENTO DE 2533 A 275mm.					

Tabla 2. Caso 1. y Caso2.

2 CUADRO RESUMEN (CASO 3)

ESTRUCTURA SIN ELEMENTOS (SÓLO CABLES) - CON TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS
DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE SU PROPIO PESO

Barra	Nudo-1	Nudo-2	Longitud m	Sección cm ²	Axial T	dL mm	Tensión kg/cm ²	Ratio	Carga (T)		Reacción (T)		desplazamiento mm	
									Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2
1	75	96	20.00	73.388	-11.861	-1.5	-258	0.54	0.696	0.628	0.000	0	180	113
2	82	86	20.00	73.388	-12.131	-1.6	-276	0.55	0.696	0.628	0.000	0	182	113
3	71	83	20.00	73.388	-11.947	-1.5	-265	0.54	0.696	0.629	0.000	0	183	114
4	18	53	20.00	73.388	-11.343	-1.5	-225	0.51	0.696	0.628	0.001	0	176	118
5	7	28	20.00	73.388	-11.351	-1.5	-225	0.51	0.695	0.627	0.000	0	182	115
6	17	21	20.00	73.388	-11.238	-1.5	-217	0.51	0.695	0.627	0.000	0	174	115
7	20	32	20.00	73.388	-11.117	-1.4	-210	0.50	0.695	0.628	0.000	0	169	118
8	27	62	20.00	73.388	-11.516	-1.5	-237	0.52	0.696	0.629	0.000	0	174	116
9	50	85	20.00	73.388	-11.466	-1.5	-233	0.52	0.696	0.628	0.000	0	173	115
10	41	76	20.00	73.388	-11.878	-1.5	-259	0.54	0.695	0.628	0.000	0	183	112
11	22	54	20.00	73.388	-10.673	-1.4	-198	0.49	0.644	0.643	4.569	0	0	107
12	42	80	20.00	73.388	-10.749	-1.4	-203	0.50	0.644	0.644	4.310	0	0	107
13	72	95	20.00	73.388	-11.289	-1.5	-238	0.52	0.644	0.644	4.719	0	0	105
14	84	94	20.00	73.388	-11.460	-1.5	-249	0.53	0.644	0.643	4.543	0	0	105
15	78	91	20.00	73.388	-11.345	-1.5	-242	0.52	0.643	0.643	4.481	0	0	106
16	49	81	20.00	73.388	-11.448	-1.5	-248	0.53	0.643	0.642	4.612	0	0	105
17	23	61	20.00	73.388	-10.789	-1.4	-204	0.50	0.643	0.642	4.108	0	0	110
18	8	31	20.00	73.388	-11.446	-1.5	-247	0.53	0.644	0.643	4.976	0	0	107
19	9	19	20.00	73.388	-11.059	-1.4	-222	0.51	0.644	0.643	4.309	0	0	107
20	10	25	20.00	73.388	-10.268	-1.3	-171	0.48	0.644	0.644	4.014	0	0	109
21	51	52	9.00	16.493	-0.099	-0.0	-104	0.07	0.099	0.099	0.000	0	344	340
22	65	66	6.50	8.294	-0.656	-0.3	-792	0.56	0.075	0.075	0.000	0	126	118
23	55	56	6.50	8.294	-0.631	-0.2	-755	0.53	0.063	0.063	0.000	0	142	145
24	45	46	6.50	8.294	-0.727	-0.3	-870	0.61	0.075	0.075	0.000	0	158	141
25	35	36	6.50	8.294	-0.305	-0.1	-297	0.21	0.061	0.061	0.000	0	42	72
26	29	30	6.50	8.294	-0.747	-0.3	-877	0.62	0.075	0.074	0.000	0	206	183
27	37	38	6.50	8.294	-0.379	-0.1	-382	0.27	0.061	0.061	0.000	0	46	78
28	47	48	6.50	8.294	-0.615	-0.2	-706	0.50	0.075	0.074	0.000	0	196	173
29	57	58	6.50	8.294	-0.634	-0.2	-750	0.53	0.063	0.063	0.000	0	133	137
30	69	70	6.50	8.294	-0.619	-0.2	-731	0.52	0.075	0.075	0.000	0	131	122
31	73	74	6.50	8.294	-0.626	-0.2	-744	0.52	0.063	0.063	0.000	0	154	156
32	5	6	8.00	22.777	-1.301	-0.2	-182	0.13	0.072	0.089	1.372	0	0	38
33	15	16	8.00	22.777	-1.489	-0.2	-208	0.15	0.072	0.090	1.560	0	0	37
34	33	34	8.00	22.777	-1.411	-0.2	-197	0.14	0.072	0.089	1.482	0	0	36
35	67	68	8.00	22.777	-1.374	-0.2	-192	0.14	0.072	0.090	1.445	0	0	33
36	89	90	8.00	22.777	-1.354	-0.2	-189	0.13	0.072	0.089	1.426	0	0	35
37	39	40	8.00	22.777	-1.191	-0.2	-166	0.12	0.072	0.090	1.262	0	0	38
38	63	64	8.00	22.777	-1.329	-0.2	-186	0.13	0.072	0.089	1.401	0	0	37
39	87	88	8.00	22.777	-1.428	-0.2	-200	0.14	0.072	0.090	1.500	0	0	34
40	97	98	8.00	22.777	-1.450	-0.2	-203	0.14	0.072	0.090	1.521	0	0	32
41	13	14	8.00	22.777	-1.327	-0.2	-185	0.13	0.072	0.089	1.398	0	0	39

OBSERVACIONES:	29.350 Total carga	promedio desplaz.
Nudos de los apoyos - barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento = 0		0
Nudos de las barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 107 mm.		107
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 115 mm.		115
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity, se unen con el domo superior - desplazamiento promedio = 178 mm.		178
MAYORES DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS DE LAS BARRAS DEL ANILLO TENSEGRITY QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO QUE NO TIENEN NI APOYO, NI UNIÓN CON EL DOMO SUPERIOR		
Nudo superior del mástil central del domo tensegrity- desplazamiento = 344 mm.		344
Nudo inferior del mástil central - desplazamiento = 340mm.		340
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 163 mm.		163
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 147 mm.		147
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 103 mm.		103
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 118 mm.		118
Nudos inferiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 0		0
Nudos superiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 36 mm.		36
SE PROPONEN CABLES Y TUBOS EXTERIORES PARA DISMINUIR LOS MOVIMIENTOS DE LOS NUDOS DEL ANILLO TENSEGRITY LOS DESPLAZAMIENTOS DISMINUYEN DE 903 mm A 107 mm. AL REFORZAR LA ESTRUCTURA AUMENTA SU PESO EN 1792 kg Y SUS REACCIONES AUMENTAN EN 36 ton.		

3. CUADRO RESUMEN (CASO 4)
ESTRUCTURA CON MEMBRANA (ELEMENTOS) Y TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS
DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE SU PROPIO PESO

Barra	Nudo-1	Nudo-2	Longitud m	Sección cm ²	Axial T	dL mm	Tensión kg/cm ²	Ratio	Carga (T)		Reacción (T)		desplazamiento mm		
									Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	
2	316	441	20.00	122.522	-17.590	-1.4	-26.420	0.36	1.176	0.997	0	0	140	138	
3	373	399	20.00	122.522	-18.241	-1.4	-41.416	0.38	1.180	0.996	0	0	145	142	
4	375	292	20.00	122.522	-13.815	-1.1	60.377	0.32	1.175	0.998	0	0	155	146	
5	227	62	20.00	122.522	-15.546	-1.2	20.730	0.34	1.176	0.997	0	0	158	154	
6	130	7	20.00	122.522	-12.603	-1.0	87.857	0.30	1.172	0.995	0	0	161	146	
7	75	50	20.00	122.522	-18.015	-1.4	-35.674	0.37	1.174	0.995	0	0	162	139	
8	73	155	20.00	122.522	-17.714	-1.4	-29.341	0.38	1.174	0.996	0	0	138	131	
1088	127	278	20.00	122.522	-16.505	-1.3	-1.954	0.37	1.178	0.998	0	0	134	139	
1089	222	385	20.00	122.522	-16.960	-1.3	-12.144	0.35	1.174	0.997	0	0	137	137	
1224	320	171	20.00	122.522	-14.647	-1.1	40.628	0.36	1.176	0.996	0	0	161	148	
9	89	229	20.00	122.522	-17.022	-1.3	-20.537	0.40	1.017	1.056	8.000	0	0	134	
10	185	343	20.00	122.522	-16.264	-1.3	-2.771	0.37	1.017	1.061	7.753	0	0	135	
11	293	434	20.00	122.522	-18.059	-1.4	-44.867	0.34	1.017	1.064	6.961	0	0	136	
12	377	432	20.00	122.522	-20.579	-1.6	-103.836	0.37	1.017	1.056	11.075	0	0	141	
13	423	332	20.00	122.522	-18.187	-1.4	-47.758	0.32	1.016	1.060	7.251	0	0	142	
14	360	220	20.00	122.522	-15.635	-1.2	12.081	0.32	1.015	1.058	7.496	0	0	146	
15	265	105	20.00	122.522	-17.732	-1.4	-36.116	0.38	1.016	1.054	8.478	0	0	156	
16	154	14	20.00	122.522	-13.907	-1.1	53.631	0.34	1.017	1.060	6.312	0	0	137	
17	71	16	20.00	122.522	-13.874	-1.1	54.005	0.35	1.016	1.061	7.006	0	0	140	
995	23	117	20.00	122.522	-18.605	-1.5	-57.788	0.33	1.017	1.062	10.698	0	0	129	
18	224	225	9.00	16.493	-0.182	-0.0	-84.394	0.29	0.113	0.211	0	0	172	172	
19	284	285	6.50	10.807	-0.885	-67.6	-494.574	0.40	0.076	0.164	0	0	241	169	
20	244	243	6.50	10.807	-0.797	-67.2	-439.359	0.24	0.104	0.133	0	0	277	198	
21	199	200	6.50	10.807	-0.936	-67.2	-518.953	0.40	0.076	0.164	0	0	262	196	
22	160	159	6.50	10.807	-0.317	-60.8	-144.325	0.12	0.100	0.131	0	0	198	135	
23	144	142	6.50	10.807	-0.667	-66.6	-361.827	0.38	0.075	0.163	0	0	325	253	
24	161	163	6.50	10.807	-0.296	-61.9	-139.555	0.13	0.101	0.131	0	0	210	147	
25	204	203	6.50	10.807	-0.545	-65.7	-288.225	0.31	0.075	0.163	0	0	342	266	
26	246	249	6.50	10.807	-0.521	-66.8	-285.703	0.23	0.104	0.134	0	0	296	221	
27	289	290	6.50	10.807	-0.635	-66.6	-346.952	0.34	0.075	0.163	0	0	286	195	
28	304	306	6.50	10.807	-0.683	-66.8	-373.802	0.23	0.104	0.133	0	0	291	215	
1227	5	6	8.00	60.821	-4.566	-0.3	-111.228	0.08	0.191	0.368	4.604	0	0	69	
1228	47	48	8.00	60.821	-1.582	-0.1	-37.783	0.05	0.191	0.372	3.320	0	0	70	
1229	157	158	8.00	60.821	-3.896	-0.2	-94.671	0.07	0.191	0.370	4.336	0	0	75	
1230	287	288	8.00	60.821	-4.810	-0.3	-117.194	0.08	0.191	0.372	4.810	0	0	73	
1231	411	412	8.00	60.821	-2.016	-0.1	-48.455	0.04	0.191	0.368	2.552	0	0	77	
1232	164	165	8.00	60.821	-1.913	-0.1	-46.024	0.04	0.191	0.374	2.552	0	0	68	
1233	282	283	8.00	60.821	-3.984	-0.2	-96.827	0.07	0.191	0.369	4.240	0	0	77	
1234	409	410	8.00	60.821	-5.097	-0.3	-124.203	0.09	0.191	0.373	5.378	0	0	74	
1235	442	443	8.00	60.821	-6.419	-0.4	-156.766	0.11	0.191	0.374	6.433	0	0	71	
1236	41	42	8.00	60.821	-4.677	-0.3	-113.900	0.08	0.191	0.368	4.941	0	0	69	
OBSERVACIONES:									60.568 Total carga			promedio desplaz.			
Nudos de los apoyos - barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento = 0													0		
Nudos de las barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 140 mm.													140		
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 142 mm.													142		
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity, se unen con el domo superior - desplazamiento promedio = 149 mm.													149		
MAYORES DESPLAZAMIENTOS DEL ANILLO TENSEGRITY, EN LOS NUDOS DE LAS BARRAS QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO Y EN LA UNIÓN CON EL DOMO SUPERIOR.															
Nudo superior del mástil central del domo tensegrity- desplazamiento = 172 mm.													172		
Nudo inferior del mástil central - desplazamiento = 172mm.													172		
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 289 mm.													289		
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 216 mm.													216		
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 254 mm.													254		
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 183 mm.													183		
Nudos inferiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 0													0		
Nudos superiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 72 mm.													72		
MAYORES DESPLAZAMIENTOS DEL DOMO CENTRAL EN LOS NUDOS SUPERIORES DE LOS MÁSTILES MENORES.															
MAYORES REACCIONES EN LOS NUDOS FIJOS DEL ANILLO 11.075 ton.									CARGA TOTAL DE LA ESTRUCTURA 60.568 ton.						
MAYORES REACCIONES EN LOS TUBOS EXTERIORES 6.433 ton.									EL PESO DE LA ESTRUCTURA AUMENTA EN 31 218 ton.						
MAYORES REACCIONES EN LOS CABLES EXTERIORES (VIENTOS) 8.548 ton.									CON RESPECTO AL CASO No.2						

Tabla 4. Caso 4.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON EL PROGRAMA DE CÁLCULO WINTESS

Cálculo de la estructura ante su propio peso

Aspectos a tener en cuenta en nuestro cálculo

- En algunos programas de cálculo se utilizan distorsiones o irregularidades para ver si la estructura continúa en equilibrio. En nuestro caso hemos mantenido las irregularidades del modelo y esto no afecta el equilibrio de la estructura.
- El cálculo más importante para nuestro modelo de estudio, es el que haremos con respecto al viento.
- La estructura propuesta no es simétrica, el tensegrity por la posición de las barras tiene un movimiento de giro, es como un molino de viento, por eso las reacciones son diferentes.
- La resistencia de cálculo de un elemento depende de su resistencia de rotura, de su límite elástico, de su geometría, etc. y del coeficiente de seguridad aplicado.

CASO 1. – CASO 2.

Estructura sin membrana, (sin elementos), solo cables
Fig.125 a 136

Características estructurales de los elementos del modelo

- **Cables de borde:** 1x61 (24mm) Inox Ø 24 - **Sección** 335 mm² - **Módulo de elasticidad** 1.380 t/cm² = 138 kN/mm² - **Q=** 38,66 t = 386,6 kN
- **Tubos del anillo:** L=20 m - Ø 300-8_S235 - **Sección** 73,388 cm² - **Peso** 1150,4 kp= 11,504 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástil central del domo:** L=9 m - Ø 110-5_S235 - **Sección** 16,493 cm² - **Peso** 121,5 kp= 1,215 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástiles menores del domo:** L=6,5 m - Ø 70-4_S235 - **Sección** 8,294 cm² - **Peso** 43,5 kp= 0,435 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³

Datos generales de la estructura	
Número de nudos	62
Número de barras	161
Número de tubos	31
Número de cables	129
Superficie cubierta	1.177,08 m ²
Peso de las barras	27.063,54 kg
Peso de la estructura por m ²	22,99 kg

Tabla 5. Datos generales

ANÁLISIS DEL CUADRO RESUMEN 1.

Para el cálculo de la estructura ante su propio peso no es necesario el uso de los tubos y cables exteriores, la estructura está en equilibrio ante su propio peso (Fig.129). Cargas ($x=0, y=0, z=27064$) = Reacciones ($x=0, y=0, z=27064$).

Cargas - peso propio

El peso total de la estructura = 27063,54 kg (Fig.126 - Tabla 5).

El peso de los tubos es de 23564,50 kg.

El peso de los cables es de 3499,04 kg.

Refuerzo

El peso de la estructura se incrementa en 494,51 kg por los cables adicionales propuestos. (Peso total de la estructura = 27558,05 kg Fig.132) o sea que incrementa su peso en un 1,01 %

Peso por m^2 es de 22,99 kg. Al reforzarla aumenta su peso en 0,42 kg/m^2 (23,41 kg).

Desplazamientos de los nudos

En el análisis observamos el mayor desplazamiento = 2633 mm en la barra 23 (nudos 35-36) que corresponde a uno de los mástiles menores del domo ($L=6,5$ m - $\varnothing 70-4_S235$).

Este desplazamiento ocurre por la ubicación de la barra en el espacio. Por ello se proponen otros 4 cables de refuerzo (Fig.131) para cada barra de este tipo que previenen este desplazamiento excepcional. [Total 20 cables de 1x61 (24mm) Inox $\varnothing 24$]. El desplazamiento disminuye de 2633 mm a 337 mm.

Pero aparece otro desplazamiento =972 mm en la barra 16 (nudos 53-29) que corresponde a un tubo del anillo principal de la estructura ($L=20$ m - $\varnothing 300-8_S235$).

El movimiento se realiza hacia el interior de la estructura, es como si el radio de la estructura disminuyera en 972 mm hacia adentro, esto ocurre por la tensión producida por los cables propuestos. (Fig.133,135)

Este movimiento no afecta el comportamiento de la estructura, la estructura llega al equilibrio con esta forma final. (Fig.135)

Para evitar estos desplazamientos se proponen tubos exteriores y cables exteriores (vientos) lo veremos en el caso de estudio No 3.

Reacciones

Las reacciones en los nudos fijos de apoyo de la estructura son del orden de 5,103 toneladas (máxima reacción Fig.130), al reforzar la estructura se incrementa a 5,246 toneladas (máxima reacción Fig.136). Esto quiere decir que se deben plantear los cimientos que respondan a estas cargas.

En los tubos de la estructura el ratio promedio va entre 0,5 a 0,05. Lo que significa que teniendo en cuenta la resistencia de cálculo del tubo la estructura cumple con la resistencia necesaria (Fig.130). El coeficiente de seguridad de los tubos que se ha aplicado es de 1,65. (La resistencia de cálculo de un elemento depende de su resistencia de rotura, de su límite elástico, de su geometría, etc. y del coeficiente de seguridad aplicado).

En los cables de la estructura el ratio promedio va entre 0,5 a 0,05. Significa que teniendo en cuenta la resistencia de cálculo del cable la estructura cumple con la resistencia necesaria (Fig.130). El coeficiente de seguridad de los cables que se ha aplicado es de 3.

Al reforzar la estructura con los cables adicionales en la zona central del domo el ratio general va de 0,5 a 0,05. En la zona del anillo tensegrity se crean tensiones mayores en los cables que sostienen los tubos principales, el ratio va de 0,7 a 0,05 (Fig.136)

CASO 3.

**Estructura reforzada con cables, con tubos exteriores y cables exteriores (vientos)
Fig.137 a 142**

Características estructurales de los elementos del modelo

- **Cables de borde:** 1x61 (24mm) Inox Ø 24 - **Sección** 335 mm² - **Módulo de elasticidad** 1.380 t/cm² = 138 kN/mm² - **Q=** 38,66 t = 386,6 kN
- **Tubos del anillo:** L=20 m - Ø 300-8_S235 - **Sección** 73,388 cm² - **Peso** 1150,4 kp= 11,504 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástil central del domo:** L=9 m - Ø 90-4_S235 - **Sección** 10,807 cm² - **Peso** 79,6 kp= 0,796 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástiles menores del domo:** L=6,5 m - Ø 70-4_S235 - **Sección** 8,294 cm² - **Peso** 43,6 kp= 0,436 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Cables exteriores (Vientos):** 1x19 (12mm) Inox Ø 12 - **Sección** 86 mm² - **Módulo de elasticidad** 1.380 t/cm² = 138 kN/mm² - **Q=** 10,10 t = 101,0 kN
- **Tubos exteriores:** L= 8 m - Ø 150-5_S235 - **Sección** 22,777 cm² - **Peso** 143,0 kp= 1,43 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³

Datos generales de la estructura	
Número de nudos	102
Número de barras	251
Número de tubos	41
Número de cables	210
Superficie cubierta	1.177,08 m ²
Peso de las barras	29.350,05 kg
Peso de la estructura por m ²	24,93 kg

Tabla 6. Datos generales

ANÁLISIS DEL CUADRO RESUMEN 2.

La estructura está en equilibrio cargas ($x=0, y=0, z=29350$) = reacciones ($x=0, y=0, z=29350$) - (Fig.141). Para evitar los desplazamientos que aparecen en los nudos de las barras del medio del anillo tensegrity, que en promedio son de 900 mm, se proponen tubos exteriores y cables exteriores, que ayudan a que los desplazamientos disminuyan a 100 mm.

Cargas: peso propio

El peso total de la estructura = 29350,05 kg. (Fig.138 - Tabla 6)

El peso de los tubos es de 23008,00 kg (estructura) + 1430,00 kg (tubos exteriores) = 24438,00 kg

El peso de los cables es de 4058,54 kg (estructura) + 494,51 kg (refuerzo cables) + 359,00 kg (vientos) = 4912,05 kg

Refuerzo

El peso de la estructura se incrementa en 1792,00kg con respecto al caso anterior (27558,05 kg) o sea un 1,06 %

Peso por m^2 es de 24,93kg. Al reforzarla aumenta su peso en 1,52 kg/ m^2 con respecto del caso anterior 23,41 kg.

Movimientos

En el análisis observamos el mayor desplazamiento = 344 mm en la barra 21 (nudos 51-52) que corresponde al mástil central del domo ($L=9,00$ m - \varnothing 90-4_S235).

El desplazamiento aumento de 164 mm a 344 mm por la tensión producida hacia abajo por los cables propuestos, que ayudan a que disminuyan los desplazamientos en los mástiles menores.

También observamos que disminuyen los desplazamientos de los nudos libres de los tubos del anillo tensegrity (no tienen contacto con el domo superior, ni con los apoyos) de 972 mm a 107 mm por la ayuda de los tubos y cables exteriores.

Los desplazamientos de los nudos de los tubos del anillo tensegrity que tienen contacto con el domo son del orden de 178 mm. Este movimiento se produce por la tensión producida por los cables exteriores (vientos) propuestos. (Fig.139,140)

Estos movimientos no afectan el comportamiento de la estructura, la estructura llega al equilibrio con esta forma final. (Fig.140)

Reacciones

Las máximas reacciones en los nudos fijos de apoyo de la estructura son del orden de 4,976 toneladas, en los tubos exteriores 1,56 toneladas y en los cables de viento 2,087 toneladas (Fig.142). Esto quiere decir que se deben plantear los cimientos que respondan a estas cargas.

En los tubos de la estructura el ratio promedio va entre 0,5 a 0,05. Lo que significa que teniendo en cuenta la resistencia de cálculo del tubo la estructura cumple con la resistencia necesaria (Fig.142). El coeficiente de seguridad de los tubos que se ha aplicado es de 1,65. En los cables de la estructura el ratio promedio va entre 0,5 a 0,05. Significa que teniendo en cuenta la resistencia de cálculo del cable la estructura cumple con la resistencia necesaria (Fig.142). El coeficiente de seguridad de los cables que se ha aplicado es de 3.

CASO 4.

Estructura con membrana (con elementos), con tubos y cables exteriores
Fig. 143 a 148

Características estructurales de los elementos del modelo:

- **Membrana:** Ferrari Fluotop T2 1202 - Pretensado 0.37% = 12,025 daN/5cm = 240,5 kg/m Resistencia $R_k = 560/560 \text{ daN/5cm} = 11200,0 \text{ kg/m}$ - Coeficiente de seguridad (5) = $R_d = R_k / 5 = 112 \text{ daN/5cm} = 2240 \text{ kg/m}$
- **Cables de borde:** WS-2 (36mm) Galv $\varnothing 36$ - Sección 855 mm² - Módulo de elasticidad 1.635 t/cm² = 163,5 kN/mm² - Q= 125,46 t = 1.254,6 kN
- **Tubos del anillo:** L=20 m - $\varnothing 400$ -10_S235 - Sección 122,522 cm² - Peso 1944,0 kp= 19,44 kN -Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástil central del domo:** L=9 m - $\varnothing 110$ -5_S235 - Sección 16,493 cm² - Peso 121,5 kp= 1,215 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástiles menores del domo:** L=6,5 m - $\varnothing 90$ -4_S235 - Sección 10,807 cm² - Peso 56,8 kp= 0,568 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Cables exteriores (Vientos):** WS-2 (36mm) Galv $\varnothing 36$ - Sección 855 mm² - Módulo de elasticidad 1.635 t/cm² = 163,5 kN/mm² - Q= 125,46 t = 1.254,6 kN
- **Tubos exteriores:** L= 8 m - $\varnothing 250$ -8_S235 - Sección 60,821 cm² - Peso 382,0 kp= 3,82 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³

Datos generales de la estructura	
Número de nudos	447
Número de barras	1316
Número de tubos	41
Número de elementos	709
Número de cables	305
Superficie cubierta	1.177,08 m ²
Volumen (entre membrana y plano Z=0)	15.145,04 m ³
Superficie de la membrana	2.959,96 m ²
Módulo de elasticidad de la membrana	65 T/m
Peso de las barras	56.720,46 kg
Peso de la membrana	3.847,94 kg
Peso total de la estructura	60.568,40 kg
Peso de la estructura por m ²	51,45 kg

Tabla 7. Datos generales

ANÁLISIS DEL CUADRO RESUMEN 3.

La estructura está en equilibrio ante su propio peso: cargas ($x=0$, $y=0$, $z=39283$) = reacciones ($x=0$, $y=0$, $z=39283$) - (Fig.147).

Cargas: peso propio

El peso total de la estructura = 60568,40 kg (Fig.144 - Tabla 7)

El peso de los tubos es de 43385,50 kg

El peso de los cables es de 13330,96 kg

El peso de la membrana es de 3847,94 kg

Refuerzo

Con respecto al caso 3 (estructura sin membrana 29350,05 kg) el peso se incrementa en 31218,35 kg por el redimensionamiento de todos los elementos.

Movimientos

En el análisis observamos el mayor desplazamiento = 296 mm en la barra 29 (nudos 246-249) que corresponde a uno de los mástiles menores del domo ($L=6,5$ m - \varnothing 90-4_S235). Este desplazamiento ocurre por la ubicación de la barra en el espacio.

El mayor desplazamiento del anillo principal de la estructura es de =162 mm en la barra 6 (nudos 50-75) que corresponde a los tubos ($L=20$ m - \varnothing 400-10_S235). Este movimiento ocurre en el nudo superior que se une con el domo, se produce por la tensión de los cables exteriores (vientos). Esto no afecta el comportamiento de la estructura, la estructura llega al equilibrio con esta forma final. (Fig.147)

Reacciones

Las reacciones en los nudos fijos de apoyo de la estructura son del orden de 11,075 toneladas (máxima reacción). En los tubos exteriores 6,433 toneladas y en los cables de viento 8,548 toneladas (Fig.147).

En los tubos de la estructura el ratio promedio va entre 0,5 a 0,05. Lo que significa que teniendo en cuenta la resistencia de cálculo¹ del tubo la estructura cumple con la resistencia necesaria. El coeficiente de seguridad de los tubos que se ha aplicado es de 1,65

En los cables de la estructura el ratio promedio va entre 0,5 a 0,05. Significa que teniendo en cuenta la resistencia de cálculo del cable la estructura cumple con la resistencia necesaria. El coeficiente de seguridad de los cables que se ha aplicado es de 3.

CARGA DE VIENTO Y NIEVE C.

En las construcciones textiles atirantadas por su propia naturaleza, la proporción de la carga externa respecto al peso propio, es por lo general, mucho mayor que en las construcciones convencionales. Por consiguiente los pequeños cambios de cargas de viento y nieve pueden tener un impacto mayor en el tamaño de los elementos estructurales y en las deformaciones que sufren.

Por tanto la consideración de las cargas en las estructuras en membrana necesita una especial atención en términos de intensidad y de distribución. Los Eurocódigos están redactados para formas y comportamientos de edificios normales, lo que dificulta la aplicación de un carácter general. Por ello es necesario definir en más detalle los casos de cargas. Por otra parte, debido a que el peso propio es muy pequeño y a la forma curvada de las estructuras de la membrana, el viento genera fuerzas de succión importantes, lo cual hace que se produzcan por lo general sobrecargas mayores que en otros casos normales, a excepción de las estructuras de membrana ubicadas en regiones de fuertes nevadas. [27]

Por las razones mencionadas anteriormente es importante realizar el ensayo del túnel de viento para nuestro caso de estudio. En los estadios y pistas deportivas se requiere una información exacta sobre cargas de viento estáticas y dinámicas para reducir el sobredimensionado y mejorar la seguridad. Su resultado puede determinar cambios en el diseño original del proyecto, según los valores de coeficientes de presión y succión que hallemos.

El objetivo principal de realizar este ensayo es determinar los coeficientes de presión que actúan sobre la superficie, dado que la acción del viento sobre un edificio depende de su forma geométrica. De esta manera, se determinaron las acciones dinámicas que se manifestaron en forma de presiones y succiones.

El coeficiente eólico depende de la forma de la construcción, de la posición del elemento y el ángulo de incidencia sobre la superficie. Puede expresarse de la siguiente manera: El coeficiente eólico nos dice la fuerza que hay en una membrana en función del ángulo alfa (α). [28]

Donde $F = \text{presión dinámica}^{*1} \times \text{coeficiente eólico}^{*2}$

$F = \text{fuerza}$

$*1 = \text{depende sólo de la velocidad del viento}$

$*2 = \text{depende sólo del ángulo}$

$V \rightarrow \text{m/s}$ Velocidad del viento.

$W \rightarrow \text{kg/m}^2$ Presión dinámica (kg/m^2)

$$W = \frac{V^2 (\text{m/s})}{16} \quad \text{Fórmula de mecánica de fluidos.}$$

La presión dinámica que se considera para el cálculo de un edificio depende de la altura de coronación y de su situación geográfica. [29]

PRESIÓN DINÁMICA DEL VIENTO				
Altura de coronación del edificio sobre el terreno en m, cuando la situación topográfica es:		Velocidad del viento V		Presión dinámica W
Normal	Expuesta	m/s	km/h	Kg/m ²
De 0 a 10	--	28	102	50
11 a 30	--	34	125	75
31 a 100	De 0 a 30	40	144	100
>100	31 a 100	45	161	125
--	>100	49	176	150

COEFICIENTES DE PRESIÓN

El viento es la carga principal en nuestro caso de estudio de la tesis. La carga de viento es una fuerza perpendicular a la superficie (carga de presión o de succión) esto lo admiten todas las normas. La succión y la presión dependen de la velocidad del viento y el ángulo de incidencia.

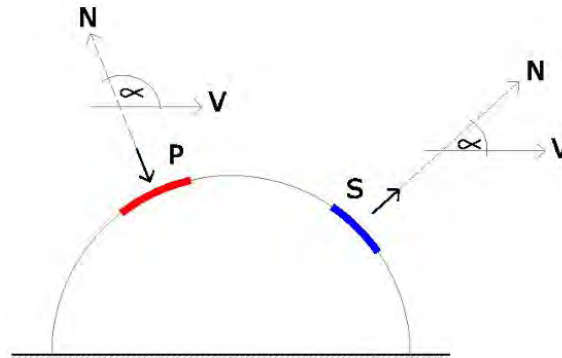


Figura 149. Esquema de carga de viento, donde V= viento
 P= presión, S= succión, α = ángulo de incidencia,
 N= normal de la superficie

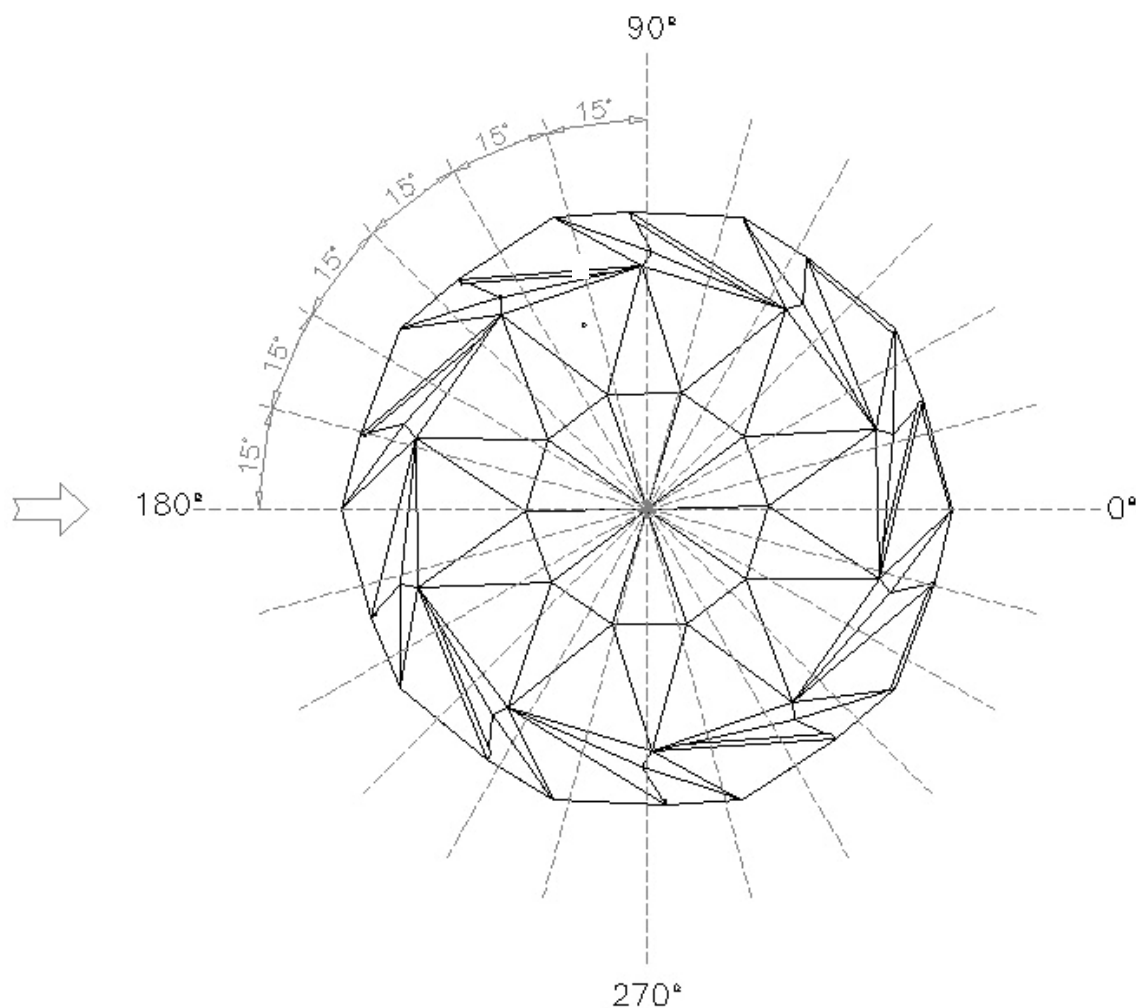


Figura 150. Esquema de incidencia horizontal del viento en el modelo.

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.

La fuerza producida por la acción del viento es proporcional al cuadrado de la velocidad del viento: por ejemplo, si en una zona un viento de velocidad 100 km/h produce una succión de 40 kg/m², en la misma zona, un viento de la misma dirección y velocidad 140 km/h producirá una succión de 80 kg/m². [26]

- la altura sobre el terreno: cuanto mayor altura mayor velocidad del viento.
- el entorno: cuanto mas liso mayor velocidad del viento.
- la propia forma de la estructura tensada: producción de turbulencias.

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). [28]

En nuestro caso la estructura de estudio se halla ubicada en un terreno liso con una altura llana, por la forma propia del modelo se producen flujos de viento turbulentos y la velocidad del viento aplicada es de 170 km/h. (Ver apéndice C.)

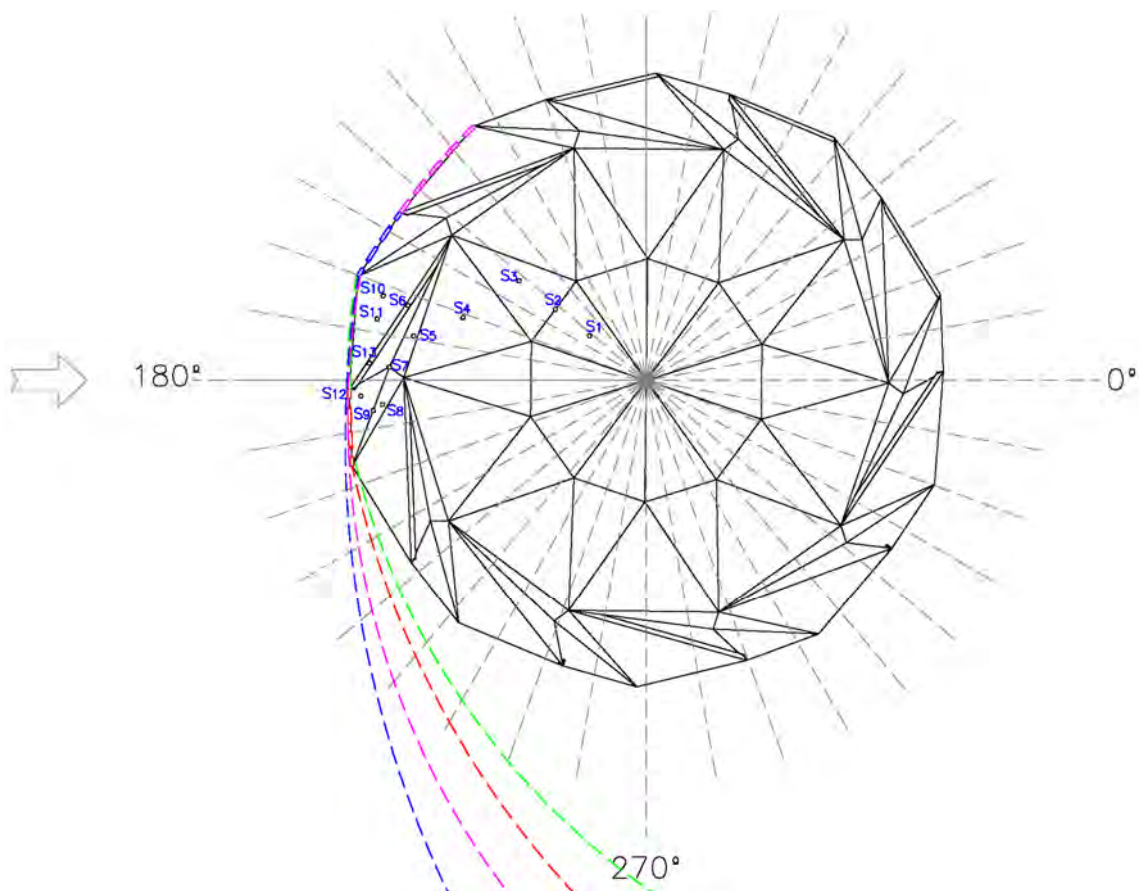


Figura 151. Esquema de incidencia de viento horizontal en el modelo. Sondas en el modelo S₁ a S₁₃. Por la forma aerodinámica y convexa del modelo, el viento en la parte frontal crea algunas presiones y lateralmente se desvía causando succiones, al igual que en la parte superior del domo.

CASO 5a. CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ANTE VIENTO 170 km/h CON MEMBRANA, REFORZADA CON CABLES Y TUBOS EXTERIORES. COEFICIENTES DE PRESIÓN SEGÚN WINTESS

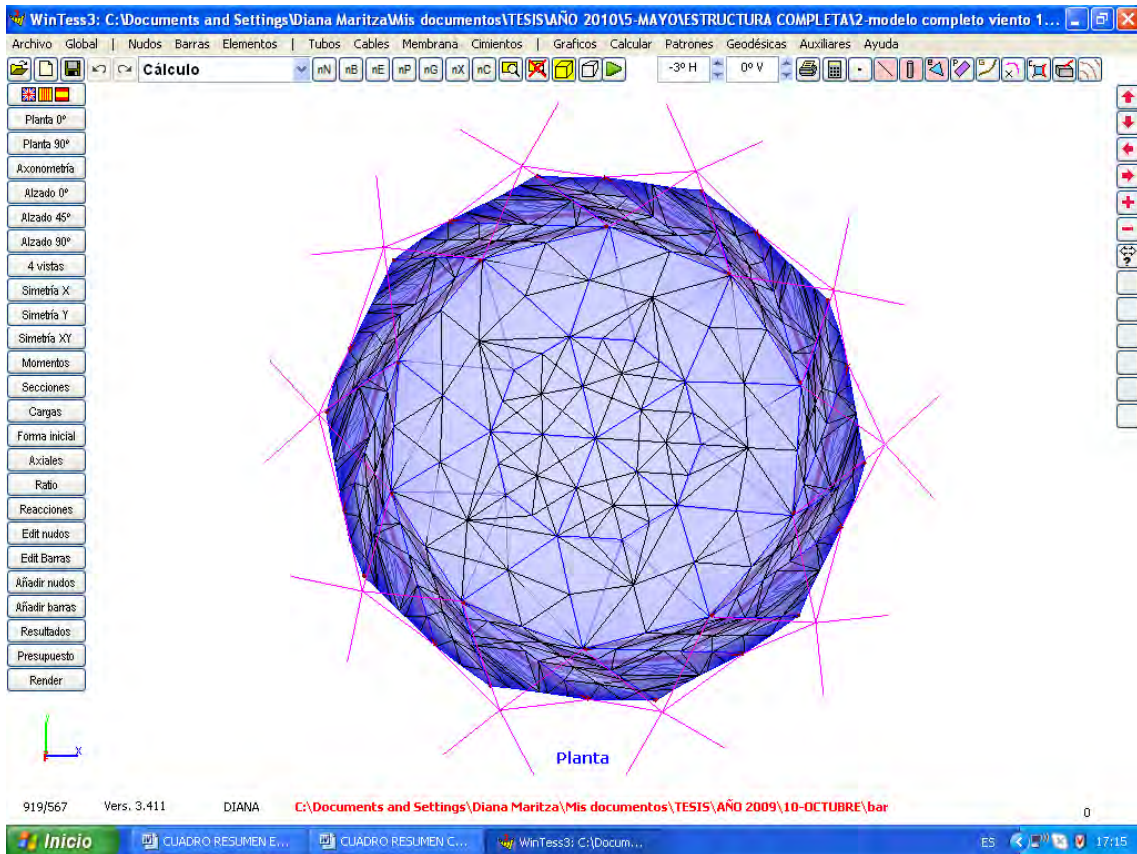


Figura 152. Vista en planta de la estructura.

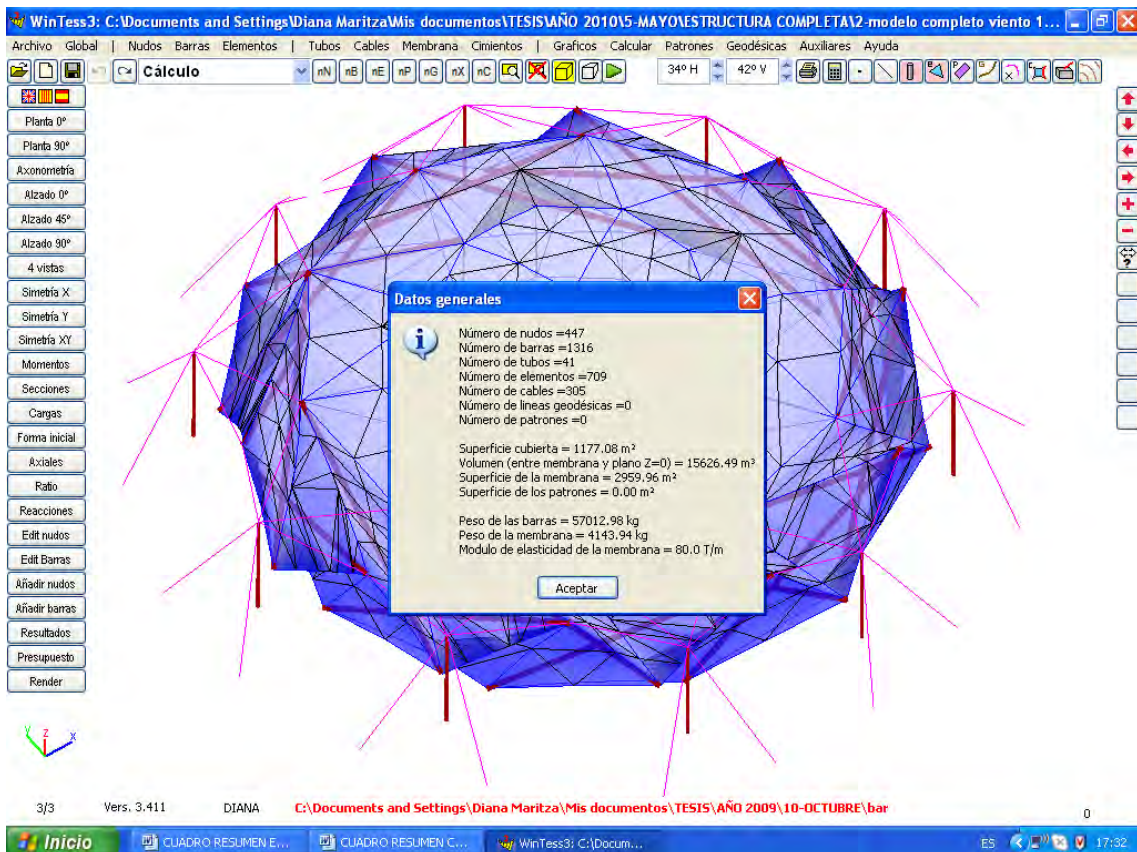


Figura 153. Datos generales de la estructura.

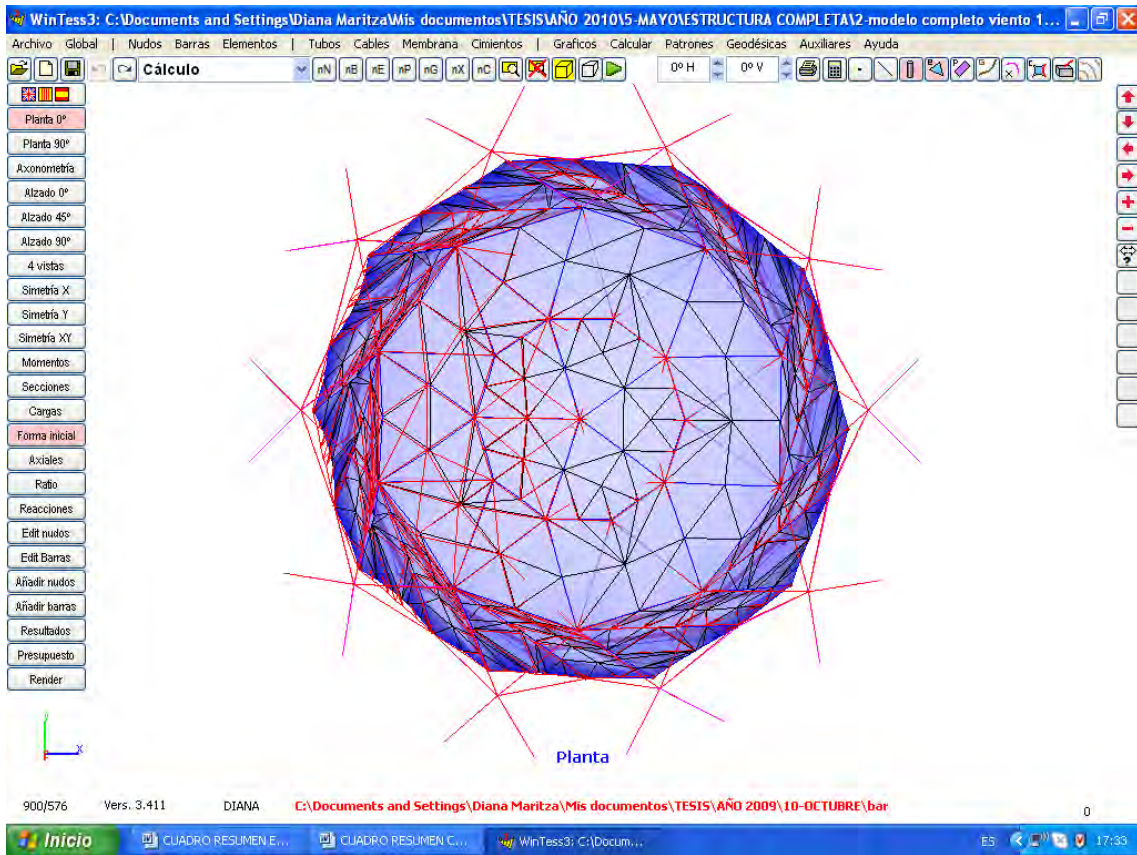


Figura 154. Planta - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

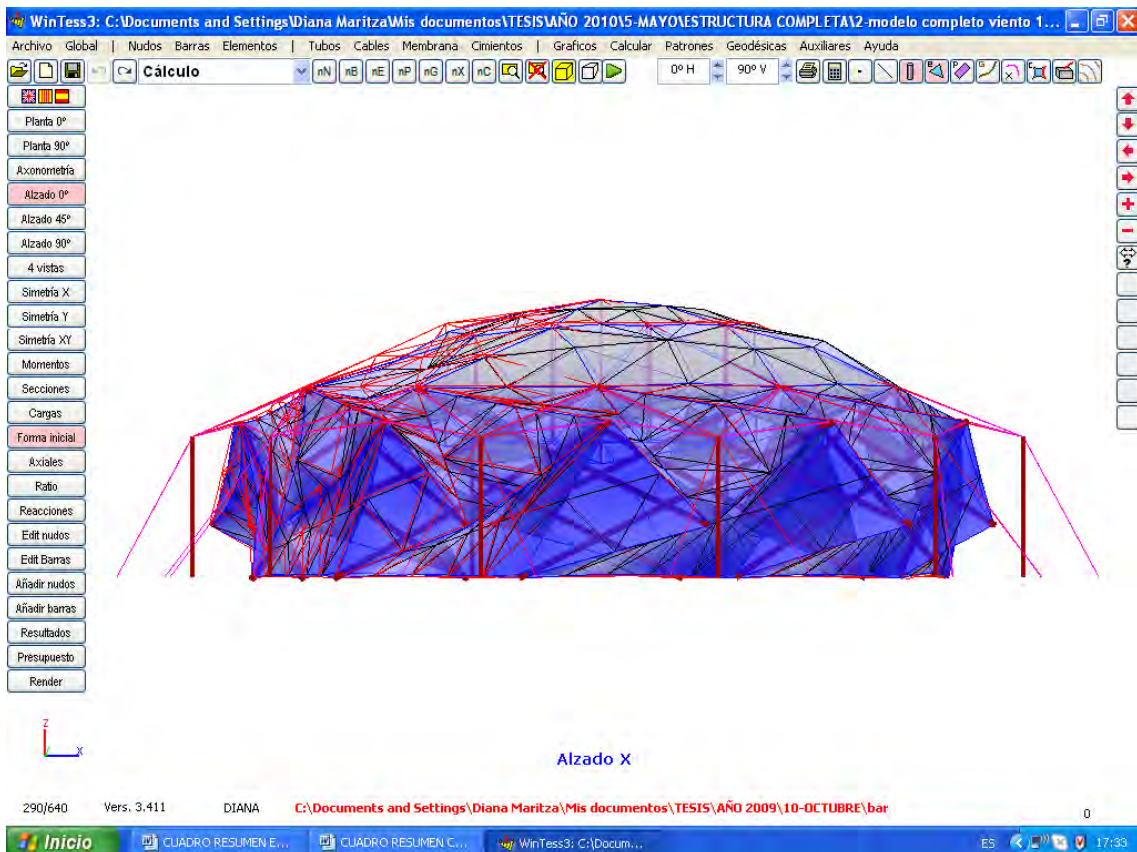


Figura 155. Alzado - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

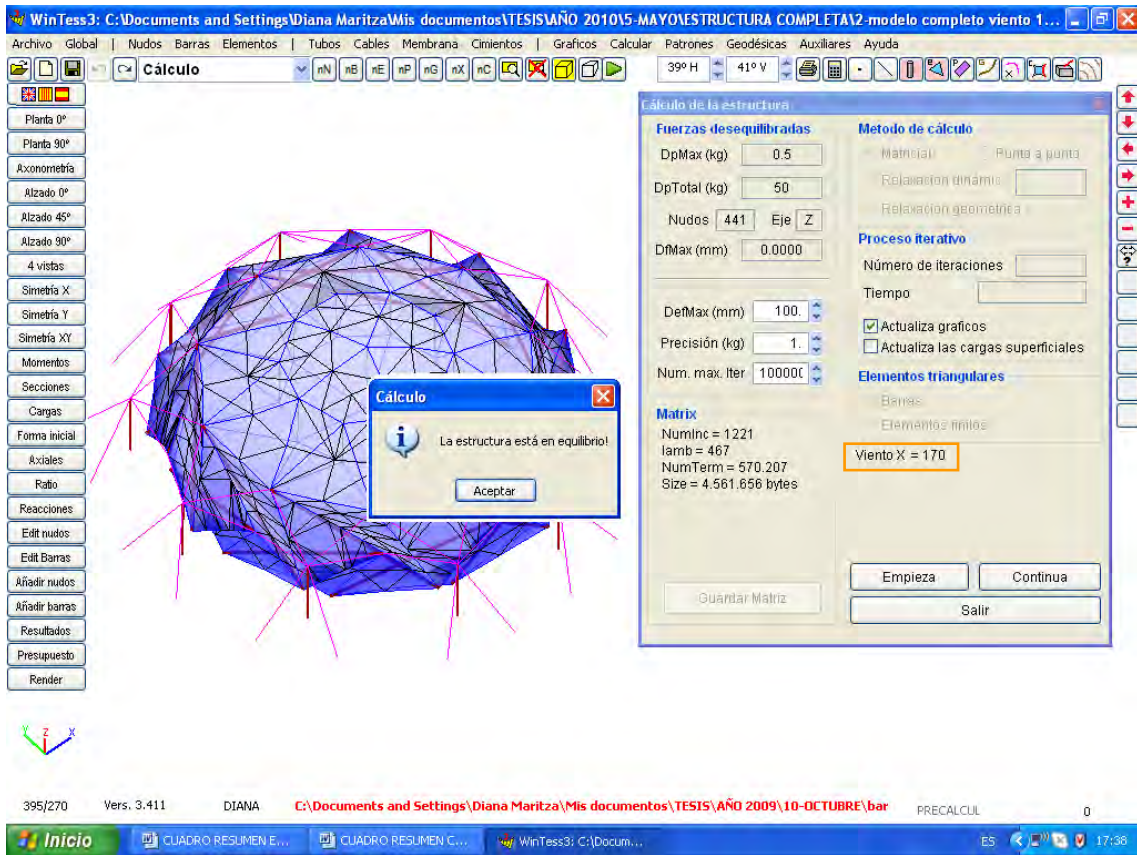


Figura 156. La estructura está en equilibrio ante su propio peso.

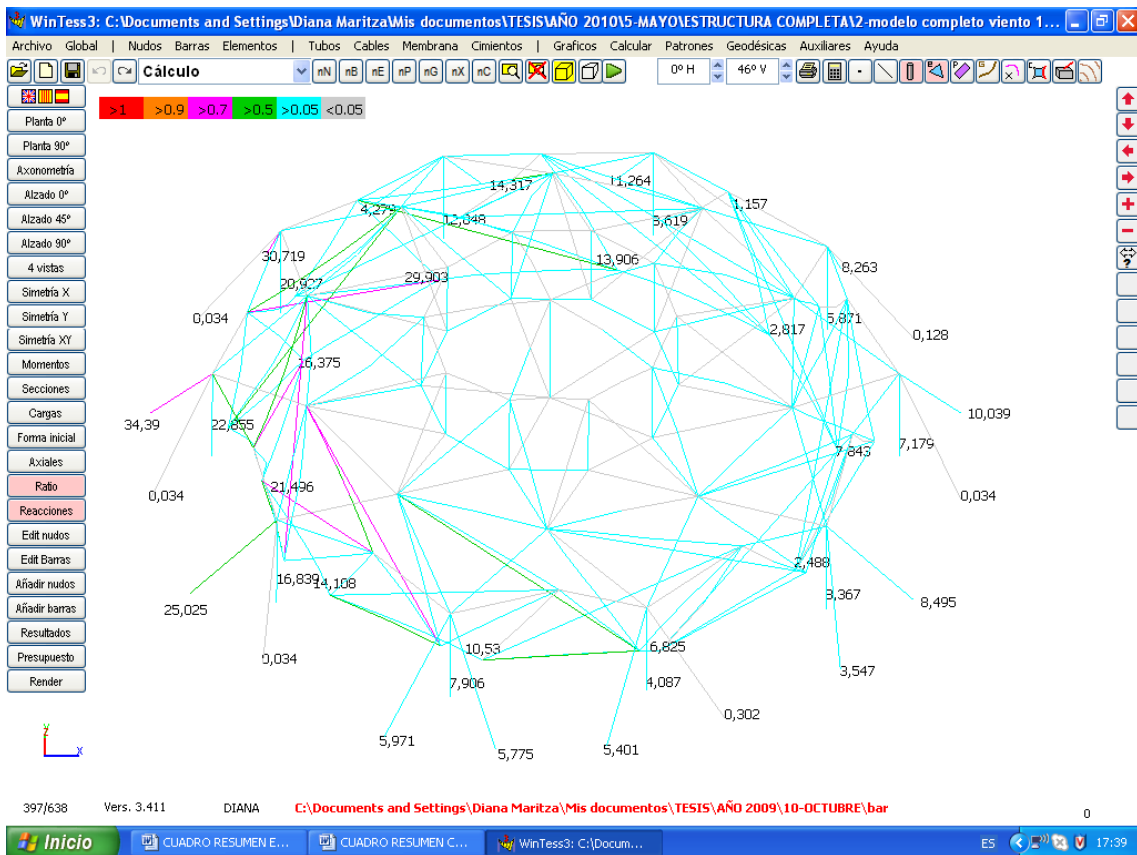


Figura 157. Esquema de ratio y reacciones de la estructura.

CASO 5b. CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ANTE VIENTO 170 km/h CON MEMBRANA, REFORZADA CON CABLES Y TUBOS EXTERIORES. COEFICIENTES DE PRESIÓN SEGÚN TÚNEL DE VIENTO

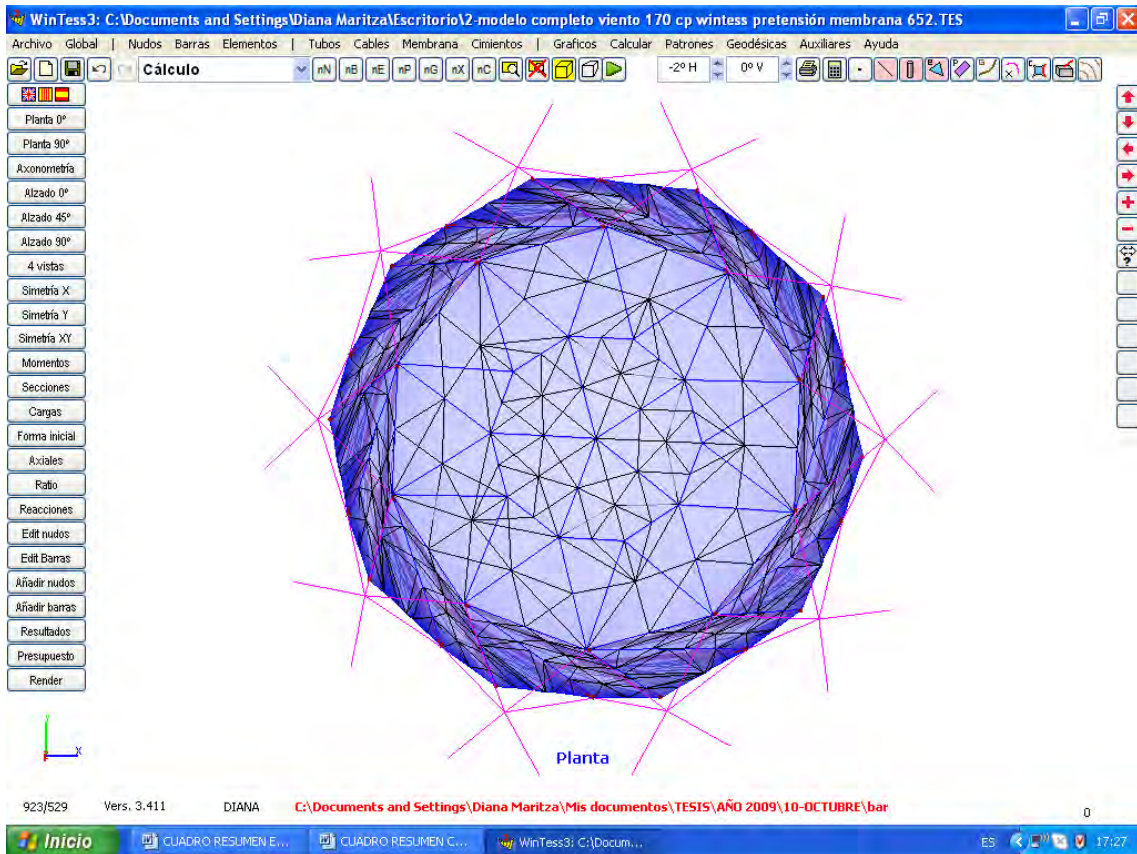


Figura 158. Vista en planta de la estructura.

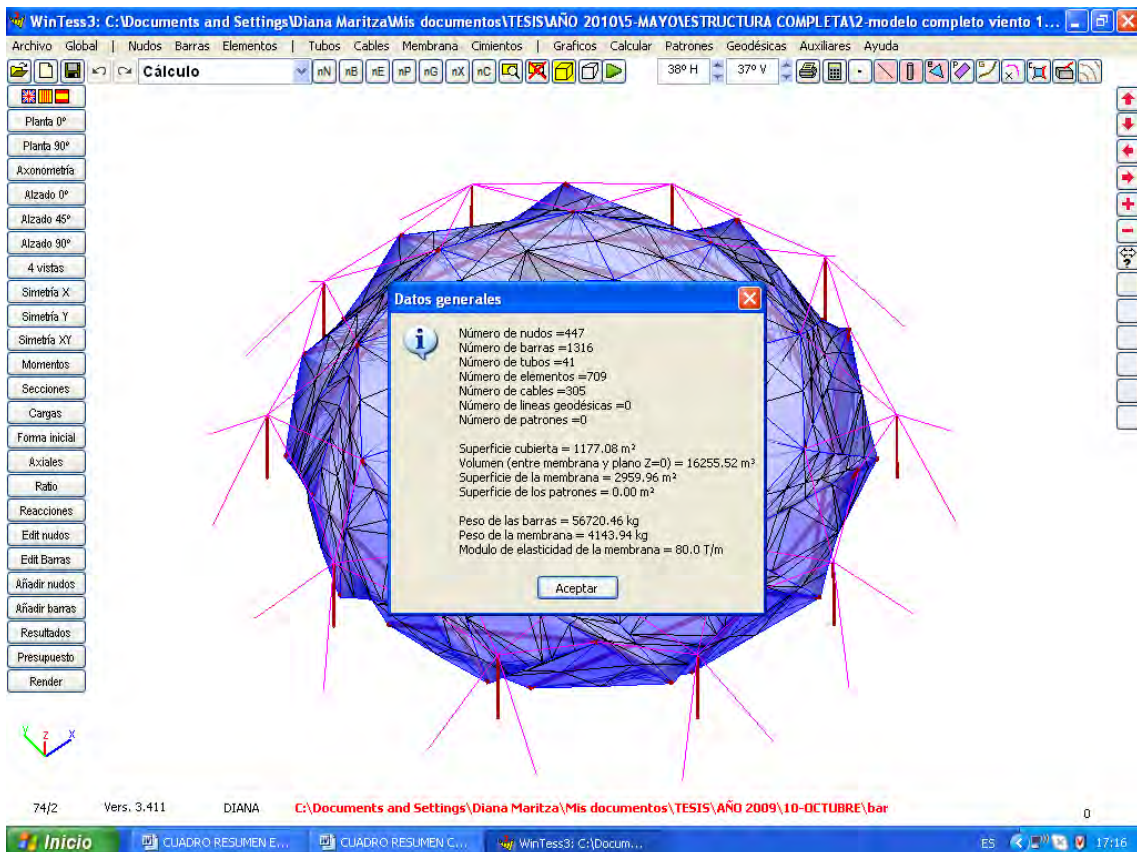


Figura 159. Datos generales de la estructura.

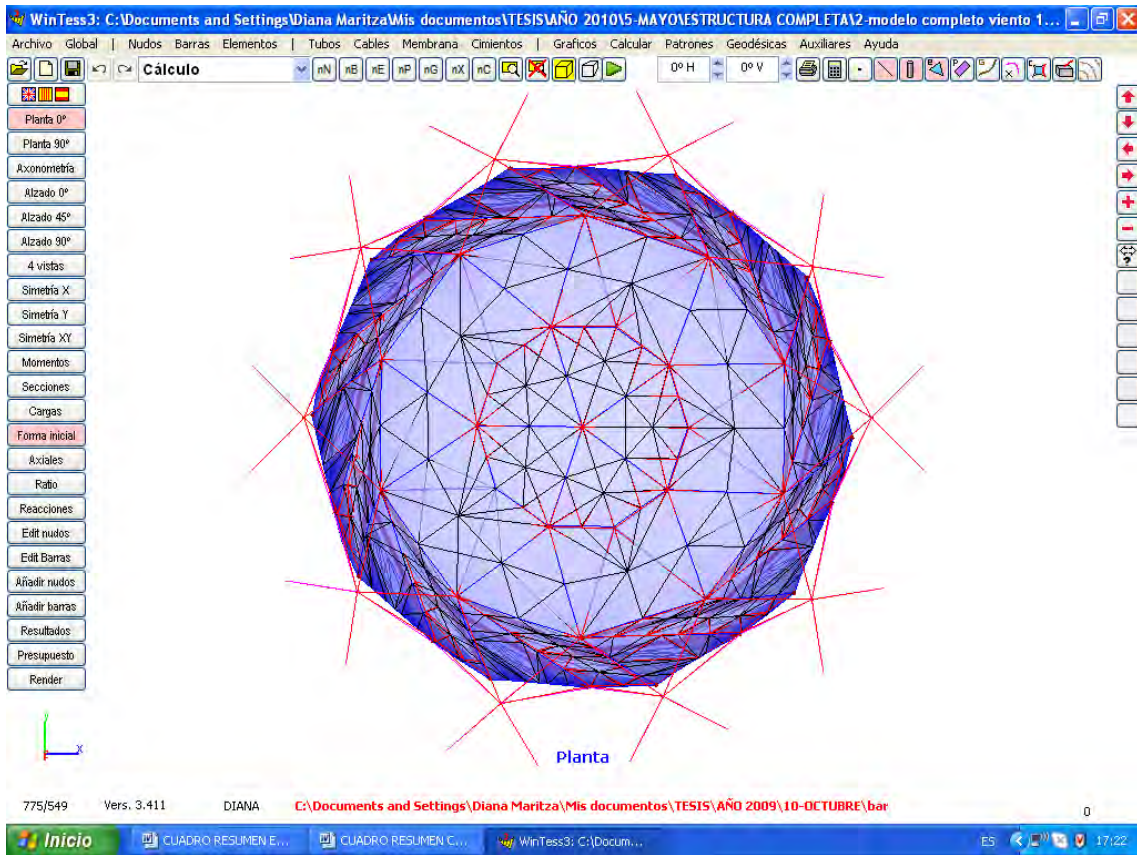


Figura 160. Planta - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

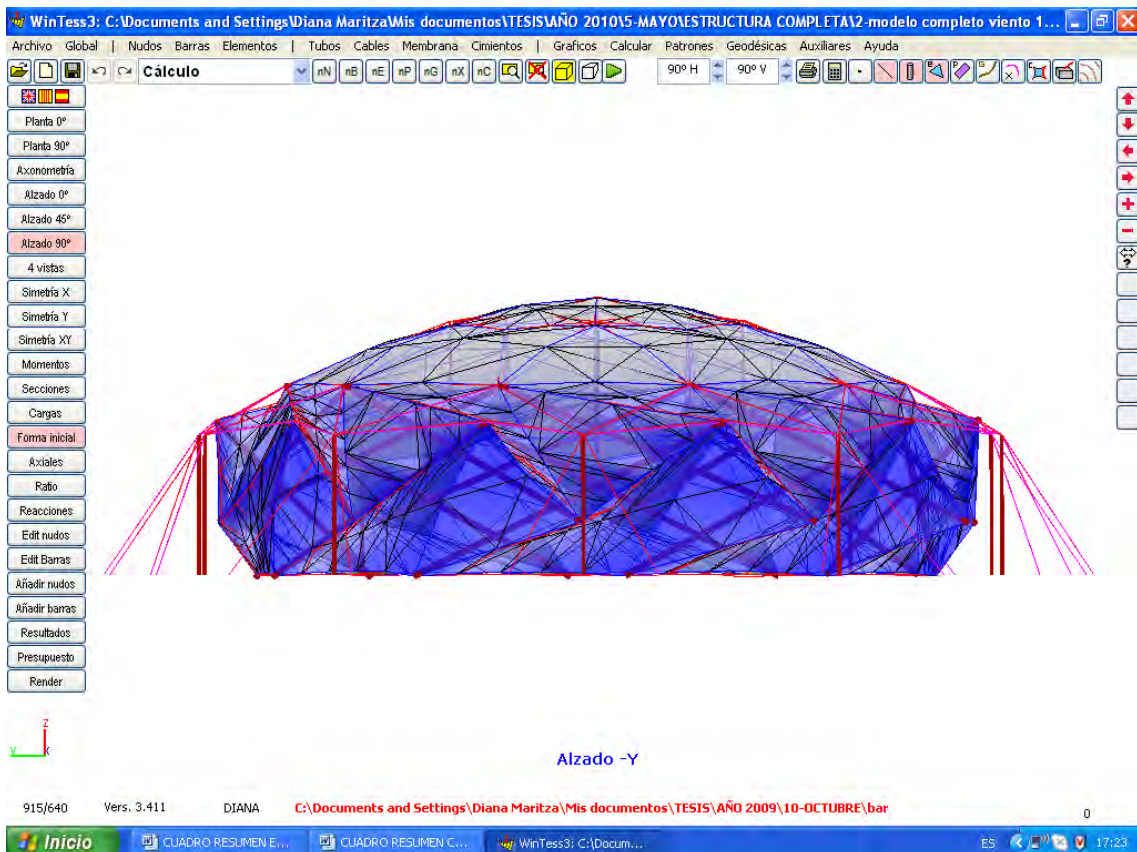


Figura 161. Alzado - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

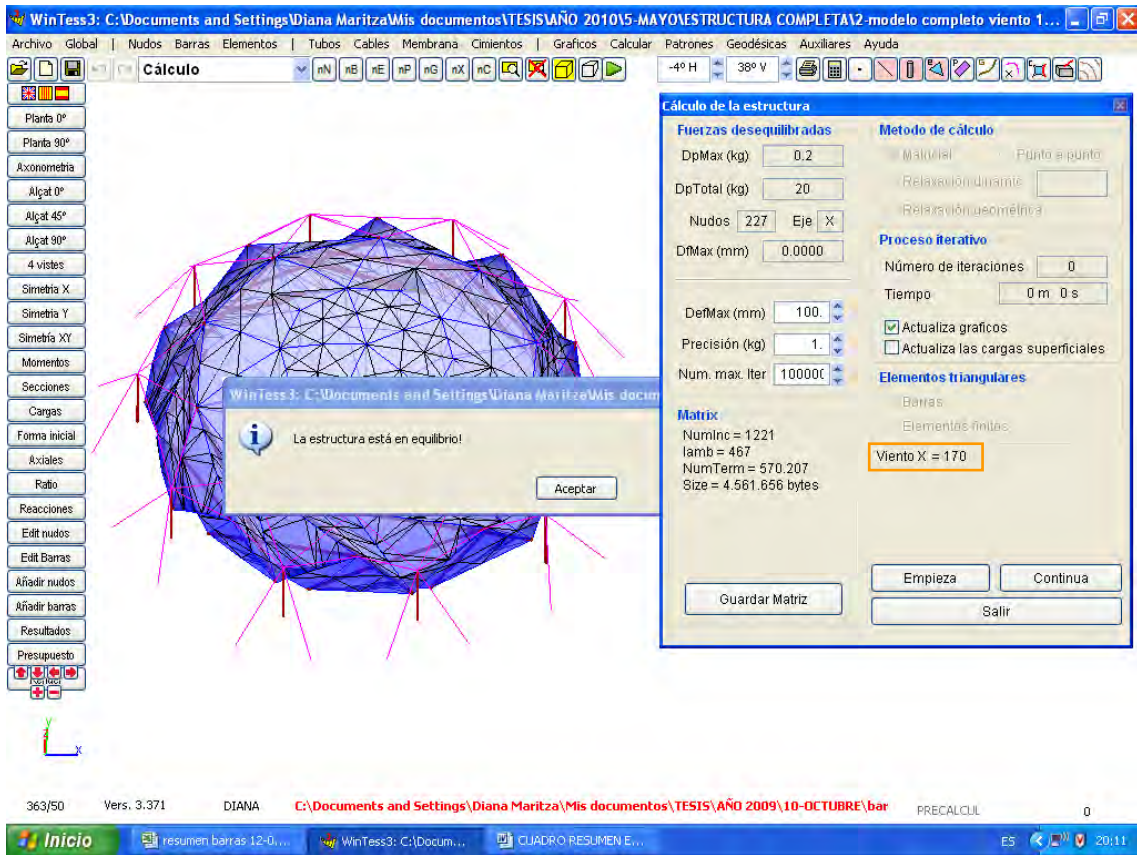


Figura 162. La estructura está en equilibrio ante su propio peso.

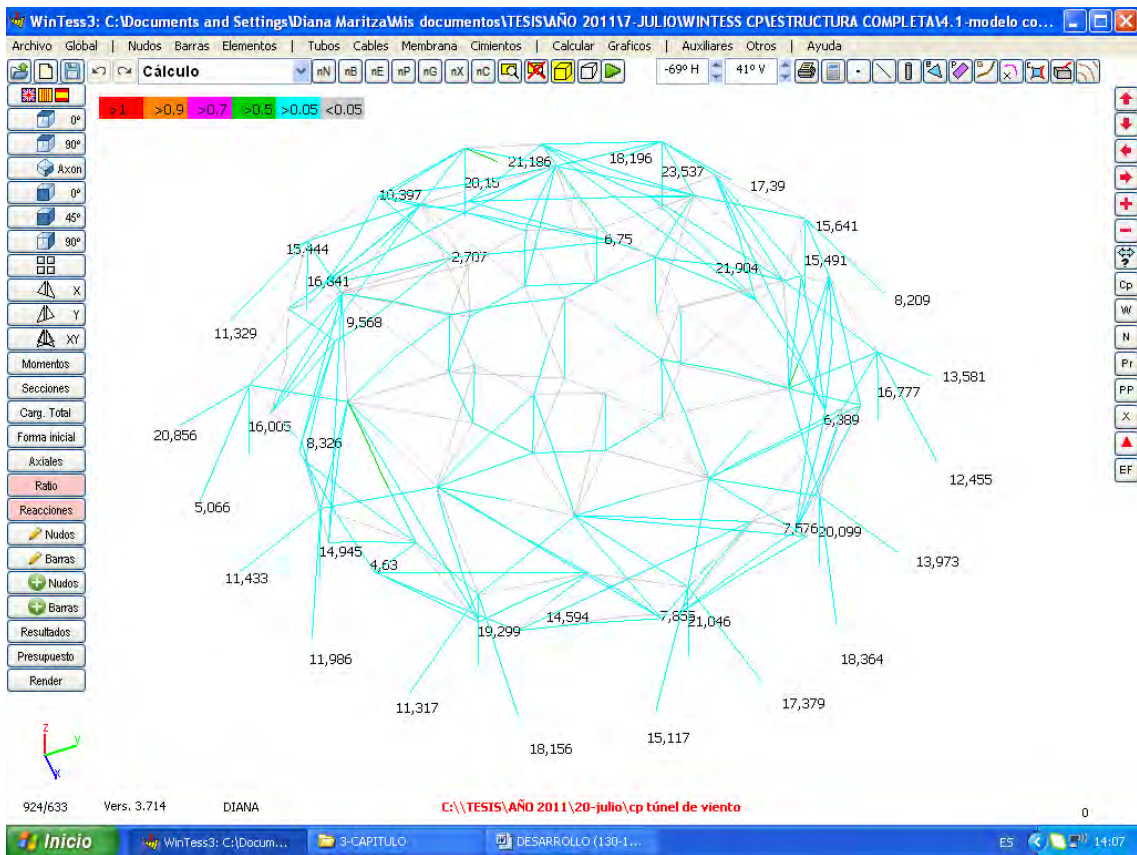


Figura 163. Esquema de ratio y reacciones de la estructura.

CASO 6. CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA ANTE NIEVE 50 kg/m^2 - VIENTO 15 km/h . CON MEMBRANA, REFORZADA CON CABLES Y TUBOS EXTERIORES.

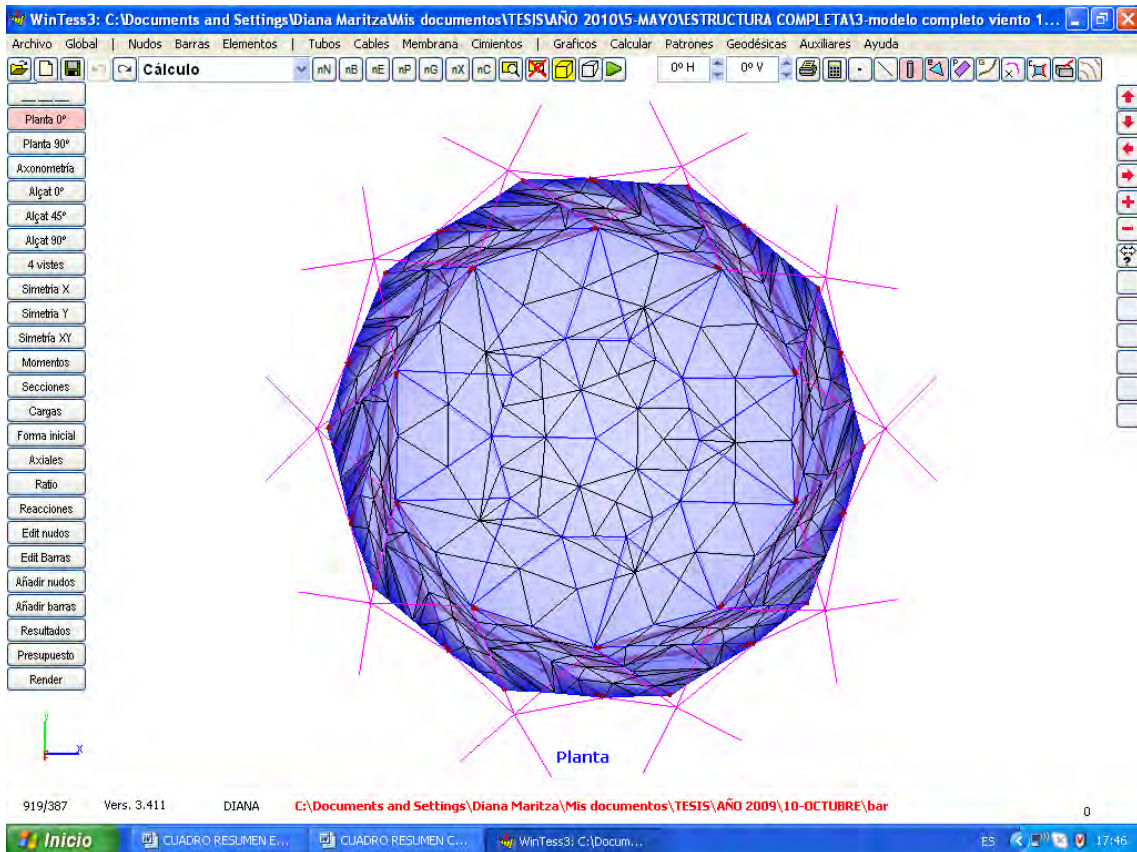


Figura 164. Vista en planta de la estructura.

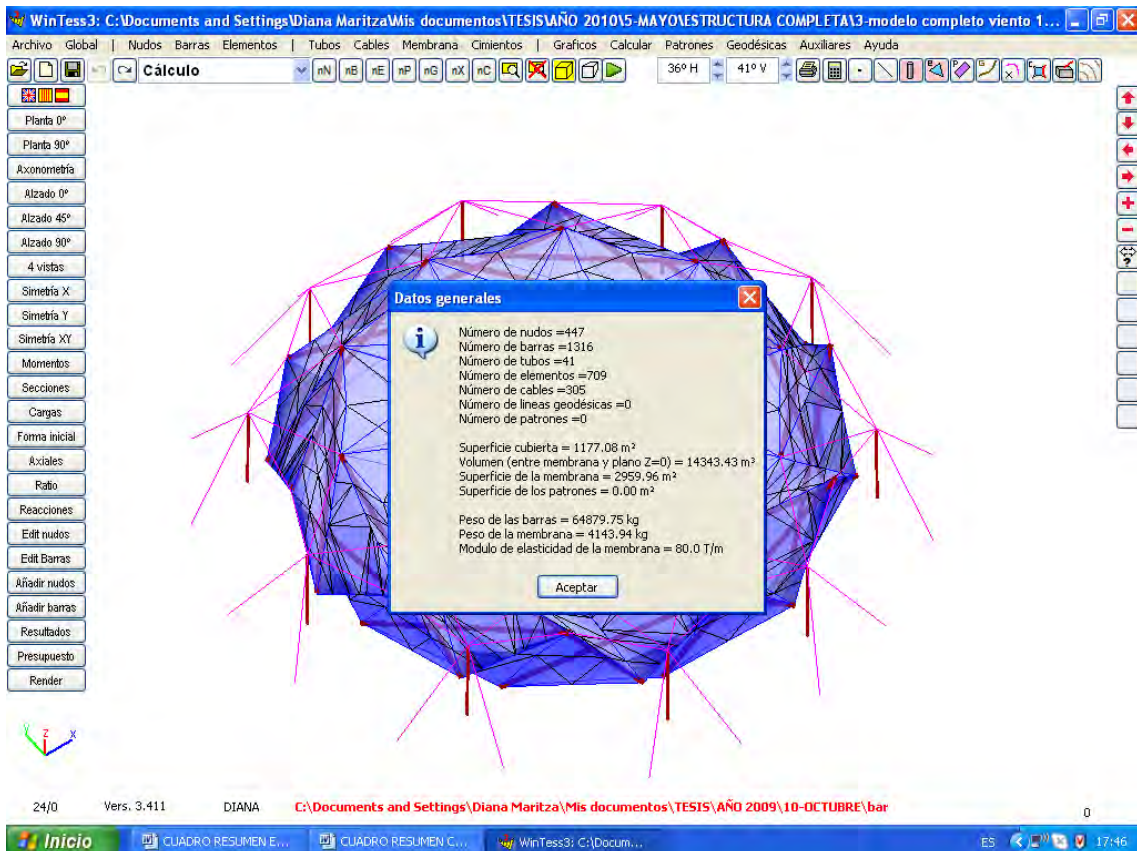


Figura 165. Datos generales de la estructura.

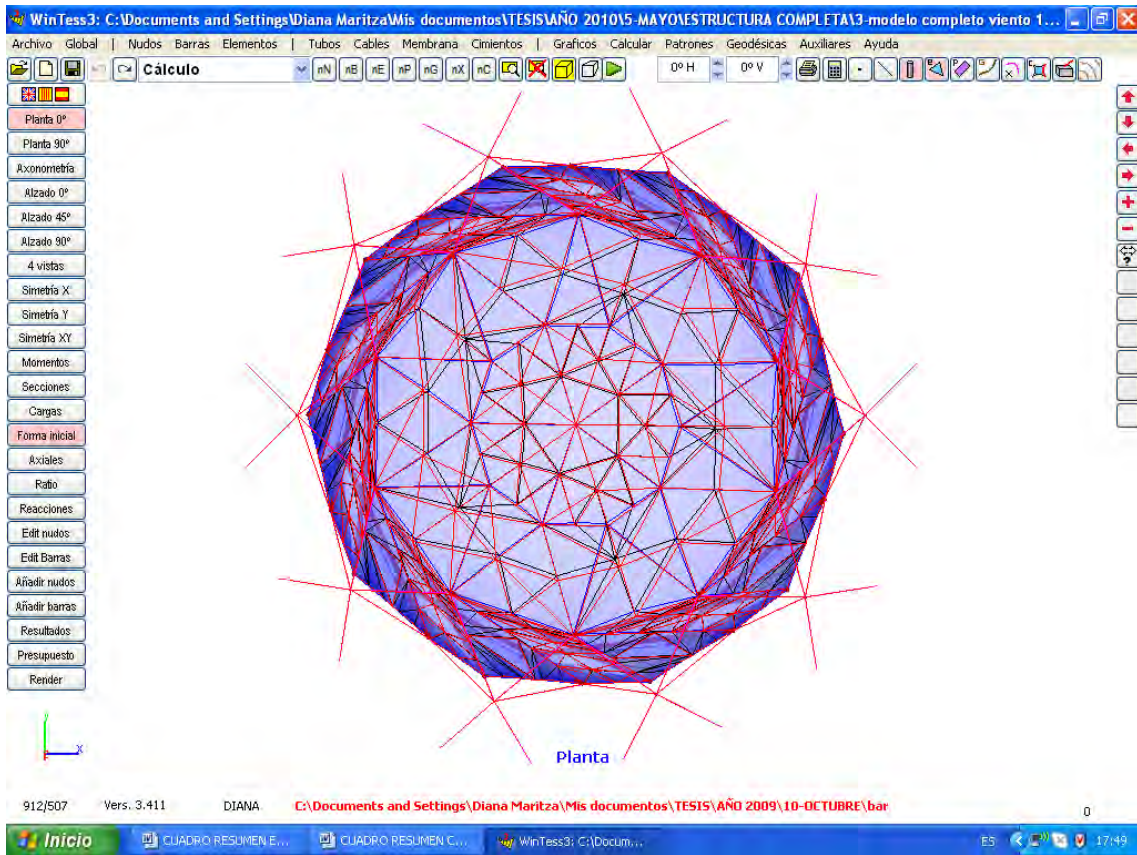


Figura 166. Planta - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

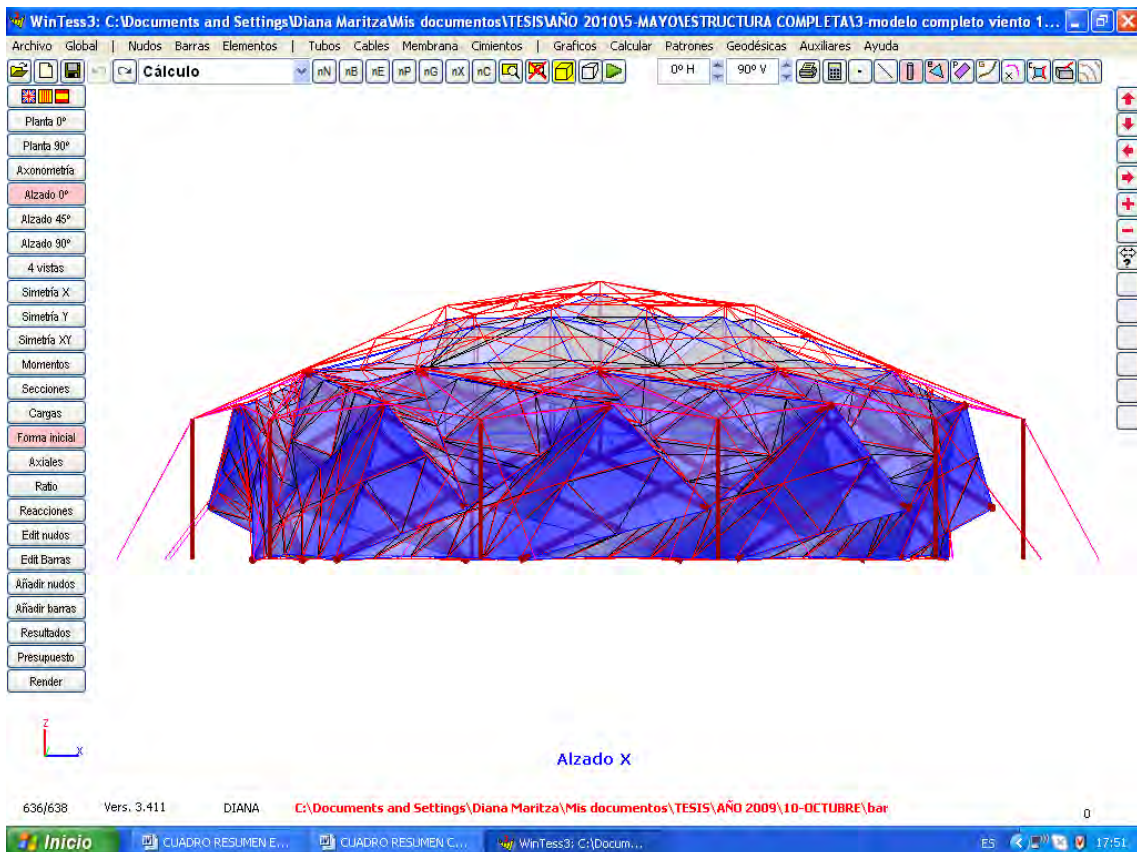


Figura 167. Alzado - comparación de la forma inicial (rojo) de la estructura con la forma final (azul) después del cálculo.

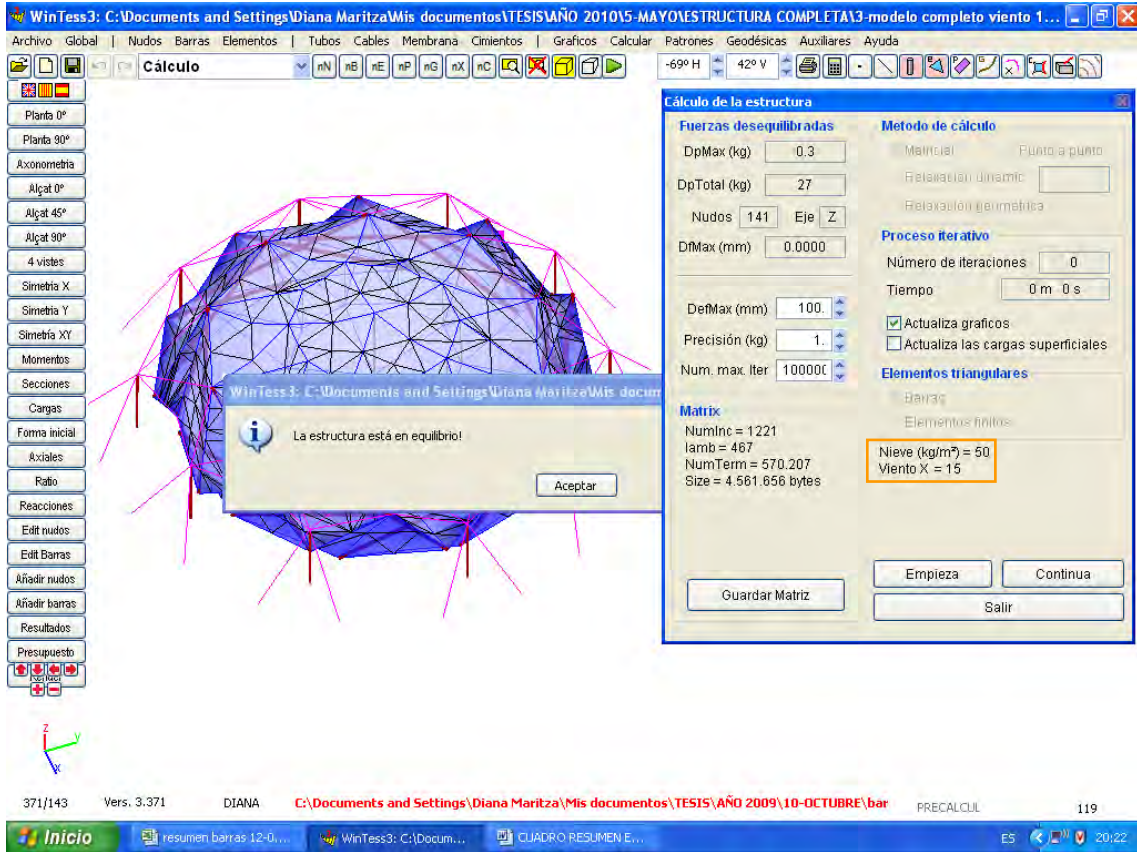


Figura 168. La estructura está en equilibrio ante su propio peso.

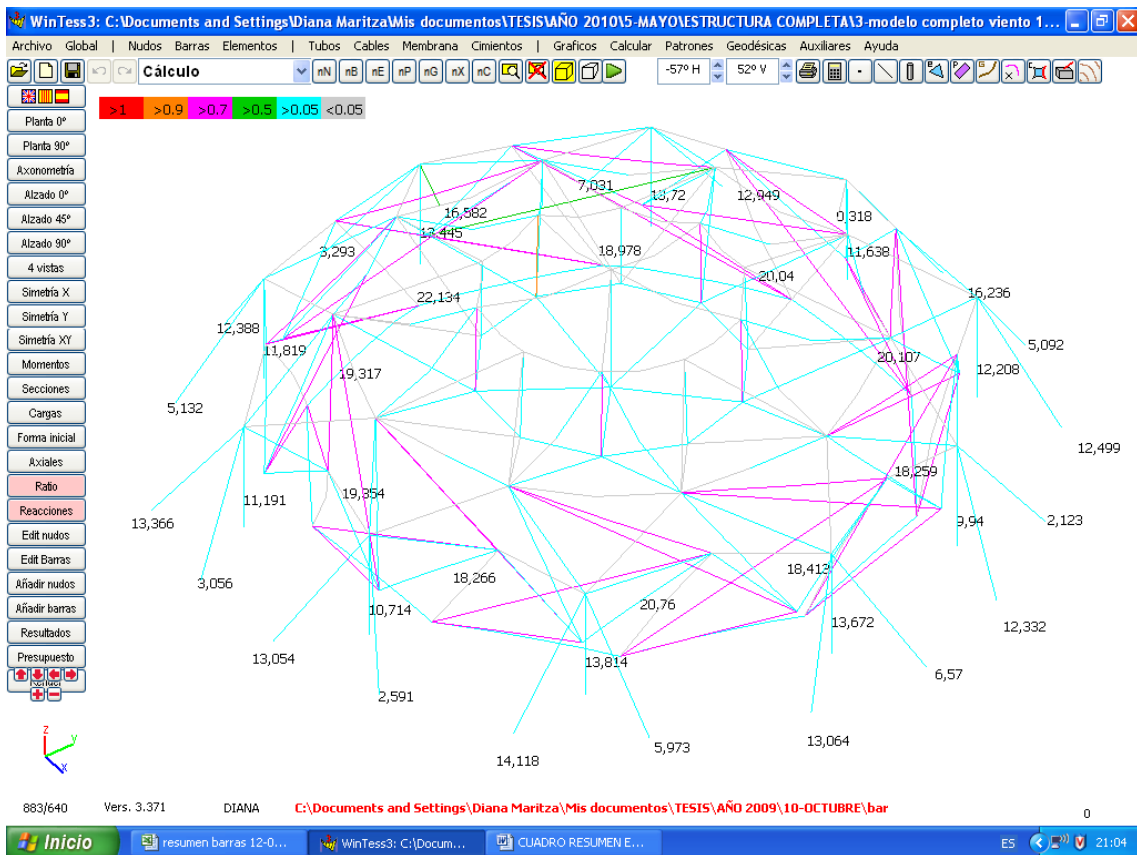


Figura 169. Esquema de ratio y reacciones de la estructura.

4. CUADRO RESUMEN (CASO 5a)

ESTRUCTURA CON MEMBRANA (ELEMENTOS), CON TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS
DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE VIENTO 170 km/h. - COEFICIENTE DE PRESIÓN DE WINTESS

Barra	Nudo-1	Nudo-2	Longitud m	Sección cm ²	Axial T	dL mm	Tensión kg/cm ²	Ratio	Carga (T)		Reacción (T)		desplazamiento mm		
									Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	
2	316	441	20.00	122.522	-29.106	-2.3	-290	0.49	0.705	1.054	0	0	56.	124.	
3	373	399	20.00	122.522	-27.982	-2.2	-264	0.46	0.709	0.962	0	0	35.	117.	
4	375	292	20.00	122.522	-27.310	-2.1	-249	0.45	0.706	0.956	0	0	24.	134.	
5	227	62	20.00	122.522	-29.954	-2.3	-309	0.49	0.754	1.144	0	0	12.	146.	
6	130	7	20.00	122.522	-38.106	-3.0	-495	0.62	1.186	1.243	0	0	30.	164.	
7	75	50	20.00	122.522	-43.649	-3.4	-622	0.73	1.584	1.223	0	0	93.	195.	
8	73	155	20.00	122.522	-41.679	-3.2	-577	0.72	1.634	1.163	0	0	170.	110.	
1088	127	278	20.00	122.522	-32.372	-2.5	-364	0.56	1.283	1.129	0	0	197.	140.	
1089	222	385	20.00	122.522	-29.558	-2.3	-300	0.49	0.730	1.148	0	0	91.	142.	
1224	320	171	20.00	122.522	-25.359	-2.0	-204	0.41	0.705	1.009	0	0	7.	61.	
9	89	229	20.00	122.522	-21.067	-1.7	-116	0.41	1.224	1.052	14.108	0	0	0	24.
10	185	343	20.00	122.522	-21.444	-1.7	-125	0.38	1.093	1.067	10.530	0	0	0	145.
11	293	434	20.00	122.522	-19.870	-1.6	-88	0.35	1.120	1.215	6.825	0	0	0	143.
12	377	432	20.00	122.522	-20.872	-1.6	-111	0.36	1.123	1.317	2.488	0	0	0	117.
13	423	332	20.00	122.522	-22.023	-1.7	-138	0.38	1.124	1.339	7.843	0	0	0	113.
14	360	220	20.00	122.522	-22.627	-1.8	-152	0.39	1.118	1.239	2.817	0	0	0	69.
15	265	105	20.00	122.522	-30.437	-2.4	-334	0.53	1.118	0.994	13.906	0	0	0	51.
16	154	14	20.00	122.522	-51.048	-4.0	-817	0.85	0.988	1.141	29.903	0	0	0	95.
17	71	16	20.00	122.522	-51.078	-4.0	-818	0.86	1.178	1.170	16.375	0	0	0	143.
995	23	117	20.00	122.522	-48.478	-3.8	-758	0.85	1.246	1.158	21.496	0	0	0	107.
18	224	225	9.00	16.493	-0.448	-0.1	-210	0.05	0.642	0.211	0	0	90	68.	
19	284	285	6.50	10.807	-0.703	-67.5	-394	0.14	0.753	0.179	0	0	121	66.	
20	244	243	6.50	10.807	-0.326	-67.1	-176	0.09	0.381	0.148	0	0	228	143.	
21	199	200	6.50	10.807	-0.978	-67.2	-542	0.18	0.379	0.178	0	0	288	202.	
22	160	159	6.50	10.807	-0.584	-60.9	-266	0.11	0.197	0.144	0	0	242	188.	
23	144	142	6.50	10.807	-2.242	-67.0	-1.222	0.43	0.256	0.178	0	0	488	396.	
24	161	163	6.50	10.807	-0.783	-62.0	-373	0.13	0.204	0.145	0	0	211	128.	
25	204	203	6.50	10.807	-1.063	-65.9	-564	0.17	0.401	0.178	0	0	240	157.	
26	246	249	6.50	10.807	-0.749	-66.8	-413	0.15	0.387	0.148	0	0	130	51.	
27	289	290	6.50	10.807	-0.559	-66.6	-307	0.13	0.752	0.178	0	0	100	34.	
28	304	306	6.50	10.807	-0.623	-66.8	-339	0.15	0.394	0.148	0	0	193	122.	
1227	5	6	8.00	60.821	-22.088	-1.4	-542	0.39	0.191	0.368	22.855	0	0	0	47.
1228	47	48	8.00	60.821	-20.220	-1.3	-496	0.36	0.191	0.372	20.927	0	0	0	39.
1229	157	158	8.00	60.821	-14.191	-0.9	-348	0.22	0.191	0.370	12.848	0	0	0	19.
1230	287	288	8.00	60.821	-8.421	-0.5	-206	0.15	0.191	0.372	8.619	0	0	0	14.
1231	411	412	8.00	60.821	-6.284	-0.4	-154	0.10	0.191	0.368	5.871	0	0	0	10.
1232	164	165	8.00	60.821	-8.996	-0.6	-220	0.13	0.191	0.374	7.906	0	0	0	10.
1233	282	283	8.00	60.821	-4.530	-0.3	-111	0.07	0.191	0.369	4.087	0	0	0	7.
1234	409	410	8.00	60.821	-8.949	-0.6	-219	0.14	0.191	0.373	8.367	0	0	0	12.
1235	442	443	8.00	60.821	-7.605	-0.5	-186	0.12	0.191	0.374	7.179	0	0	0	13.
1236	41	42	8.00	60.821	-15.565	-1.0	-382	0.29	0.191	0.368	16.839	0	0	0	35.

OBSERVACIONES:											promedio desplaz.	
Nudos de los apoyos - barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento = 0											0.	
Nudos de las barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 100 mm.											100.	
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 127 mm.											127.	
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity, se unen con el domo superior - desplazamiento promedio = 71 mm.											71.	
MAYORES DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS DE LAS BARRAS DEL ANILLO TENSEGRITY QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO QUE NO TIENEN NI APOYO, NI UNIÓN CON EL DOMO SUPERIOR												
Nudo superior del mástil central del domo tensegrity- desplazamiento = 90 mm.											90	
Nudo inferior del mástil central - desplazamiento = 66mm.											66	
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 249 mm.											249	
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 171 mm.											171	
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 200 mm.											200.	
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 126 mm.											126.	
Nudos inferiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 0											0.	
Nudos superiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 20 mm.											20.	
MAYORES DESPLAZAMIENTOS DEL DOMO CENTRAL EN LOS NUDOS SUPERIORES DE LOS MÁSTILES MENORES. HAN AUMENTADO CON RESPECTO AL CASO 5a									LOS MAYORES DESPLAZAMIENTOS OCURREN EN LOS PUNTOS QUE DAN CARA AL VIENTO.			
MAYORES REACCIONES EN LOS NUDOS FIJOS DEL ANILLO 29.903 ton												
MAYORES REACCIONES EN LOS TUBOS EXTERIORES 22.855 ton									EL PESO DE LA ESTRUCTURA AUMENTA EN 292.52 kg.			
MAYORES REACCIONES EN LOS CABLES EXTERIORES (VIENTOS) 34.39 ton									CON RESPECTO AL CASO 5a.			

Tabla 8. Caso 5a.

A CUADRO RESUMEN (CASO 5a)

**ESTRUCTURA CON MEMBRANA (ELEMENTOS), CON TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS
DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE VIENTO 170 km/h. - COEFICIENTE DE PRESIÓN DE WINTESS.**

NUDOS	NUDOS INICIALES			NUDOS FINALES			REACCIONES				DESPLAZAMIENTOS			
	No.	xini(m)	yini(m)	zini(m)	Xf(m)	Yf(m)	Zf(m)	Rx(T)	Ry(T)	Rz(T)	RT(T)	dx/mm	dy/mm	dz/mm
5	6.083	0.000	0.000	6.083	0.000	0.000	-0.049	0.122	-22.854	22.855	0	0	0	0
6	6.083	0.000	8.000	6.100	-0.043	7.998	0.000	-0.000	-0.000	0.000	17	-43	-2	47
7	7.078	-0.047	2.964	7.198	-0.141	2.905	0.000	-0.000	0.000	0.000	121	-94	-59	164
14	8.494	5.372	8.808	8.514	5.309	8.740	0.000	0.000	-0.000	0.000	20	-63	-68	95
16	8.901	-8.091	8.848	8.934	-8.155	8.725	0.000	0.000	-0.000	0.000	34	-64	-124	143
23	9.519	-2.320	-0.082	9.519	-2.320	-0.082	-6.122	18.574	-8.923	21.496	0	0	0	0
41	10.542	-14.598	0.000	10.542	-14.598	0.000	-0.059	0.044	-16.839	16.839	0	0	0	0
42	10.542	-14.598	8.000	10.570	-14.620	7.999	0.000	0.000	-0.000	0.000	28	-21	-1	35
47	10.837	14.262	0.000	10.837	14.262	0.000	0.006	0.101	-20.926	20.927	0	0	0	0
48	10.837	14.262	8.000	10.834	14.223	7.999	0.000	-0.000	-0.000	0.000	-2	-39	-1	39
50	10.910	-13.321	2.988	11.065	-13.348	2.873	0.000	-0.000	0.000	0.000	155	-27	-115	195
62	11.756	12.990	2.997	11.803	12.854	2.974	0.000	-0.000	0.000	0.000	47	-136	-23	146
71	12.409	9.690	-0.082	12.409	9.690	-0.082	2.894	13.943	-8.085	16.375	0	0	0	0
73	12.522	-6.074	10.876	12.605	-6.056	10.729	0.000	-0.000	-0.000	0.000	83	18	-147	170
75	12.610	4.902	10.834	12.662	4.858	10.771	0.000	-0.000	-0.000	0.000	52	-44	-63	93
89	14.239	-13.735	-0.082	14.239	-13.735	-0.082	9.708	-9.715	3.227	14.108	0	0	0	0
105	16.134	16.469	8.820	16.117	16.452	8.775	0.000	0.000	-0.000	0.000	-17	-17	-45	51
117	17.172	-18.717	8.931	17.223	-18.738	8.839	-0.000	0.000	-0.000	0.000	51	-22	-92	107
127	18.864	-14.966	10.928	18.890	-14.887	10.750	0.000	-0.000	-0.000	0.000	26	79	-178	197
130	19.151	13.702	10.837	19.158	13.675	10.827	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	7	-27	-10	30
142	20.559	-0.665	7.846	20.537	-0.632	7.452	0.000	0.000	-0.000	0.000	-22	33	-394	396
144	20.578	-0.645	14.482	20.733	-0.639	14.018	0.000	-0.000	0.000	0.000	155	5	-464	489
154	21.807	17.707	-0.082	21.807	17.707	-0.082	19.827	17.081	-14.469	29.903	0	0	0	0
155	21.842	-21.820	2.972	21.885	-21.846	2.874	0.000	0.000	0.000	0.000	43	-26	-98	110
157	22.069	21.666	0.000	22.069	21.666	0.000	0.004	0.030	-12.848	12.848	0	0	0	0
158	22.069	21.666	8.000	22.067	21.647	7.999	0.000	-0.000	0.000	0.000	-3	-19	-1	19
159	22.149	-8.825	7.891	22.229	-8.755	7.736	0.000	-0.000	-0.000	0.000	80	71	-154	188
160	22.162	-5.911	13.962	22.270	-5.898	13.745	0.000	0.000	0.000	0.000	108	14	-216	242
161	22.280	4.570	13.998	22.377	4.569	13.811	0.000	0.000	-0.000	0.000	97	-1	-187	211
163	22.326	4.510	7.817	22.350	4.525	7.692	0.000	0.000	0.000	0.000	24	14	-125	128
164	22.574	-23.938	0.000	22.574	-23.938	0.000	-0.002	-0.009	-7.906	7.906	0	0	0	0
165	22.574	-23.938	8.000	22.576	-23.928	8.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2	10	-0	10
171	23.240	20.712	2.957	23.247	20.768	2.981	-0.000	-0.000	0.000	0.000	8	55	24	61
185	24.768	-20.195	-0.082	24.768	-20.195	-0.082	9.561	-1.912	-3.975	10.530	0	0	0	0
199	26.588	-9.160	14.502	26.679	-9.109	14.236	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	91	52	-267	286
200	26.593	-9.166	7.809	26.627	-9.158	7.610	0.000	0.000	0.000	0.000	33	8	-199	202
203	26.753	7.669	7.918	26.761	7.710	7.766	-0.000	-0.000	0.000	0.000	7	42	-152	157
204	26.801	7.655	14.476	26.886	7.606	14.257	-0.000	0.000	-0.000	0.000	86	-48	-219	240
220	28.827	20.944	8.890	28.839	21.001	8.853	0.000	-0.000	-0.000	0.000	12	56	-37	69
222	29.240	-18.477	10.911	29.254	-18.437	10.831	0.000	0.000	-0.000	0.000	14	40	-80	91
224	29.418	-0.781	15.882	29.490	-0.780	15.828	-0.000	0.000	-0.000	0.000	72	1	-54	90
225	29.428	-0.835	6.498	29.451	-0.804	6.444	0.000	-0.000	0.000	0.000	23	30	-54	66
227	29.646	16.961	10.870	29.647	16.954	10.879	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	1	-7	9	12
229	30.084	-22.478	8.919	30.083	-22.493	8.900	-0.000	0.000	-0.000	0.000	-0	-15	-19	24
243	32.081	-9.325	7.824	32.115	-9.321	7.685	-0.000	0.000	0.000	0.000	34	4	-139	143
244	32.084	-9.241	14.520	32.125	-9.156	14.313	-0.000	0.000	-0.000	0.000	41	84	-208	228
246	32.264	7.642	14.490	32.302	7.593	14.376	0.000	-0.000	0.000	0.000	38	-49	-115	130
249	32.309	7.580	7.829	32.318	7.592	7.781	-0.000	0.000	-0.000	0.000	9	12	-48	51
265	34.122	18.669	-0.082	34.122	18.669	-0.082	12.213	1.146	-6.551	13.906	0	0	0	0
278	35.660	-22.257	2.961	35.659	-22.395	2.936	0.000	0.000	0.000	0.000	-1	-138	-25	140
282	36.163	-23.349	0.000	36.163	-23.349	0.000	-0.001	-0.003	-4.087	4.087	0	0	0	0
283	36.163	-23.349	8.000	36.165	-23.343	8.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2	6	-0	7
284	36.534	-6.066	14.505	36.565	-6.042	14.380	0.000	-0.000	-0.000	0.000	31	24	-125	131
285	36.550	-6.134	7.774	36.571	-6.109	7.717	-0.000	0.000	0.000	0.000	21	25	-57	66
287	36.626	22.003	0.000	36.626	22.003	0.000	-0.005	0.014	-8.619	8.619	0	0	0	0
288	36.626	22.003	8.000	36.630	21.989	7.999	0.000	-0.000	0.000	0.000	5	-14	-1	14
289	36.663	4.360	14.471	36.685	4.358	14.373	0.000	-0.000	-0.000	0.000	22	-2	-98	100
290	36.688	4.356	7.825	36.698	4.366	7.794	0.000	-0.000	-0.000	0.000	10	10	-31	34
292	37.031	20.292	2.978	37.123	20.382	3.012	-0.000	-0.000	0.000	0.000	92	91	34	134
293	37.082	-19.233	-0.082	37.082	-19.233	-0.082	5.732	3.022	-2.143	6.825	0	0	0	0
304	38.309	-0.855	14.496	38.244	-0.842	14.315	-0.000	0.000	0.000	0.000	-65	13	-181	193
306	38.318	-0.867	7.835	38.361	-0.848	7.722	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	42	19	-113	122
316	39.701	-15.219	10.894	39.714	-15.197	10.844	0.000	0.000	-0.000	0.000	13	22	-50	56
320	40.020	13.451	10.895	40.017	13.457	10.892	-0.000	0.000	-0.000	0.000	-3	6	-3	7
332	41.680	17.156	8.906	41.766	17.216	8.864	0.000	-0.000	-0.000	0.000	86	60	-41	113
343	42.726	-17.958	8.925	42.766	-18.087	8.872	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	40	-128	-54	145
360	44.653	12.210	-0.083	44.653	12.210	-0.083	-0.989	1.071	-2.410	2.817	0	0	0	0
373	46.230	-6.405	10.905	46.240	-6.384	10.879	0.000	0.000	-0.000	0.000	11	20	-26	35
375	46.353	4.503	10.906	46.359	4.521	10.891	-0.000	0.000	-0.000	0.000	6	18	-15	24
377	46.480	-11.216	-0.082	46.480	-11.216	-0.082	0.534	-0.323	-2.408	2.488	0	0	0	0
385	47.119	-14.495	2.984	47.194	-14.614	2.969	0.000	0.000	0.000	0.000	75	-120	-14	142
399	47.982	11.814	2.991	48.096	11.838	3.001	-0.000	0.000	0.000	0.000	114	24	11	117
409	48.616	-15.229	0.000	48.616	-15.229	0.000	0.012	-0.003	-8.367	8.367	0	0	0	0
410	48.616	-15.229	8.000	48.604	-15.226	7.999	-0.000	-0.000	0.000	0.000	-11	3	-1	12
411	48.658	12.663	0.000	48.658	12.663	0.000	0.002	0.007	-5.871	5.871	0	0	0	0
412	48.658	12.663	8.000	48.656	12.653	8.000	0.000	-0.000	0.000	0.000	-2	-10	-0	10
423	49.349	0.778	-0.082	49.349	0.778	-0.082	0.316	7.428	-2.498	7.843	0	0	0	0
432	49.919	6.557	8.913	50.024	6.560	8.862	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	105	3	-51	117
434	50.301	-6.873	8.921	50.408	-6.949	8.864	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	107	-76	-57	143
441	51.818	-1.486	2.983	51.933	-1.532	2.978	-0.000	0.000	0.000	0.000	115	-46	-5	124
442	53.622	0.000	0.000	53.622	0.000	0.000	0.005	0.011	-7.179	7.179	0	0	0	0
443	53.622	0.000	8.000	53.617	-0.012	8.000	-0.000	-0.000	0.000	0.000	-6	-12	-0	13
Total							78.717	0.028	-29.696	411.021				

Tabla 8a. Caso 5a.

5. CUADRO RESUMEN (CASO 5b)

ESTRUCTURA CON MEMBRANA (ELEMENTOS), CON TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS
 DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE VIENTO 170 km/h. - COEFICIENTE DE PRESIÓN DE TÚNEL DE VIENTO

Barra	Nudo-1	Nudo-2	Longitud m	Sección cm ²	Axial T	dL mm	Tensión kg/cm ²	Ratio	Carga (T)		Reacción (T)		desplazamiento mm		
									Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	
2	316	441	20.00	122.522	-25.400	-2.0	-205.557	0.14	0.666	1.134	0	0	69	220	
3	373	399	20.00	122.522	-21.704	-1.7	-120.654	0.08	0.460	1.026	0	0	80	193	
4	375	292	20.00	122.522	-25.070	-1.9	-197.755	0.14	0.400	1.051	0	0	86	148	
5	227	62	20.00	122.522	-22.235	-1.7	-132.613	0.09	0.684	1.195	0	0	73	201	
6	130	7	20.00	122.522	-26.289	-2.0	-225.460	0.16	0.600	1.235	0	0	51	349	
7	75	50	20.00	122.522	-28.746	-2.2	-281.475	0.20	0.641	1.171	0	0	54	252	
8	73	155	20.00	122.522	-25.849	-2.0	-215.359	0.15	0.664	1.128	0	0	60	164	
1088	127	278	20.00	122.522	-20.232	-1.6	-96.950	0.07	0.549	1.205	0	0	67	112	
1089	222	385	20.00	122.522	-26.400	-2.1	-241.647	0.17	0.599	1.236	0	0	80	155	
1224	320	171	20.00	122.522	-19.474	-1.5	-79.382	0.06	0.542	1.186	0	0	109	182	
9	89	229	20.00	122.522	-22.687	-1.8	-154.590	0.11	1.063	1.048	9.568	0	0	0	159
10	185	343	20.00	122.522	-16.012	-1.3	1.866	0.00	1.128	1.027	8.326	0	0	0	116
11	293	434	20.00	122.522	-27.103	-2.1	-257.260	0.18	1.205	0.977	4.630	0	0	0	155
12	377	432	20.00	122.522	-21.279	-1.7	-120.452	0.08	1.015	1.080	14.594	0	0	0	216
13	423	332	20.00	122.522	-27.422	-2.2	-264.470	0.19	1.045	1.174	7.855	0	0	0	221
14	360	220	20.00	122.522	-29.520	-2.3	-313.634	0.22	1.076	1.183	7.576	0	0	0	135
15	265	105	20.00	122.522	0.211	0.1	102.583	0.07	1.216	0.965	6.389	0	0	0	214
16	154	14	20.00	122.522	-0.698	-67.5	-389.574	0.27	1.105	0.963	21.904	0	0	0	214
17	71	16	20.00	122.522	-0.435	-67.1	-237.472	0.17	1.014	1.047	6.750	0	0	0	269
995	23	117	20.00	122.522	-0.568	-67.1	-313.113	0.22	1.094	1.051	2.707	0	0	0	252
18	224	225	9.00	16.493	-0.140	-60.8	-60.723	0.04	1.459	0.211	0	0	54	54	
19	284	285	6.50	10.807	-0.873	-66.6	-473.531	0.33	1.430	0.164	0	0	185	109	
20	244	243	6.50	10.807	-0.157	-61.9	-72.616	0.05	0.768	0.133	0	0	294	193	
21	199	200	6.50	10.807	-0.239	-65.7	-123.857	0.09	1.183	0.164	0	0	208	153	
22	160	159	6.50	10.807	-0.293	-66.7	-159.590	0.11	0.489	0.131	0	0	88	155	
23	144	142	6.50	10.807	-0.338	-66.6	-184.352	0.13	0.874	0.163	0	0	238	179	
24	161	163	6.50	10.807	-0.714	-66.8	-390.589	0.27	0.477	0.131	0	0	38	72	
25	204	203	6.50	10.807	-16.993	-1.3	-21.146	0.01	1.207	0.163	0	0	273	204	
26	246	249	6.50	10.807	-31.061	-2.4	-335.645	0.24	0.770	0.134	0	0	273	185	
27	289	290	6.50	10.807	-30.225	-2.3	-316.240	0.22	1.435	0.163	0	0	159	92	
28	304	306	6.50	10.807	-26.711	-2.1	-235.180	0.17	0.722	0.133	0	0	216	132	
1227	5	6	8.00	60.821	-19.959	-1.3	-490.082	0.34	0.191	0.368	20.150	0	0	0	24
1228	47	48	8.00	60.821	-23.346	-1.5	-573.289	0.40	0.191	0.372	23.537	0	0	0	23
1229	157	158	8.00	60.821	-15.300	-1.0	-375.693	0.26	0.191	0.370	15.491	0	0	0	26
1230	287	288	8.00	60.821	-16.586	-1.0	-407.275	0.29	0.191	0.372	16.777	0	0	0	20
1231	411	412	8.00	60.821	-19.908	-1.2	-488.828	0.34	0.191	0.368	20.099	0	0	0	23
1232	164	165	8.00	60.821	-15.814	-1.0	-388.274	0.27	0.191	0.374	16.005	0	0	0	31
1233	282	283	8.00	60.821	-14.754	-0.9	-362.295	0.25	0.191	0.369	14.945	0	0	0	19
1234	409	410	8.00	60.821	-19.108	-1.2	-469.211	0.33	0.191	0.373	19.299	0	0	0	20
1235	442	443	8.00	60.821	-20.855	-1.3	-512.110	0.36	0.191	0.374	21.046	0	0	0	21
1236	41	42	8.00	60.821	-16.650	-1.0	-408.831	0.29	0.191	0.368	16.841	0	0	0	29

OBSERVACIONES:													promedio desplaz.	
Nudos de los apoyos - barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento = 0													0	
Nudos de las barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 198 mm.													195	
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 198 mm.													198	
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity, se unen con el domo superior - desplazamiento promedio = 73 mm.													73	
MAYORES DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS DE LAS BARRAS DEL ANILLO TENSEGRITY QUE SE ENCUENTRAN EN EL CENTRO QUE NO TIENEN NI APOYO, NI UNIÓN CON EL DOMO SUPERIOR														
Nudo superior del mástil central del domo tensegrity- desplazamiento = 54 mm.													54	
Nudo inferior del mástil central - desplazamiento = 54mm.													54	
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 217 mm.													217	
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 147 mm.													147	
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 182 mm.													182	
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 147 mm.													147	
Nudos inferiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 0													0	
Nudos superiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 24 mm.													24	
MAYORES DESPLAZAMIENTOS DEL DOMO CENTRAL EN LOS NUDOS SUPERIORES DE LOS MÁSTILES MENORES.														
MAYORES REACCIONES EN LOS NUDOS FIJOS DEL ANILLO 21.904 ton														
MAYORES REACCIONES EN LOS TUBOS EXTERIORES 23.537 ton														
MAYORES REACCIONES EN LOS CABLES EXTERIORES (VIENTOS) 21.186 ton									EL PESO DE LA ESTRUCTURA AUMENTA EN 296 kg.				CON RESPECTO AL CÁLCULO ANTE EL PROPIO PESO (CASO 4)	

Tabla 9. Caso 5b.

5. CUADRO RESUMEN (CASO 5b)

ESTRUCTURA CON MEMBRANA (ELEMENTOS), CON TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS
 DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE VIENTO 170 km/h. - COEFICIENTE DE PRESIÓN DE TÚNEL DE VIENTO

NUDOS	NUDOS INICIALES			NUDOS FINALES			REACCIONES				DESPLAZAMIENTOS			
	No.	xlni(m)	ylni(m)	zlni(m)	Xf(m)	Yf(m)	Zf(m)	Rx(T)	Ry(T)	Rz(T)	RT(T)	dx/mm	dy/mm	dz/mm
5	6.083	0.000	0.000	6.083	0.000	0.000	-0.072	0.023	-20.150	20.150	0.	0.	0.	0.
6	6.083	0.000	8.000	6.112	-0.009	7.999	0.000	0.000	0.000	0.000	21.	11.	-1.	24.
7	7.078	-0.047	2.964	7.159	-0.094	2.974	0.000	0.000	0.000	0.000	-301.	166.	60.	349.
14	8.494	5.372	8.808	8.512	5.350	8.799	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	-158.	107.	-98.	214.
16	8.901	-8.091	8.848	8.919	-8.114	8.804	0.000	-0.000	0.000	0.000	-235.	-13.	-130.	269.
23	9.519	-2.320	-0.082	9.519	-2.320	-0.082	-0.202	0.050	2.699	2.707	0.	0.	0.	0.
41	10.542	-14.598	0.000	10.542	-14.598	0.000	-0.045	-0.024	-16.840	16.841	0.	0.	0.	0.
42	10.542	-14.598	8.000	10.564	-14.587	7.999	0.000	-0.000	-0.000	0.000	5.	29.	-1.	29.
47	10.837	14.262	0.000	10.837	14.262	0.000	-0.078	0.054	-23.537	23.537	0.	0.	0.	0.
48	10.837	14.262	8.000	10.864	14.243	7.998	-0.000	0.000	-0.000	0.000	17.	-16.	-1.	23.
50	10.910	-13.321	2.988	11.010	-13.316	2.979	-0.000	0.000	-0.000	0.000	-247.	-40.	31.	252.
62	11.756	12.990	2.997	11.754	13.000	3.030	0.000	0.000	0.000	0.000	-98.	174.	4.	200.
71	12.409	9.690	-0.082	12.409	9.690	-0.082	-2.772	4.987	-3.607	6.750	0.	0.	0.	0.
73	12.522	-6.074	10.876	12.554	-6.070	10.905	0.000	-0.000	-0.000	0.000	5.	-36.	-47.	60.
75	12.610	4.902	10.834	12.631	4.891	10.873	0.000	0.000	-0.000	0.000	-20.	-40.	-31.	54.
89	14.239	-13.735	-0.082	14.239	-13.735	-0.082	5.236	-7.890	-1.369	9.568	0.	0.	0.	0.
105	16.134	16.469	8.820	16.115	16.570	8.802	-0.000	-0.000	0.000	0.000	-59.	190.	-79.	214.
117	17.172	-18.717	8.931	17.193	-18.711	8.921	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	-193.	-134.	-90.	252.
127	18.864	-14.966	10.928	18.876	-14.960	10.968	-0.000	0.000	0.000	0.000	29.	1.	-61.	67.
130	19.151	13.702	10.837	19.169	13.690	10.878	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	-26.	-34.	-28.	51.
142	20.559	-0.665	7.846	20.527	-0.668	7.729	-0.000	0.000	0.000	0.000	-53.	-15.	-170.	179.
144	20.578	-0.645	14.482	20.682	-0.652	14.297	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	21.	-20.	-238.	239.
154	21.807	17.707	-0.082	21.807	17.707	-0.082	16.852	12.701	-5.870	21.904	0.	0.	0.	0.
155	21.842	-21.820	2.972	21.761	-21.890	3.021	0.000	0.000	0.000	0.000	-108.	-123.	-0.	164.
157	22.069	21.666	0.000	22.069	21.666	0.000	-0.024	0.036	-15.491	15.491	0.	0.	0.	0.
158	22.069	21.666	8.000	22.082	21.647	7.999	-0.000	0.000	0.000	0.000	3.	-26.	-1.	26.
159	22.149	-5.825	7.891	22.209	-5.791	8.064	0.000	-0.000	0.000	0.000	61.	33.	139.	155.
160	22.162	-5.911	13.962	22.171	-5.925	14.073	0.000	-0.000	-0.000	0.000	-34.	-19.	76.	86.
161	22.280	4.570	13.998	22.302	4.560	14.048	0.000	0.000	-0.000	0.000	-26.	-29.	-2.	39.
163	22.326	4.510	7.817	22.362	4.480	7.930	-0.000	0.000	0.000	0.000	10.	-40.	60.	73.
164	22.574	-23.938	0.000	22.574	-23.938	0.000	-0.035	-0.038	-16.005	16.005	0.	0.	0.	0.
165	22.574	-23.938	8.000	22.592	-23.919	7.999	0.000	-0.000	0.000	0.000	-19.	25.	-1.	31.
171	23.240	20.712	2.957	23.289	20.892	3.049	-0.000	0.000	-0.000	0.000	17.	179.	-25.	182.
185	24.768	-20.195	-0.082	24.768	-20.195	-0.082	7.407	-3.789	-0.336	8.326	0.	0.	0.	0.
199	26.588	-9.160	14.502	26.622	-9.102	14.370	0.000	-0.000	-0.000	0.000	-1.	60.	-220.	228.
200	26.593	-9.166	7.809	26.593	-9.198	7.745	0.000	0.000	0.000	0.000	9.	-18.	-152.	153.
203	26.753	7.669	7.918	26.751	7.692	7.832	0.000	0.000	0.000	0.000	-40.	28.	-198.	204.
204	26.801	7.655	14.476	26.830	7.588	14.323	0.000	0.000	-0.000	0.000	-25.	-67.	-265.	275.
220	28.827	20.944	8.890	28.857	21.022	8.861	0.000	-0.000	-0.000	0.000	27.	114.	-67.	135.
222	29.240	-18.477	10.911	29.249	-18.465	10.969	0.000	0.000	-0.000	0.000	7.	36.	-71.	80.
224	29.418	-0.781	15.882	29.442	-0.782	15.982	0.000	-0.000	-0.000	0.000	-31.	9.	-43.	54.
225	29.428	-0.835	6.498	29.408	-0.836	6.599	0.000	-0.000	0.000	0.000	-33.	6.	-43.	54.
227	29.646	16.961	10.870	29.645	16.944	10.910	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	-29.	-17.	-65.	73.
229	30.084	-22.478	8.919	30.063	-22.530	8.902	0.000	-0.000	0.000	0.000	-43.	-139.	-65.	159.
243	32.081	-9.325	7.824	32.082	-9.332	7.814	0.000	0.000	0.000	0.000	12.	-6.	-193.	193.
244	32.084	-9.241	14.520	32.067	-9.164	14.442	-0.001	0.000	-0.000	0.001	-39.	125.	-263.	294.
246	32.264	7.642	14.490	32.241	7.560	14.390	0.000	-0.000	-0.000	0.000	-62.	-96.	-248.	273.
249	32.309	7.580	7.829	32.308	7.586	7.795	0.000	-0.000	0.000	0.000	-37.	14.	-181.	185.
265	34.122	18.669	-0.082	34.122	18.669	-0.082	-5.198	2.086	3.075	6.389	0.	0.	0.	0.
278	35.660	-22.257	2.961	35.613	-22.438	3.057	0.000	-0.000	-0.000	0.000	-3.	-110.	-18.	112.
282	36.163	-23.349	0.000	36.163	-23.349	0.000	0.013	-0.037	-14.945	14.945	0.	0.	0.	0.
283	36.163	-23.349	8.000	36.156	-23.329	7.999	-0.000	0.000	0.000	0.000	-10.	15.	-1.	19.
284	36.534	-6.066	14.505	36.501	-6.042	14.444	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	-35.	51.	-175.	185.
285	36.550	-6.134	7.774	36.547	-6.134	7.782	-0.001	0.000	0.000	0.001	-6.	23.	-106.	109.
287	36.626	22.003	0.000	36.626	22.003	0.000	0.013	0.048	-16.777	16.777	0.	0.	0.	0.
288	36.626	22.003	8.000	36.619	21.980	7.999	0.000	0.000	-0.000	0.000	4.	-20.	-1.	20.
289	36.663	4.360	14.471	36.630	4.338	14.405	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	-46.	-7.	-152.	159.
290	36.688	4.356	7.825	36.680	4.352	7.826	-0.000	0.000	0.000	0.000	-32.	17.	-85.	92.
292	37.031	20.292	2.978	37.184	20.413	3.077	0.000	-0.000	0.000	0.000	85.	115.	-38.	148.
293	37.082	-19.233	-0.082	37.082	-19.233	-0.082	3.907	0.678	2.390	4.630	0.	0.	0.	0.
304	38.309	-0.855	14.496	38.211	-0.853	14.386	0.000	-0.000	0.000	0.000	-84.	24.	-197.	216.
306	38.318	-0.867	7.835	38.323	-0.868	7.792	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	-4.	24.	-130.	132.
316	39.701	-15.219	10.894	39.691	-15.209	10.943	-0.000	0.000	-0.000	0.000	-7.	39.	-57.	69.
320	40.020	13.451	10.895	40.003	13.436	10.942	0.000	-0.000	0.000	0.000	-40.	-25.	-99.	109.
332	41.680	17.156	8.906	41.716	17.175	8.899	-0.000	0.000	0.000	0.000	157.	122.	-95.	221.
343	42.726	-17.958	8.925	42.746	-18.060	8.904	0.000	0.000	0.000	0.000	84.	-167.	15.	188.
360	44.653	12.210	-0.083	44.653	12.210	-0.083	-2.236	6.454	-3.278	7.576	31.	-105.	-39.	116.
373	46.230	-6.405	10.905	46.201	-6.400	10.943	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.	0.	0.	0.
375	46.353	4.503	10.906	46.332	4.497	10.947	-0.000	0.000	-0.000	0.000	-15.	40.	-67.	80.
377	46.480	-11.216	-0.082	46.480	-11.216	-0.082	-4.033	-12.998	-5.270	14.594	-31.	33.	-73.	86.
385	47.119	-14.495	2.984	47.163	-14.613	3.062	-0.000	-0.000	0.000	0.000	0.	0.	0.	0.
399	47.982	11.814	2.991	48.042	11.813	3.041	-0.000	-0.000	0.000	0.000	74.	-136.	2.	155.
409	48.616	-15.229	0.000	48.616	-15.229	0.000	0.060	-0.027	-19.299	19.299	189.	41.	-9.	193.
410	48.616	-15.229	8.000	48.591	-15.218	7.999	0.000	-0.000	-0.000	0.000	0.	0.	0.	0.
411	48.658	12.663	0.000	48.658	12.663	0.000	0.065	0.036	-20.098	20.099	-16.	12.	-1.	20.
412	48.658	12.663	8.000	48.632	12.649	7.999	0.000	0.000	-0.000	0.000	0.	0.	0.	0.
423	49.349	0.778	-0.082	49.349	0.778	-0.082	1.039	7.515	2.038	7.855	-5.	-22.	-1.	23.
432	49.919	6.557	8.913	49.898	6.561	8.909	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.	0.	0.	0.
434	50.301	-6.873	8.921	50.322	-6.899	8.924	-0.000	-0.000	0.000	0.000	195.	4.	-92.	216.
441	51.818	-1.486	2.983	51.803	-1.480	3.021	0.000	0.000	0.000	0.000	115.	-83.	-63.	155.
442	53.622	0.000	0.000	53.622	0.000	0.000	0.078	0.005	-21.046	21.046	0.	0.	0.	0.
443	53.622	0.000	8.000	53.592	-0.002	7.999	0.000	-0.000	0.000	0.000	-20.	-6.	-1.	21.
Total							26.004	0.147	34.610	561.983				

Tabla 9a. Caso 5b.

</

5. CUADRO RESUMEN (CASO 5b)

ESTRUCTURA CON MEMBRANA (ELEMENTOS), CON TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS

DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE VIENTO 170 km/h. - COEFICIENTE DE PRESIÓN DE TÚNEL DE VIENTO

NUDOS	CARGAS TOTALES								CARGAS DE VIENTO									
	Ax(m²)	Ay(m²)	Az(m²)	At(m²)	Ptx(T)	Pty(T)	Ptz(T)	Ptt(T)	kg/m²	Ax(m²)	Ay(m²)	Az(m²)	At(m²)	Wx(T)	Wy(T)	Wz(T)	Wt(T)	kg/m²
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.191	0.191	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.368	0.368	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	-34.914	0.3496	-21.405	71.280	0.196	-0.175	-1.207	1.235	173.2	-34.914	0.3496	-21.405	71.280	0.196	-0.175	-0.212	0.338	47.4
14	-39.537	11.843	0.6773	77.798	0.239	-0.214	-0.908	0.963	123.8	-39.537	11.843	0.6773	77.798	0.239	-0.214	0.151	0.355	45.6
16	-38.442	-13.479	0.7695	78.008	0.422	0.001	-0.959	1.047	134.3	-38.442	-13.479	0.7695	78.008	0.422	0.001	0.101	0.434	55.6
23	-66.993	0.2563	-0.3484	69.318	0.450	-0.020	-0.997	1.094	157.8	-66.993	0.2563	-0.3484	69.318	0.450	-0.020	0.019	0.451	65.0
41	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.191	0.191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
42	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.368	0.368	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
47	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.191	0.191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.372	0.372	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50	-26.996	-17.574	-21.072	70.885	0.328	-0.025	-1.124	1.171	165.2	-26.996	-17.574	-21.072	70.885	0.328	-0.025	-0.130	0.354	49.9
62	-25.918	21.748	-21.278	72.809	-0.094	0.028	-1.191	1.195	164.1	-25.918	21.748	-21.278	72.809	-0.094	0.028	-0.195	0.218	30.0
71	-52.464	41.502	-0.3724	69.907	0.155	-0.103	-0.996	1.074	145.0	-52.464	41.502	-0.3724	69.907	0.155	-0.103	0.019	0.187	26.7
73	-70.052	-17.817	115.325	147.308	-0.015	-0.069	-0.680	0.664	45.1	-70.052	-17.817	115.325	147.308	-0.015	-0.069	0.513	0.518	35.1
75	-64.767	30.285	114.139	145.632	-0.116	0.044	-0.629	0.641	44.0	-64.767	30.285	114.139	145.632	-0.116	0.044	0.544	0.558	38.3
89	-56.173	-37.727	-0.4289	70.720	0.216	0.107	-1.035	1.065	150.3	-56.173	-37.727	-0.4289	70.720	0.216	0.107	-0.019	0.242	34.2
105	-24.446	32.097	0.7314	77.563	-0.109	0.100	-0.954	0.985	124.5	-24.446	32.097	0.7314	77.563	-0.109	0.100	0.099	0.178	23.0
117	-24.129	-33.399	0.7708	77.951	0.122	0.074	-1.041	1.051	134.8	-24.129	-33.399	0.7708	77.951	0.122	0.074	0.020	0.144	18.5
127	-48.604	-51.264	114.316	145.174	-0.126	-0.192	-0.498	0.549	37.8	-48.604	-51.264	114.316	145.174	-0.126	-0.192	0.678	0.716	49.3
130	-39.091	60.649	115.121	146.858	-0.214	0.354	-0.435	0.600	40.9	-39.091	60.649	115.121	146.858	-0.214	0.354	0.735	0.844	57.4
142	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.163	0.163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
144	-46.111	0.1175	150.213	159.840	-0.260	0.008	-0.835	0.874	54.7	-46.111	0.1175	150.213	159.840	-0.260	0.008	0.908	0.945	59.1
154	-18.841	64.605	-0.4154	70.278	-0.091	0.414	-1.021	1.105	157.3	-18.841	64.605	-0.4154	70.278	-0.091	0.414	-0.004	0.424	60.4
155	-11.939	-30.558	-21.223	71.624	0.141	0.014	-1.119	1.128	157.5	-11.939	-30.558	-21.223	71.624	0.141	0.014	-0.124	0.188	26.2
157	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.191	0.191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
158	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.370	0.370	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
159	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.131	0.131	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
160	-25.995	-18.454	89.335	94.942	-0.158	-0.113	0.449	0.469	51.5	-25.995	-18.454	89.335	94.942	-0.158	-0.113	0.548	0.582	61.3
161	-25.904	18.764	87.717	93.610	-0.155	0.113	0.437	0.477	50.9	-25.904	18.764	87.717	93.610	-0.155	0.113	0.536	0.570	60.9
163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.131	0.131	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
164	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.191	0.191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
165	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.374	0.374	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
171	-0.8144	32.212	-20.972	71.841	-0.005	0.363	-1.129	1.166	165.0	-0.8144	32.212	-20.972	71.841	-0.005	0.363	-0.133	0.387	53.9
185	-22.900	-63.500	-0.4078	70.648	-0.090	-0.353	-1.068	1.128	159.7	-22.900	-63.500	-0.4078	70.648	-0.090	-0.353	-0.051	0.367	52.0
199	-16.636	-43.324	150.286	159.888	-0.102	-0.353	-1.124	1.183	74.0	-16.636	-43.324	150.286	159.888	-0.102	-0.353	1.198	1.253	78.4
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.164	0.164	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
203	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.163	0.163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
204	-15.893	43.846	151.781	161.311	-0.098	0.360	-1.148	1.207	74.8	-15.893	43.846	151.781	161.311	-0.098	0.360	1.221	1.277	79.1
220	0.0051	42.323	0.8496	79.163	0.079	0.497	-1.071	1.163	149.5	0.0051	42.323	0.8496	79.163	0.079	0.497	-0.014	0.503	63.5
222	-0.4213	-70.668	114.026	145.066	-0.005	-0.584	-0.136	0.599	41.3	-0.4213	-70.668	114.026	145.066	-0.005	-0.584	1.037	1.190	82.0
224	-0.0265	0.0194	175.579	179.117	0.030	0.002	1.458	1.459	81.4	-0.0265	0.0194	175.579	179.117	0.030	0.002	1.569	1.570	87.6
225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.211	0.211	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
227	0.8160	71.484	113.919	145.929	0.095	0.666	-0.124	0.684	46.9	0.8160	71.484	113.919	145.929	0.095	0.666	1.051	1.248	85.5
229	0.0216	-41.212	0.7602	77.793	0.017	-0.281	-1.009	1.048	134.7	0.0216	-41.212	0.7602	77.793	0.017	-0.281	0.047	0.285	36.7
243	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.133	0.133	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
244	10.177	-32.686	86.863	95.882	0.097	-0.299	0.701	0.768	80.1	10.177	-32.686	86.863	95.882	0.097	-0.299	0.803	0.863	90.0
246	10.688	31.810	86.721	95.340	0.101	0.294	0.705	0.770	80.8	10.688	31.810	86.721	95.340	0.101	0.294	0.807	0.865	90.7
249	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.134	0.134	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
265	22.637	62.293	-0.4478	69.386	0.184	0.557	-1.065	1.216	175.2	22.637	62.293	-0.4478	69.386	0.184	0.557	-0.050	0.589	84.9
278	0.7929	-30.579	-21.486	71.596	0.068	-0.240	-1.179	1.205	168.3	0.7929	-30.579	-21.486	71.596	0.068	-0.240	-0.182	0.309	43.2
282	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.191	0.191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
283	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.369	0.369	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
284	37.668	-28.345	150.630	160.318	0.347	-0.272	1.360	1.430	89.2	37.668	-28.345	150.630	160.318	0.347	-0.272	1.434	1.501	93.6
285	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.164	0.164	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
287	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.191	0.191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
288	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.372	0.372	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
289	37.559	27.098	150.609	159.914	0.348	0.261	1.368	1.435	89.7	37.559	27.098	150.609	159.914	0.348	0.261	1.441	1.505	94.1
290	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.163	0.163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
292	12.246	30.442	-20.835	71.629	0.131	0.193	-1.024	1.051	146.7	12.246	30.442	-20.835	7					

B. CUADRO RESUMEN (CASO 6)

ESTRUCTURA CON MEMBRANA (ELEMENTOS), CON TUBOS EXTERIORES Y VIENTOS
DATOS FINALES DEL CÁLCULO ANTE NIEVE 50 kg/m² Y VIENTO 15 km/h.

Barra	Nudo-1	Nudo-2	Longitud m	Sección cm ²	Axial T	dL mm	Tensión kg/cm ²	Ratio	Carga (T)		Reacción (T)		desplazamiento mm	
									Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2	Nudo-1	Nudo-2
2	316	441	20.00	138.230	-63.664	-4.4	-724	0.74	1.953	1.048	0	0	255	123
3	373	399	20.00	138.230	-64.176	-4.4	-732	0.74	1.953	1.048	0	0	270	123
4	375	292	20.00	138.230	-62.395	-4.3	-704	0.73	1.952	1.052	0	0	272	143
5	227	62	20.00	138.230	-63.602	-4.3	-722	0.74	1.957	1.045	0	0	285	154
6	130	7	20.00	138.230	-58.993	-4.1	-644	0.69	1.965	1.048	0	0	310	156
7	75	50	20.00	138.230	-65.543	-4.4	-260	0.75	1.963	1.049	0	0	295	124
8	73	155	20.00	138.230	-63.011	-4.3	-712	0.72	1.970	1.050	0	0	289	116
1088	127	278	20.00	138.230	-61.201	-4.4	-704	0.75	1.966	1.050	0	0	248	129
1089	222	385	20.00	138.230	-62.808	-4.4	-732	0.75	1.956	1.051	0	0	271	119
1224	320	171	20.00	138.230	-60.934	-4.2	-700	0.71	1.953	1.049	0	0	299	142
9	89	229	20.00	138.230	-62.715	-4.2	-730	0.72	1.158	1.247	19.317	0	0	120
10	185	343	20.00	138.230	-61.361	-4.3	-706	0.73	1.160	1.250	19.354	0	0	89
11	293	434	20.00	138.230	-60.277	-4.4	-687	0.76	1.160	1.254	18.266	0	0	106
12	377	432	20.00	138.230	-63.150	-4.3	-735	0.74	1.161	1.248	20.760	0	0	100
13	423	332	20.00	138.230	-62.826	-4.4	-731	0.76	1.157	1.251	18.413	0	0	119
14	360	220	20.00	138.230	-62.308	-4.3	-722	0.74	1.161	1.254	18.259	0	0	109
15	265	105	20.00	138.230	-6.917	-4.3	-570	0.73	1.156	1.243	20.107	0	0	148
16	154	14	20.00	138.230	-4.909	-4.4	-1.245	0.76	1.158	1.245	20.040	0	0	99
17	71	16	20.00	138.230	-2.471	-4.4	-613	0.76	1.160	1.250	18.978	0	0	116
995	23	117	20.00	138.230	-4.966	-4.3	-1.247	0.73	1.161	1.251	22.134	0	0	83
18	224	225	9.00	30.631	-2.095	-1.0	-439	0.40	1.119	0.317	0	0	690	689
19	284	285	6.50	16.493	-5.245	-68.3	-1.296	0.89	0.907	0.227	0	0	680	585
20	244	243	6.50	16.493	-2.123	-67.5	-460	0.45	0.610	0.185	0	0	767	649
21	199	200	6.50	16.493	-4.794	-67.9	-1.158	0.88	0.914	0.227	0	0	700	622
22	160	159	6.50	16.493	-2.519	-61.1	-622	0.32	0.622	0.181	0	0	702	630
23	144	142	6.50	16.493	-4.739	-67.4	-1.175	0.93	0.918	0.226	0	0	734	675
24	161	163	6.50	16.493	-2.432	-62.2	-599	0.33	0.614	0.182	0	0	716	628
25	204	203	6.50	16.493	-63.775	-66.5	-748	0.83	0.921	0.226	0	0	815	735
26	246	249	6.50	16.493	-64.403	-67.1	-737	0.45	0.609	0.186	0	0	809	687
27	289	290	6.50	16.493	-60.956	-67.4	-679	0.84	0.906	0.226	0	0	716	638
28	304	306	6.50	16.493	-61.479	-67.1	-687	0.44	0.612	0.186	0	0	800	686
1227	5	6	8.00	60.821	-13.662	-0.8	-335	0.23	0.191	0.331	13.445	0	0	27
1228	47	48	8.00	60.821	-13.149	-0.8	-322	0.23	0.191	0.334	13.720	0	0	24
1229	157	158	8.00	60.821	-11.717	-0.7	-287	0.20	0.191	0.332	11.638	0	0	25
1230	287	288	8.00	60.821	-11.927	-0.8	-292	0.21	0.191	0.334	12.208	0	0	22
1231	411	412	8.00	60.821	-9.854	-0.6	-241	0.17	0.191	0.331	9.940	0	0	20
1232	164	165	8.00	60.821	-10.804	-0.7	-265	0.19	0.191	0.336	11.191	0	0	21
1233	282	283	8.00	60.821	-10.450	-0.7	-256	0.18	0.191	0.332	10.714	0	0	21
1234	409	410	8.00	60.821	-13.563	-0.9	-332	0.24	0.191	0.335	13.814	0	0	25
1235	442	443	8.00	60.821	-13.533	-0.8	-332	0.23	0.191	0.336	13.672	0	0	24
1236	41	42	8.00	60.821	-11.067	-0.7	-271	0.20	0.191	0.331	11.819	0	0	21

OBSERVACIONES:												promedio desplaz.	
Nudos de los apoyos - barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento = 0												0	
Nudos de las barras inferiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 109 mm.												109	
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity - desplazamiento promedio = 133 mm.												133	
Nudos de las barras superiores del anillo tensegrity, se unen con el domo superior - desplazamiento promedio = 277 mm.												277	
MAYORES DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS DE LAS BARRAS DEL ANILLO TENSEGRITY QUE SE UNEN CON EL DOMO SUPERIOR													
Nudo superior del mástil central del domo tensegrity- desplazamiento = 690 mm.												690	
Nudo inferior del mástil central - desplazamiento = 689mm.												689	
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 729 mm.												729	
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 5 cables - desplazamiento = 651 mm.												651	
Nudos superiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 759 mm.												759	
Nudos inferiores de los mástiles menores sujetos con 4 cables - desplazamiento = 656 mm.												656	
Nudos inferiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 0												0	
Nudos superiores de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos - desplazamiento = 23 mm.												23	
MAYORES DESPLAZAMIENTOS DEL DOMO CENTRAL EN LOS NUDOS SUPERIORES E INFERIORES DEL MÁSTIL CENTRAL Y MÁSTILES MENORES, DEBIDO AL PESO DE LA NIEVE													
MAYORES REACCIONES EN LOS NUDOS FIJOS DEL ANILLO 22.134 ton													
MAYORES REACCIONES EN LOS TUBOS EXTERIORES 13.814 ton						EL PESO DE LA ESTRUCTURA AUMENTA EN 7866,77kg.							
MAYORES REACCIONES EN LOS CABLES EXTERIORES (VIENTOS) 16.582 ton						CON RESPECTO AL CASO 5b							

Tabla 10. Caso 6.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON EL PROGRAMA DE CÁLCULO WINTESS

Cálculo de la estructura ante cargas externas de viento y nieve

CASO 5a.

Viento de 170 km/h – Coeficiente de presión de Wintess.
Fig 152 a 157

El cálculo más importante para nuestro modelo de estudio es el que haremos con respecto al viento.

Estructura reforzada con cables, con tubos exteriores y cables exteriores (vientos).

En el análisis se tuvo en cuenta los coeficientes de presión dados por el programa de cálculo **WinTess**.

COEFICIENTE EÓLICO = PRESIÓN (-) SUCCIÓN (+)																		
0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
Ángulo entre la normal a la superficie y dirección del viento																		

Tabla 11. Coeficiente de presión.

Para los hallar los resultados se tuvo en cuenta datos estadísticos de pruebas de túnel de viento similares, Cp de otras investigaciones y libros (*Ejemplo: Arquitectura Textil - Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas, Eurocódigo y Construcciones neumáticas de Hertzog*). [27][29][30] Los cuales sirvieron de referencia para ver si nuestros resultados se ajustan a la realidad.

Características estructurales de los elementos del modelo

- **Membrana:** Ferrari Fluotop T2 1302 – Pretensado 0,3 % = 12 daN/5cm = 240 kg/m Resistencia Rk = 800/700 daN/5cm = 16000,0 kg/m – Coeficiente de seguridad (5)= Rd = Rk / 5 = 160 daN/5cm = 3200 kg/m.
- **Mástiles menores del domo:** L=6,5 m - Ø 110-5_S235 - Sección 16,493 cm² - Peso 121,5 kp= 1,215 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³

Con respecto al modelo anterior (carga: propio peso) lo que cambia es la membrana, se necesita que sea una de mayor resistencia por la carga de viento. Y también cambian los mástiles menores, producido por la carga horizontal del viento y los coeficientes de presión.

Datos generales de la estructura	
Volumen (entre membrana y plano Z=0)	15.626,49 m3
Superficie de la membrana	2.959,96 m2
Módulo de elasticidad de la membrana	80 T/m
Peso de las barras	57.012,98 kg
Peso de la membrana	4.143,94 kg
Peso total de la estructura	61.156,92 kg
Peso de la estructura por m2	51,95 kg

Tabla 12. Datos generales

ANÁLISIS DEL CUADRO RESUMEN 4.

La estructura permanece en equilibrio ante las cargas de viento de 170 km/h. Cargas $x = -78717$, $y = 0$, $z = 21116$ = reacciones $x = -78717$, $y = 0$, $z = 21116$ (Fig.156).

Cargas: Viento

El peso total de la estructura es de 61156 kg. aumenta en 296 kg. con respecto al caso anterior por el cambio de la membrana Ferrari 1203 a Ferrari 1302. Y 272,50 kg. por los mástiles menores de $\varnothing 90$ a $\varnothing 110$. En total aumentó 568.50 kg.

Viento 170 km/h

Las cargas totales de viento que se hallaron en el cálculo son del orden de 178,205 toneladas.

Refuerzo

Para responder a la carga de viento se reforzó el tipo de membrana, como se mencionó anteriormente.

Movimientos

El mayor desplazamiento es de = 242 mm en la barra 22 (nudos 150-160) que corresponde a uno de los mástiles menores del domo ($L = 6,5$ m - $\varnothing 90$ -4_S235). Este desplazamiento ocurre por la ubicación de la barra en el espacio, está sujeto por 4 cables superiores y cuatro inferiores y además porque recibe directamente la carga horizontal del viento.

El mayor desplazamiento del anillo principal de la estructura es de =197 mm en la barra 1088 (nudos 127-278) que corresponde a los tubos ($L = 20$ m - $\varnothing 400$ -10_S235). Este movimiento ocurre en el nudo superior de la barra del anillo, la que no tiene apoyo. El movimiento se produce por la carga horizontal del viento y la tensión de los cables exteriores (vientos) que ayudan a controlar que el desplazamiento no sea mayor. Estos desplazamientos no afectan el comportamiento de la estructura, la estructura llega al equilibrio con esta forma final (Fig.156).

En general los mayores desplazamientos se encuentran en la zona por donde se ha aplicado el viento que viene de manera horizontal. Los valores más o menos se mantienen igual con respecto al caso del túnel de viento (Caso 5b), lo único que varía más son los valores del mástil central, aumentan los desplazamientos de 54 mm a 90 mm producido por el peso de los mástiles menores, que tiran hacia abajo la estructura cuando entran en carga (viento de 170 km/h).

Reacciones

Las máximas reacciones en los nudos fijos de apoyo de la estructura son del orden de 29,903 toneladas, en los tubos exteriores 22,855 toneladas y en los cables de viento 34,39 toneladas (Fig.157). Han aumentado las reacciones con respecto al caso anterior debido a la carga de viento aplicada y el nuevo coeficiente de presión dado por el WinTess y vemos como actúan, como ayudan los tubos y cables exteriores.

En los tubos de la estructura el ratio promedio va entre 0,7 a 0,05 y en los cables el ratio promedio va entre 0,7 a 0,05 (Fig.157).

CASO 5b.

Viento de 170 km/h – Coeficiente de presión del túnel de viento.

Fig. 158 a 163

La estructura está reforzada con cables, con tubos exteriores y cables exteriores (vientos). En el análisis se tuvo en cuenta los coeficientes de presión hallados en el **túnel de viento**. (Ver Apéndice C - Túnel de Viento)

COEFICIENTE EÓLICO = PRESIÓN (-) SUCCIÓN (+)																		
0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°
-0.34	-0.29	-0.18	-0.12	0.19	0.51	0.55	0.64	0.77	0.65	0.52	0.39	0.27	-0.12	-0.17	-0.27	-0.43	-0.52	-0.72
Ángulo entre la normal a la superficie y dirección del viento																		

Tabla 13. Coeficiente de presión.

Para los hallar los resultados se tuvo en cuenta una estimación estadística en la medida de error del 15%, debido a las limitaciones del ensayo que son:

- El tamaño del túnel de 60x40x60cm.
- Y la dimensión del diámetro del modelo de 17cm. (Esc_1:250)

El **coeficiente de arrastre** teniendo en cuenta las limitaciones de la medida experimental es:

$$C_p \text{ global } \sim 0,301 :: C_p \text{ local } \sim 0,202$$

Por la forma aerodinámica y convexa del modelo, el viento en la parte frontal crea algunas presiones, lateralmente se desvía, pasando libremente y causando succiones, de igual forma en la parte superior del domo.

Características estructurales de los elementos del modelo

- **Mástiles menores del domo:** L=6,5 m - Ø 90-4_S235 - **Sección** 10,807 cm² - **Peso** 56,8 kp= 0,568 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³

Con respecto al modelo anterior lo que cambian son los mástiles menores de Ø 110 a 90Ø, debido a que el coeficiente de presión es menor que el que habíamos aplicado según el programa WinTess.

Datos generales de la estructura	
Volumen (entre membrana y plano Z=0)	16.255,54 m3
Superficie de la membrana	2.959,96 m2
Módulo de elasticidad de la membrana	80 T/m
Peso de las barras	56.720,46 kg
Peso de la membrana	4.143,94 kg
Peso total de la estructura	60.864,40 kg
Peso de la estructura por m2	51,70 kg

Tabla 14. Datos generales

ANÁLISIS DEL CUADRO RESUMEN 5.

La estructura permanece en equilibrio ante las cargas de viento de 170 km/h. Cargas (x= -26004, y=0, z=-34610) = reacciones (x= -26004, y=0, z=-34610) (Fig.162).

Cargas: Viento

El peso total de la estructura es de 60864 kg. baja en 292,52 kg porque disminuye la medida de los mástiles menores.

Viento 170 km/h

Las cargas totales de viento que se hallaron en el cálculo son del orden de 199,157 toneladas.

Movimientos

El mayor desplazamiento es de = 294 mm en la barra 23 (nudos 243-244) que corresponde a uno de los mástiles menores del domo (L=6,5 m - Ø 90-4_S235). Este desplazamiento ocurre por la ubicación de la barra en el espacio y además por las cargas que llegan a la membrana; está sujeto por 4 cables superiores y cuatro inferiores.

El mayor desplazamiento del anillo principal de la estructura es de =269 mm en la barra 19 (nudos 16-71) que corresponde a los tubos (L=20 m - Ø 400-10_S235). Este movimiento ocurre en el nudo superior de la barra que va al apoyo. El movimiento se produce por la carga horizontal del viento y la tensión de los cables exteriores (vientos) que ayudan a controlar que el desplazamiento no sea mayor. Estos desplazamientos no afectan el comportamiento de la estructura, la estructura llega al equilibrio con esta forma final. (Fig.162)

También observamos que disminuyen los desplazamientos de los nudos del mástil central de 172mm a 54mm por la ayuda de la tensión de la membrana y los cables que lo aguantan.

En general los mayores desplazamientos se encuentran en la zona por donde se ha aplicado el viento que viene de manera horizontal.

Reacciones

Las máximas reacciones en los nudos fijos de apoyo de la estructura son del orden de 22,134 toneladas, en los tubos exteriores 13,814 toneladas y en los cables de viento 16,582 toneladas (Fig.163). Es claro que han disminuido las reacciones con respecto al caso anterior debido a que los coeficientes de presión hallados en el túnel de viento son menores que los dados por defecto en WinTess.

En los tubos de la estructura, cables y membrana el ratio promedio va entre 0,5 a 0,05 (Fig.163).

RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LA ESTRUCTURA - CP TÚNEL DE VIENTO

Viento X = 170 km/h

Viento Y = 0 km/h

Viento total = 170 km/h

Pretenso de la membrana = 0,30/3 % 2,40 kg/m

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS (Toneladas)						TRACCIÓN EN LOS CABLES DE RELINGA						TRACCIÓN EN LOS VIENTOS																						
Barra	Nudos	Toneladas	Rx(tot)	Ry(t)	Rz(t)	Cable Tons.	Ratio	Bar.	Cable Tons.	Ratio	Bar.	Cable Tons.	Ratio	Bar.	Cable Tons.	Ratio	Bar.																	
1	-4,488	-4,448	-8,257	10,397	2	316-441	25,400	1	0,000	0,00	29	43	18,286	0,44	160	96	10,237	0,24	497	150	2,993	0,07	1045	203	12,405	0,30	1142	122	2,248	727				
2	9,126	9,084	-16,824	21,186	3	373-399	21,704	2	2,678	0,06	30	44	4,941	0,12	164	97	2,328	0,06	498	161	8,454	0,20	1047	204	13,694	0,33	1143	246	3,751	1237				
3	9,272	1,445	-12,266	15,444	4	292-375	25,070	3	0,000	0,00	31	45	12,697	0,30	165	98	4,876	0,12	530	162	5,459	0,13	1055	205	10,622	0,25	1144	247	7,206	1238				
4	-10,928	-1,689	-14,451	18,196	5	62-227	22,235	4	0,000	0,00	32	46	13,549	0,32	169	99	14,421	0,34	531	163	5,982	0,14	1056	206	14,216	0,34	1145	248	7,591	1239				
5	0,072	-0,023	20,150	20,150	6	7-130	26,289	5	0,404	0,01	33	47	7,431	0,18	173	100	15,533	0,37	533	164	9,761	0,23	1061	207	11,829	0,28	1146	249	8,719	1240				
6	7,130	26,289	-0,699	2,707	7	50-75	28,746	6	1,719	0,04	34	48	11,906	0,28	174	101	14,668	0,34	534	165	8,803	0,21	1062	208	2,625	0,06	1148	250	12,709	1241				
7	-1,089	-6,796	-8,997	11,329	8	73-155	25,849	7	0,880	0,02	35	49	3,796	0,08	178	102	12,650	0,30	535	166	11,855	0,28	1063	209	6,397	0,15	1148	251	3,432	1242				
8	9,126	10,431	-13,811	17,390	9	89-229	20,232	8	2,365	0,06	36	50	10,379	0,25	179	103	14,910	0,36	536	167	7,949	0,19	1065	210	2,888	0,07	1152	252	8,177	1243				
9	0,045	0,024	16,840	16,841	10	185-343	26,400	9	0,809	0,02	37	51	8,360	0,20	182	104	6,590	0,13	537	168	7,143	0,17	1066	211	12,974	0,31	1154	253	1,768	1244				
10	0,078	-0,054	23,537	23,537	11	293-434	19,474	10	0,989	0,02	38	52	16,302	0,39	183	105	14,784	0,35	568	169	8,459	0,20	1067	212	12,432	0,30	1155	254	9,668	1245				
11	2,772	-4,987	3,607	6,750	12	377-432	22,687	11	2,319	0,06	39	53	5,000	0,12	187	106	17,038	0,41	569	170	2,907	0,07	1068	213	2,180	0,05	1156	255	8,736	1246				
12	-5,236	7,890	1,369	9,568	13	332-423	16,012	12	3,574	0,09	40	54	14,450	0,35	188	107	9,665	0,23	570	171	8,196	0,20	1069	214	13,579	0,32	1158	256	7,660	1247				
13	-8,460	4,330	-12,423	15,641	14	220-360	27,109	13	2,679	0,06	41	55	1,530	0,04	192	108	12,451	0,10	1070	172	4,128	0,10	1070	215	0,000	0,00	1162	257	10,320	1248				
14	0,045	-8,272	-16,597	20,856	15	105-266	21,273	14	2,188	0,05	42	56	10,048	0,24	183	109	12,449	0,30	604	160	6,005	0,06	607	608	11,638	0,28	1163	1164	258	10,905	1249			
15	-16,852	-12,701	5,870	21,904	16	14-154	27,422	15	0,002	0,00	43	57	11,336	0,28	197	110	7,883	0,19	609	161	0,000	0,00	1072	217	11,257	0,27	1165	259	4,663	1250				
16	0,035	-0,036	15,491	15,491	17	16-71	29,520	16	2,672	0,06	44	58	17,467	0,42	201	111	4,480	0,11	610	162	5,182	0,12	1073	218	14,000	0,33	1166	1167	1168	260	8,607	1251		
17	0,025	0,038	16,005	16,005	18	224-225	0,211	17	4,193	0,10	45	59	0,963	0,02	235	112	2,067	0,05	612	163	3,783	0,09	1074	219	5,785	0,14	1169	1170	261	1,516	1252			
18	-7,407	3,789	0,336	8,326	19	284-285	0,698	18	0,000	0,00	46	60	16,289	0,39	236	237	2,905	0,07	643	164	6,445	0,16	1075	220	14,019	0,34	1171	1172	1173	262	8,191	1253		
19	2,251	4,454	-6,517	8,209	20	243-244	0,435	19	1,721	0,04	47	61	18,663	0,45	238	114	3,623	0,08	648	165	6,464	0,16	1076	221	22,269	0,53	1174	263	7,924	1254				
20	1,578	-2,864	-4,010	5,068	21	199-200	0,568	20	1,700	0,04	48	62	1,561	0,04	239	115	2,591	0,06	650	166	4,679	0,11	1077	222	20,857	0,50	1175	264	4,003	1255				
21	-3,138	-6,198	-9,080	11,433	22	159-160	0,140	21	0,000	0,00	49	63	9,873	0,24	240	116	7,818	0,19	681	167	6,882	0,16	1078	223	0,000	0,00	1176	265	10,729	1256				
22	1,578	7,362	-10,786	13,581	23	142-144	0,873	22	2,227	0,05	50	64	14,617	0,35	241	117	8,388	0,20	686	171	5,138	0,12	1079	224	16,330	0,39	1177	1178	1179	1180	266	0,000	1257	
23	5,199	-2,086	-3,075	6,389	24	161-163	0,174	23	1,456	0,03	51	65	0,000	0,00	273	118	3,524	0,08	687	172	7,995	0,19	1080	225	6,927	0,17	1181	1182	1183	267	1,930	1258		
24	-0,013	0,037	14,945	14,945	25	203-204	0,239	24	0,000	0,00	52	66	20,135	0,48	274	275	11,342	0,27	689	173	11,342	0,27	1081	226	17,774	0,43	1184	1185	1186	268	0,000	1259		
25	2,251	4,454	-6,517	8,209	26	246-249	0,293	25	1,639	0,04	53	67	11,276	0,27	276	174	20,808	0,50	1082	175	5,736	0,14	1084	227	0,410	0,01	1187	269	8,770	1260				
26	-0,013	-0,048	16,777	16,777	27	289-290	0,338	26	7,196	0,17	54	68	17,142	0,41	277	121	2,957	0,07	725	176	4,715	0,11	1086	228	14,441	0,35	1188	1189	1190	1191	270	0,000	1261	
27	3,907	-0,678	-2,390	4,630	28	304-306	0,714	27	11,586	0,28	55	69	0,000	0,00	309	123	15,784	0,38	757	177	4,715	0,11	1086	229	2,554	0,06	1192	1193	1194	271	7,476	1262		
28	0,045	-8,272	-16,597	20,856	29	203-204	0,239	28	0,000	0,00	70	71	12,773	0,31	311	124	9,133	0,22	762	178	3,104	0,07	1108	230	5,532	0,13	1195	272	6,918	1263				
29	6,733	3,455	-9,892	12,455	30	9,949	0,24	29	1,885	0,05	75	71	12,773	0,31	311	125	5,599	0,13	764	179	4,922	0,12	1109	231	15,808	0,38	1196	1197	1198	1199	273	0,000	1264	
30	2,236	-6,454	3,278	7,576	31	1088	127-278	31,061	30	9,949	0,24	76	72	11,632	0,28	312	126	16,767	0,40	794	180	19,182	0,46	1110	1111	1200	1201	1202	274	7,720	1265			
31	4,033	-12,988	5,270	14,584	32	222-385	30,225	31	2,041	0,05	80	73	16,532	0,40	313	127	8,016	0,19	799	181	19,182	0,46	1112	1113	1114	232	10,589	0,25	1200	1201	1202	275	0,000	1266
32	-0,060	0,027	19,299	19,299	33	171-320	26,711	32	1,109	0,03	91	74	1,508	0,04	346	128	7,720	0,18	828	182	0,000	0,00	1115	233	14,828	0,35	1205	276	2,748	1267				
33	1,099	-7,515	-2,038	7,855	34	47-48	23,346	33	9,249	0,22	92	75	12,426	0,30	347	129	3,473	0,08	833	183	15,047	0,36	1116	1117	1206	236	4,943	0,12	1206	277	0,000	1268		
34	-1,361	-6,788	-9,987	11,317	35	157-158	15,300	34	1,089	0,03	97	76	13,844	0,33	348	130	1,611	0,04	835	184	16,716	0,40	1118	238	14,519	0,35	1207	1208	1209	1210	278	0,000	1269	
35	0,045	0,024	16,840	16,841	36	287-288	16,586	35	9,954	0,23	98	77	9,954	0,24	349	131	2,021	0,05	866	185	5,136	0,12	1119	237	2,944	0,07	1211	1212	279	1,987	1270	279	1,987	1270
36	-0,078	-0,005	21,046	21,046	37	411-412	19,908	36	1,790	0,04	102	78	13,669	0,33	350	132	8,271	0,20	871	186	9,910	0,22	1120	239	2,753	0,07	1213	1214	280	1,142	1271	280	1,142	1271
37	1,689	-14,419	18,156	18,156	38	164-165	15,814	37	5,365	0,13	103	79	2,822	0,07	382	133	3,621	0,08	872	186	9,614	0,23	1121	239	6,702	0,16	1215	1216	281	0,000	1272	281	0,000	1272
38	0,045	-8,272	-16,597	20,856	39	282-283	14,754	38	1,716	0,04	116	80	12,441	0,30	383	134	2,468	0,06	874	187	15,206	0,36	1124	240	15,216	0,36	1218	1219	282	8,822	1273	282	8,822	1273
39	0,072	-0,050	-2,699	2,707	40	409-410	19,108	39	2,037	0,05	134	81	15,013	0,36	385	135	11,995	0,29	905	188	21,902	0,52	1126	241	14,250	0,34	1220	283	0,000	1274	283	0,000	1274	
40	-0,060	-0,036	-20,098	20,098	41	442-443	20,855	40	2,788	0,07	139	82	9,932	0,24	386	136	2,796	0,07	910	189	0,000	0,00	1128	242	24,373	0,58	1221	284	3,838	1275	284	3,838	1275	

CASO 6.
Nieve 50 kg/m² y viento de 15 km/h
Fig. 164 a 169

Estructura reforzada con cables, con tubos exteriores y cables exteriores (vientos)

Características estructurales de los elementos del modelo:

Con respecto al modelo anterior se mantiene la misma calidad de la membrana y los tubos exteriores, los demás elementos se redimensionan debido a la carga de nieve.

- **Cables de borde:** WS-2 (42mm) Galv Ø 42 - **Sección** 1160 mm² - **Módulo de elasticidad** 1.635 t/cm² = 163,5 kN/mm² - **Q=** 171,36 t = 1.713,6 kN
- **Tubos del anillo:** L=20 m - Ø 450-10_S235 - **Sección** 138,230 cm² - **Peso** 2193,0 kp= 21,93 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástil central del domo:** L=9 m - Ø 200-5_S235 - **Sección** 30,631 cm² - **Peso** 225,6 kp= 2,256 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástiles menores del domo:** L=6,5 m - Ø 110-5_S235 - **Sección** 16,493 cm² - **Peso** 86,7 kp= 0,867 kN - **Módulo de elasticidad** 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - **Densidad** 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Cables exteriores (Vientos):** WS-2 (32mm) Galv Ø 32 - **Sección** 676 mm² - **Módulo de elasticidad** 1.635 t/cm² = 163,5 kN/mm² - **Q=** 99,552 t = 9.955,2 kN.

Datos generales de la estructura	
Volumen (entre membrana y plano Z=0)	14.343,43 m3
Peso de las barras	64.879,75 kg
Peso de la membrana	4.143,94 kg
Peso total de la estructura	69.023,69 kg
Peso de la estructura por m2	58,63 kg

Tabla 16. Datos generales.

ANÁLISIS DEL CUADRO RESUMEN 6.

La estructura permanece en equilibrio ante las cargas de nieve 50 kg/m² y viento de 15 km/h (Fig.168).

Cargas (x=0, y=0, z=-119723) = Reacciones (x=0, y=0, z=-119723).

Cargas: Nieve + Viento

El peso total de la estructura es de 69023 kg. aumenta en 8159,29 kg por el redimensionamiento de los elementos.

Nieve 50 kg/m² y viento 15 km/h

Las cargas totales que se hallaron en el cálculo son del orden de 143,325 toneladas.

Refuerzo

Para responder a la carga de nieve se redimensionaron los elementos de la estructura, como se mencionó anteriormente y esto ocasiona que la estructura pese más.

Movimientos

El mayor desplazamiento es de = 809 mm en la barra 29 (nudos 246-249) que corresponde a uno de los mástiles menores del domo (L=6,5 m - Ø 110-5_S235). Este desplazamiento ocurre por el peso de la nieve y por la ubicación de la barra en el espacio, está sujeto por 4 cables superiores y cuatro inferiores y además por la tensión de la membrana.

También observamos que los desplazamientos de los nudos del mástil central son de 690 mm al igual que los mástiles menores ocurre por la acción de la carga.

El mayor desplazamiento del anillo principal de la estructura es de =299 mm en la barra 10 (nudos 171-320) que corresponde a los tubos (L=20 m - Ø 450-10_S235). Este movimiento ocurre en el nudo superior que se une con el domo, se produce por la tensión de los cables exteriores (vientos). Esto no afecta el comportamiento de la estructura, la estructura llega al equilibrio con esta forma final. (Fig.168)

Observamos de manera general que los mayores desplazamientos se encuentran en la zona central del domo por el peso de la nieve.

Reacciones

Las máximas reacciones en los nudos fijos de apoyo de la estructura son del orden de 22,134 toneladas, en los tubos exteriores 13,814 toneladas y en los cables de viento 16,582 toneladas. (Fig.169)

En los tubos y cables de la estructura el valor del ratio promedio va entre 0,7 a 0,05 (Fig.169)

RESULTADOS FINALES D.

Después de la aplicación de los coeficientes de presión hallados en el túnel de viento y el análisis, estructural y cualitativo, fue necesario re-optimizar la estructura debido a la sobrecarga de las fuerzas ejercidas por el viento; esto para poder llevar a cabo la construcción del modelo en el mundo real. (Ver tabla 17)

Se reemplazó la membrana, en el primer cálculo obtuvimos una membrana Ferrari Floutop T2 1202 y al aplicar los coeficientes de presión la nueva membrana usada fue una T3 1302. Pasamos de una resistencia de 11200,0 kg/m a 16000,0 kg/m.

Características estructurales finales de los elementos del modelo

- **Membrana:** Ferrari Fluotop T2 1302 - Pretensado 0,3 % = 12 daN/5cm = 240 kg/m Resistencia $R_k = 800/700 \text{ daN/5cm} = 16000,0 \text{ kg/m}$ - Coeficiente de seguridad (5) = $R_d = R_k / 5 = 160 \text{ daN/5cm} = 3200 \text{ kg/m}$.
- **Cables de borde:** WS-2 (36mm) Galv Ø 36 - Sección 855 mm² - Módulo de elasticidad 1.635 t/cm² = 163,5 kN/mm² - Q= 125,46 t = 1.254,6 kN
- **Tubos del anillo:** L=20 m - Ø 400-10_S235 - Sección 122,522 cm² - Peso 1944,0 kp= 19,44 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástil central del domo:** L=9 m - Ø 110-5_S235 - Sección 16,493 cm² - Peso 121,5 kp= 1,215 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Mástiles menores del domo:** L=6,5 m - Ø 90-4_S235 - Sección 10,807 cm² - Peso 56,8 kp= 0,568 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³
- **Cables exteriores (Vientos):** WS-2 (36mm) Galv Ø 36 - Sección 855 mm² - Módulo de elasticidad 1.635 t/cm² = 163,5 kN/mm² - Q= 125,46 t = 1.254,6 kN
- **Tubos exteriores:** L= 8 m - Ø 250-8_S235 - Sección 60,821 cm² - Peso 382,0 kp= 3,82 kN - Módulo de elasticidad 2.100 t/cm² = 210 kN/mm² - Densidad 7,85 t/m³ = 78,5 kN/m³

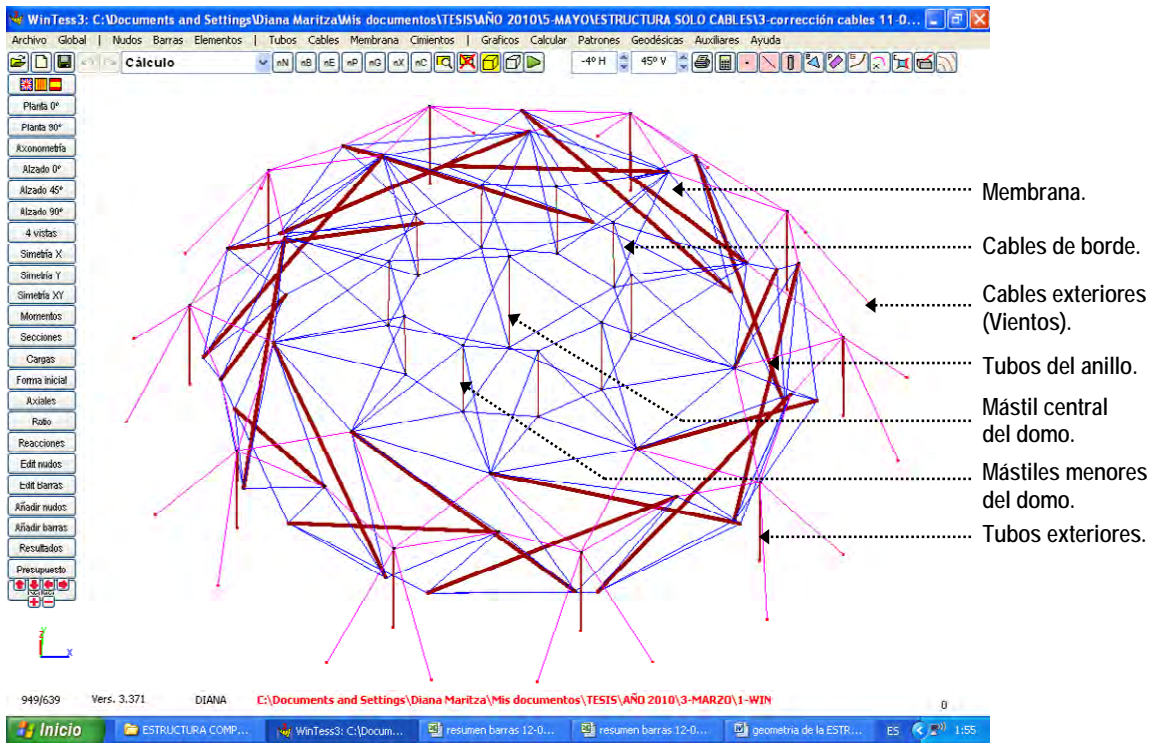


Figura 170. Elementos estructurales del modelo.

En el análisis de la Tabla No.17, hemos comparado los diferentes resultados del modelo, con las diferentes opciones del cálculo a través de WinTess. Los valores hallados son los desplazamientos de los nudos en el anillo y domo tensegrity, el peso total de la estructura, las reacciones, la dimensión de los elementos estructurales, etc. Todo probado ante cargas de viento, nieve, pretensado y su propio peso, teniendo en cuenta los coeficientes de presión.

La comparación se hizo con la estructura formada por sólo cables, estructura formada sólo por membrana y la estructura formada por ambos, cables y membrana, lo cual demostró la mayor eficiencia de la estructura probada ante cargas de viento de 170 km/h (menores desplazamientos). La estructura al ser probada ante nieve de 50Kg/m² demostró menor eficiencia (mayores desplazamientos).

Después del análisis se propone la estructura tensegrity por su forma aerodinámica como una opción para ser utilizada en zonas de fuertes vientos y zonas de poca nieve.

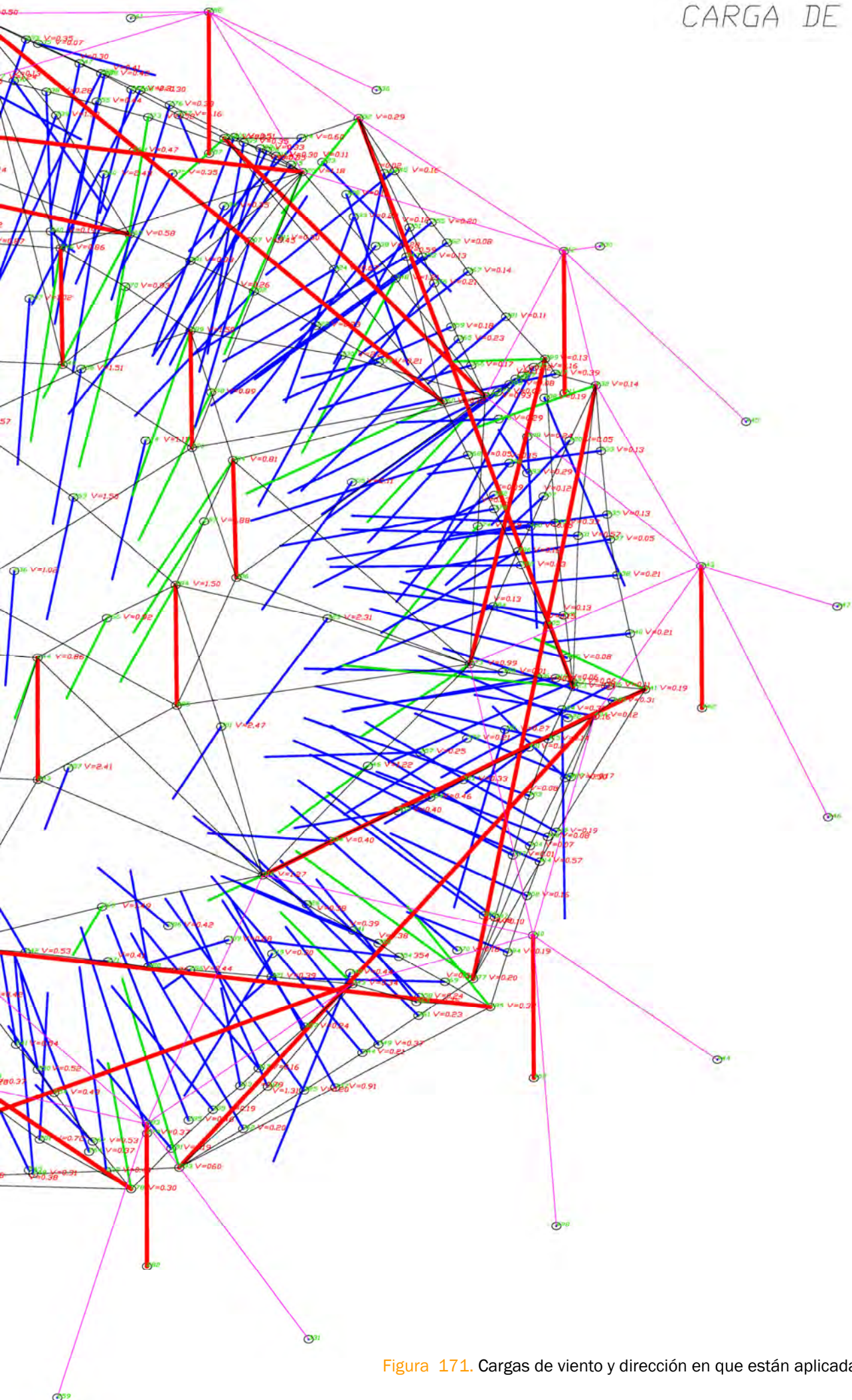
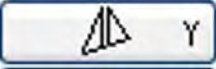


Figura 171. Cargas de viento y dirección en que están aplicadas.



Momentos

Secciones

Carg. Total

Forma inicial

Axiales

Ratio

Reacciones

🖋 Nudos

🖋 Barras

➕ Nudos

➕ Barras

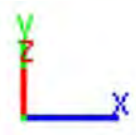
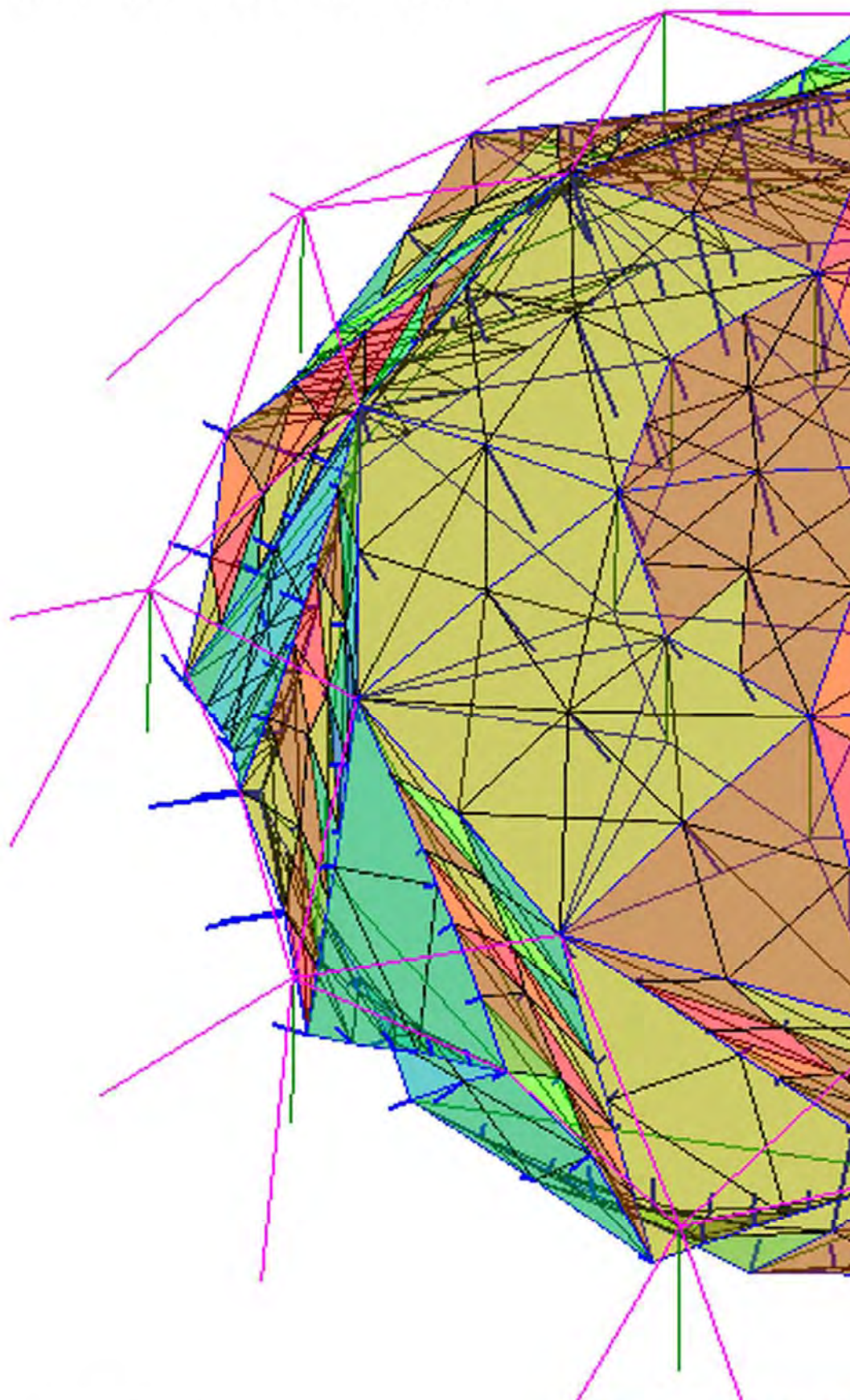
Resultados

Presupuesto

Render

Carga de viento

-0.89	-0.50	-0.11	0.29	0.68	1.07	(kN/m ²)
-0.64	-0.36	-0.08	0.21	0.49	0.77	(Cp)



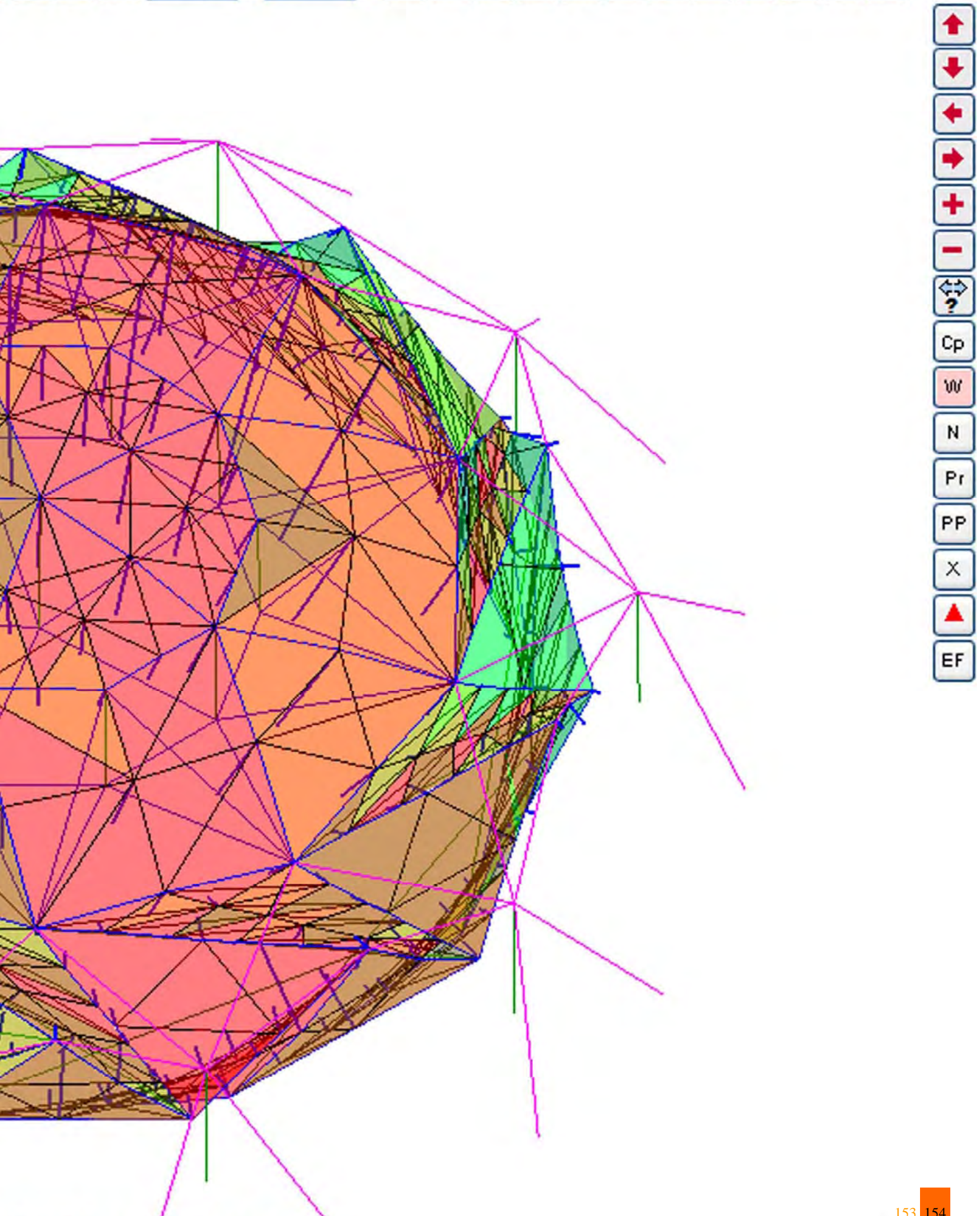


Figura 172. Esquema de presiones (kN/m²).
En Wintess: presión (-) succión (+)

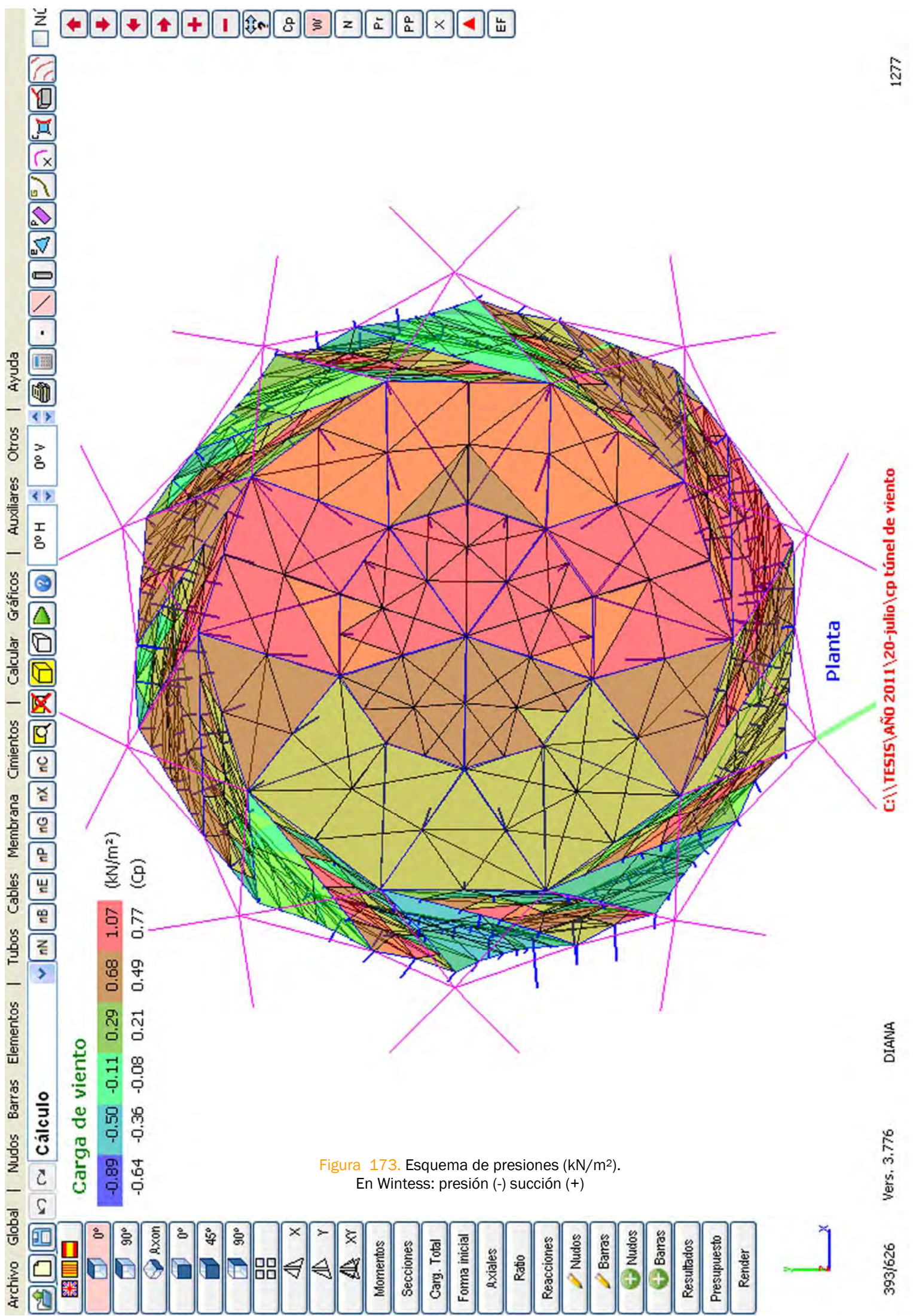


Figura 173. Esquema de presiones (kN/m²).
En Wintess: presión (-) succión (+)

CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS

Anillo tensegrity	Estructura sólo con cables		Estructura con membrana y cables		Estructura sin cables (sólo membrana)		
	peso propio+pretensado	peso p. +pret.	viento 170km/h	viento 170km/h	viento 170km/h	viento 170km/h	
	sin refuerzos	con refuerzos y sin tubos ext.	con refuerzos, tubos y cables exteriores				
	0	0	0	0	0	0	
Nudos de los apoyos - barras inferiores	950	903	140	195	109	328	
Nudos de las barras inferiores	941	888	127	198	133	573	
Nudos de las barras superiores	349	353	149	73	277	725	
Nudos de las barras sup. que se unen con el domo.	154	425	172	54	638	464	
Nudo superior del mástil central	164	422	172	54	638	464	
Nudo inferior del mástil central	345	322	269	271	729	3923	
Nudos sup. de los mástiles menores sujetos con 5 cables	345	320	216	147	651	576	
Nudos inf. de los mástiles menores sujetos con 5 cables	2533	275	254	152	759	1302	
Nudos sup. de los mástiles menores sujetos con 4 cables	2500	287	183	147	656	1320	
Nudos inf. de los mástiles menores sujetos con 4 cables	-	-	0	0	0	0	
Nudos inf. de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos	-	-	0	0	0	0	
Nudos sup. de los tubos exteriores sujetos con 2 vientos	-	-	72	24	23	71	
Elementos auxiliares	-	-	36	24	23	23	
			0	0	0	0	
			1547	1547	1547	1547	
			1420	1420	1420	1420	
			2504	2504	2504	2504	
			4105	4105	4105	4105	
			4105	4105	4105	4105	

resultados de la estructura

Peso total de la estructura (kg)	27.063,54	27.558,05	29.350,05	60.568,40	61.156,92	60.864,40	69.023,69	52.390,97	48.864,89	
Peso de la estructura por kg/m ²	22,99	23,41	24,93	51,45	51,95	51,70	58,63	45,50	41,51	
Cargas (ton)	-	-	-	-	178,205	199,157	143,325	-	254,100	127,204
Reacciones en apoyos (ton)	5,103	5,246	4,976	11,075	29,903	21,904	22,134	5,444	8,729	
Reacciones en tubos exteriores	-	-	1,56	6,433	22,855	23,537	13,814	3,583	20,299	
Reacciones en cables exteriores	-	-	2,087	8,548	34,39	21,186	16,582	4,938	22,081	
Ratio promedio en tubos	0,5 a 0,05	0,5 a 0,05	0,5 a 0,05	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	0,7 a 0,05	0,5 a 0,05	
Ratio promedio en cables	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	0,5 a 0,05	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	-	-	
Ratio membrana	-	-	-	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	0,5 a 0,05	0,5 a 0,05	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	

elementos estructurales

Membrana Ferrari Floutop	-	-	-	TP-1202	TP-1302	TP-1302	TP-1202	TP-1302	TP-1302
Cables de borde	Inox Ø 24	Inox Ø 24	Inox Ø 24	Galv Ø 36	Galv Ø 36	Galv Ø 42	-	-	-
Tubos del anillo (L=20m)	Ø 300-8_S235	Ø 300-8_S235	Ø 300-8_S235	Ø 400-10_S235	Ø 400-10_S235	Ø 450-10_S235	Ø 300-8_S235	Ø 400-10_S235	Ø 400-10_S235
Mástil central (L=9m)	Ø 110-5_S235	Ø 110-5_S235	Ø 90-4_S235	Ø 110-5_S235	Ø 110-5_S235	Ø 200-5_S235	Ø 110-5_S235	Ø 150-5_S235	Ø 150-5_S235
Mástiles menores (L=6,5m)	Ø 70-4_S235	Ø 70-4_S235	Ø 70-4_S235	Ø 90-4_S235	Ø 90-4_S235	Ø 110-5_S235	Ø 70-4_S235	Ø 110-5_S235	Ø 110-5_S235
Cables exteriores (vientos)	-	-	Inox Ø 12	Galv Ø 36	Galv Ø 36	Galv Ø 32	Inox Ø 18	Galv Ø 38	Inox Ø 36
Tubos exteriores (L=8m)	-	-	Ø 150-5_S235	Ø 250-8_S235	Ø 250-8_S235	Ø 250-8_S235	Ø 150-5_S235	Ø 300-8_S235	Ø 200-5_S235
caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5a	caso 5b	caso 6	caso 7	caso 8	caso 9
				Cp WinTess	Cp túnel viento				

*** NOTA**

En algunos programas de cálculo se utilizan distorsiones o irregularidades para ver si la estructura continúa en equilibrio. En nuestro caso hemos mantenido las irregularidades del modelo y esto no afecta el equilibrio de la estructura. Además la estructura no es simétrica, el tensegrity por la posición de las barras tiene movimiento de giro, es como un molino de viento, por eso las reacciones son diferentes.

*** Conclusiones**

En las construcciones textiles los pequeños cambios de viento y nieve pueden tener un impacto mayor en el tamaño de los elementos estructurales y en las deformaciones que sufren, por esta razón fue necesario obtener los coeficientes de presión en el túnel de viento y WinTess, para aplicarlo a nuestro caso de estudio. Después del análisis se propone la estructura tensegrity por su forma aerodinámica como una opción para ser utilizada en zonas de fuertes vientos y zonas de poca nieve.

Tabla 17. Comparación de los resultados.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3.3

1. En este capítulo se demostró que los 6 primeros modelos seleccionados para el cálculo estructural con el software WinTess están en equilibrio ante su propio peso. Esto quiere decir que la carga y reacciones son iguales. Los modelos se mantienen ante su propio peso.
2. Se definió geoméricamente dentro del software de análisis la estructura final de estudio: anillo y domo completamente en tensegrity.
 - La estructura está compuesta por nudos, barras que representan los tubos, cables y membrana del modelo y se definieron sus respectivas características mecánicas.
 - Se explicó el funcionamiento del programa: para poder aplicar las cargas externas y el pretensionamiento del sistema, lo más importante para mencionar es que sólo se pueden aplicar cargas superficiales de viento, nieve y presión interna si hay una superficie de membrana. En el caso en que la estructura está formada únicamente por cables sólo podemos analizar el comportamiento de la estructura ante su propio peso.
 - Las cargas en WinTess están aplicadas en la superficie, en los triángulos que representan la membrana, dentro del programa denominados elementos; la carga del elemento se divide en tres partes que no son iguales, son proporcionales al ángulo interior del triángulo. Estas cargas se asignan a los nudos que vienen de cada triángulo, en el programa están representadas en toneladas.
 - La pretensión es clave en nuestro estudio, tanto en la creación de los modelos físicos como en el análisis estructural, en nuestro caso la estructura se tensó antes de aplicar las cargas, la tensión aplicada fue de 240 kg/m.
3. En el análisis de la estructura ante su propio peso los mayores desplazamientos se presentaron en la zona de los mástiles centrales, pasaron de 2633mm a 296mm, el movimiento se redujo gracias a los 4 cables de refuerzo que se colocaron para estabilizar los mástiles menores y la ayuda de la tensión de la membrana. (Ver tabla 2 y tabla 4)
 - Las reacciones que se presentaron fueron del orden de 11 toneladas en los nudos fijos del anillo tensegrity, 6 toneladas en los tubos exteriores y 8,5 toneladas en los cables de viento, esto demuestra como los tubos y cables exteriores contribuyen al equilibrio de la estructura.
 - La ratio que hallamos en tubos, cables y membrana va de 0,5 a 0,05, esto quiere decir que teniendo en cuenta la resistencia del cálculo de las diferentes barras y sus respectivos coeficientes de seguridad, la estructura cumple con la resistencia necesaria.

4. Se demostró también que la estructura final propuesta para el análisis estático, en los diferentes tópicos de estudio, ante su propio peso, pretensión, ante cargas externas de viento y nieve está en equilibrio. El modelo no colapsa ante las fuerzas externas aplicadas :
- Viento de 170 km/h.
 - Nieve 50 kg/m² y viento de 15 km/h.
- Se aplicaron los coeficientes de presión dados por WinTess (Cp global ~0.4) y hallados en el túnel de viento (Cp global ~0.3). Al comparar los datos arrojados por el análisis, concluimos que la estructura dimensionada con los coeficientes de WinTess es mayor que la dimensionada con los coeficientes del túnel de viento.
 - La diferencia de peso entre las estructuras es de 292 kg, la primera tiene un peso de 61.156 y la segunda 60.864Kg que corresponde casi a 52 kg por m². Esta diferencia de peso se debe a los mástiles menores que en el primer caso son de mayor diámetro Ø 110 a Ø90 que en el segundo, esto por ser mayor el coeficiente de presión en el primer caso.
 - Importante mencionar que las mayores cargas se presentan en la estructura que se calculó con los coeficientes de presión del túnel de viento, las cargas que le llegan a la estructura son del orden de 199 toneladas.
 - Las mayores reacciones se presentaron en los cables de viento 34.39 toneladas, en la estructura con los coeficientes de viento dados por WinTess. Podemos con ello comprobar como los cables exteriores contribuyen a la estabilidad y rigidez de la estructura ante la carga horizontal de viento.
 - Se analizó que las mayores presiones (carga/superficie) se encontraron en la zona en que la estructura recibe frontalmente el viento y en la parte superior del domo donde se presentaron las mayores succiones.

Resultados	Peso propio pretensión	Viento 170 km/h Cp Wintess	Viento 170 km/h Cp Túnel	Nieve 50 kg/m ²
Peso total (kg)	60.568,40	60.864,40	61.156,92	69.023,69
Peso (kg/m ²)	51,45	51,95	51,70	58,63
Cargas (ton)	-	254,405	199,157	143,325
Reacciones totales en apoyos (ton)	11,075	29,903	21,904	22,134
Reacciones totales en tubos ext.	6,433	22,855	23,537	13,814
Reacciones totales en cables ext.	8,548	34,99	21,186	16,582
Ratio promedio	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05	0,5 a 0,05	0,7 a 0,05

Tabla 18. Comparación de resultados.

- También podemos comparar los desplazamientos, los mayores movimientos con respecto al viento, se presentan en los mástiles menores del domo superior 294mm y el mayor desplazamiento en el anillo tensegrity es de 269mm. (Ver tabla 9)
5. En el estudio con respecto a la nieve podemos concluir que es necesario redimensionar la estructura con respecto al viento, las cargas son mayores, el peso de la estructura aumenta en 8.159,29 kg.
- Los mayores desplazamientos se presentan en los mástiles menores del domo, los movimientos son del orden de 809mm, al reforzar la estructura con los cables y tubos exteriores estos movimientos bajan a 600mm. (Ver tabla 10)
 - Las mayores reacciones se presentan en los nudos fijos del anillo tensegrity, esto debido a la carga vertical de nieve.
6. Después de comparar los valores hallados con WinTess, podemos concluir que la estructura probada ante cargas de viento de 170 km/h demostró la mayor eficiencia (menores desplazamientos) que la estructura probada ante nieve de 50Kg/m², la cual demostró menor eficiencia (mayores desplazamientos). Nuestra recomendación final es que la estructura tensegrity por su forma aerodinámica puede ser utilizada en zonas de fuertes vientos y zonas de poca nieve.
- La dificultad de estos sistemas es que aunque estén equilibrados por sí mismos ante cargas externas como viento y nieve hay que reforzarlos por medio de barras exteriores que ayudan al sistema para que no colapse ante condiciones extraordinarias.
 - Las estructuras tensegrity tienen movimientos indeterminados, son muy sensibles a las vibraciones por lo cual requieren mayor rigidez en los elementos de tensión.
 - En nuestro caso de estudio, la pretensión del sistema se logra por medio de la membrana y de elementos externos como tubos y cables (vientos).
 - Nuestras pruebas iniciales con el WinTess y los coeficientes de presión hallados en el túnel de viento, demostraron que era necesario re-optimizar los elementos estructurales para construir una estructura en el mundo real.
 - La conclusión más importante de este capítulo es que este estudio es el primer paso en el proceso de construir el modelo propuesto en el mundo real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 3.4

- [25] Llorens, J., García Ch. y Pöppinghaus H., *Tensegrity Structures for Textile Roofs*. Textile Composites and Inflatable structures, E. Oñate and B. Kröplin (Eds.), Cimne, Barcelona, 2003.
- [26] Sastre, R., <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/>, Barcelona, 2011.
- [27] Foster B., Mollaert M., *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, Madrid: Munilla Lería, LD 2009.
- [28] Rodríguez, N., *Diseño de una estructura transformable por deformación de una malla plana en su aplicación a un refugio de rápido montaje*. Tesis Doctoral, UPC Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2008.
- [29] AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación. *Eurocódigo 1-Bases de proyectos y acciones en estructuras, parte 2-4: Acciones de estructuras. Acciones del viento UNE-ENV_1991-2-4*. Versión Española, Mayo de 1998.
- [30] Herzog, T., *Construcciones neumáticas: manual de arquitectura hinchable*. Gustavo Gili, Barcelona, 1977.

CAPÍTULO 4. **APLICACIÓN ARQUITÉCTONICA**

	APLICACIÓN 4.1
	POLIDEPORTIVO 4.1.1
DIMENSIONES DE PISTAS Y SALAS DEPORTIVAS 4.1.2	
	PLANOS DE LA PROPUESTA 4.1.3
	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4.2
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 4.3
	LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS 4.4

*“This design features a cladding **structure for a sports arena**, which consist of a ring-shaped outer section and a central roof structure. The ring-shaped outer section of the stadium consists of a tensegrity structure, which uses textile membranes in a place of conventional tension cables to bear the tensile forces occurring between the pressure elements. The supporting framework and spatial enclosure therefore become one an extension to the tension integrity principle. The central area of the roof is covered over by a Geiger dome, which in turn is a specific version of the tensegrity principle. The jury particularly praised the fact that the designer has succeeded in combining the design principles of the tensegrity frame - which are not dubt difficult for a student to handle - with dynamic architectural design which has exeptional visual appeal”.*

**“TENSEGRITY RING FOR A SPORTS ARENA”
2nd Prize in the Macro Architecture Category**

International student competition “Textile Structures for New Buiding 2011” Messe Frankfurt - Germany.
Academic advisor: Prof. Dr.-Ing. Werner Sobek and
Dipl.-Ing. Clemens Freitag.

APLICACIÓN 4.1

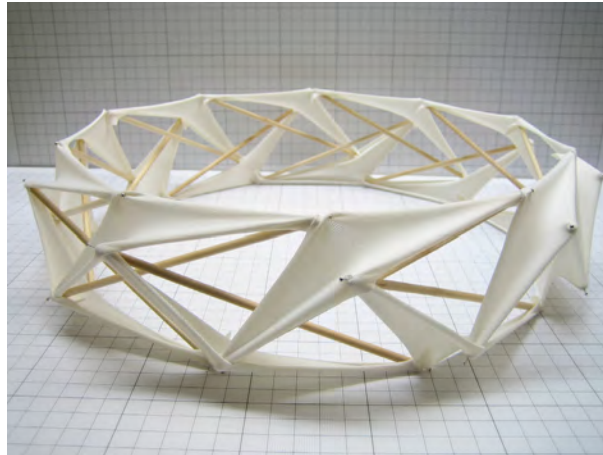


Figura 174. Anillo tensegrity.

“Este diseño cuenta con una estructura de revestimiento para una arena deportiva, que consiste en una sección exterior en forma de anillo y una estructura central para la cubierta. La sección exterior en forma de anillo del estadio consiste en una estructura tensegrity, que utiliza membranas textiles en un lugar de los cables de tensión convencionales para soportar las fuerzas de tensión que ocurren entre los elementos de presión. El marco de apoyo y el recinto espacial convertido en uno, son una extensión del principio de integridad de la tensión. La zona central del techo está cubierta por una cúpula de Geiger, que a su vez es una versión específica del principio del tensegrity. El jurado ha valorado particularmente el hecho que el diseñador ha sabido conjugar los principios de diseño de la estructura tensegrity - que no hay duda en la dificultad de manejar para un estudiante - con un diseño arquitectónico dinámico que tiene un atractivo visual excepcional” [31].

**“ANILLO TENSEGRITY PARA UNA ARENA DEPORTIVA”
2º Premio en la Categoría de Macro-Arquitectura**

Concurso internacional de estudiantes “Estructuras Textiles para Nuevos Edificios 2011” Feria de Frankfurt - Alemania.
Asesores académicos: Prof. Dr.-Ing. Werner Sobek y
Dipl.-Ing. Clemens Freitag.

POLIDEPORTIVO 4.1.1

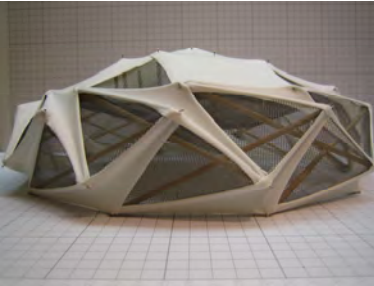


Figura 175.
Alzado domo tensegrity.

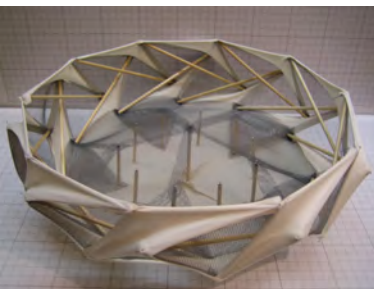


Figura 176.
Modelo domo tensegrity.



Figura 177.
Detalle domo tensegrity.

El domo propuesto tiene un diámetro de 40 metros con un área libre de casi **1200 m²**.

Como aplicación por su área libre de cualquier elemento o soporte interior se puede aprovechar como un espacio polivalente para actividades deportivas, recreativas y/o culturales. Como por ejemplo centro de convenciones o reuniones, sala de conciertos, sala de exposiciones, pistas deportivas, etc.

Nuestra particular propuesta es una arena deportiva, lo definimos como **polideportivo** o pista por sus dimensiones, menor de 1500 m². Nos basamos en lo siguiente, una instalación deportiva se clasifica de acuerdo a sus espacios deportivos.

ESPACIOS DEPORTIVOS CONVENCIONALES

Dan servicio a las prácticas deportivas más comunes, y atienden a referentes reglamentados con dimensiones normalizadas, aunque no siempre se ajustan a ellas.

Hay seis tipos de espacios convencionales:

Campos

Generalmente son de forma rectangular, al aire libre y con delimitación y marcación clara. Superan los 1500 m² de superficie. Ejemplos: campos polideportivos, de fútbol, fútbol 7, rugby, hockey sobre hierba, béisbol, zonas de lanzamiento de atletismo.

Espacios longitudinales

Espacios en los que la actividad se realiza siguiendo un recorrido fijo y delimitado. Ejemplos: pistas de atletismo (de 200 m, 300 m o 400 m), rectas de saltos atléticos, velódromos, patinódromos.

Pistas

Son como los campos, de forma rectangular y con delimitación y marcación clara, generalmente están al aire libre, aunque las hay cubiertas (en pabellones). Su superficie es **menor a 1500 m²**.

Ejemplos: pistas polideportivas, de baloncesto, voleibol, vóley playa, tenis, bádminton, patinaje sobre ruedas, patinaje sobre hielo, hockey sobre hielo, etc.

Pistas con pared

Son como las pistas pero con una o más paredes que son necesarias para el desarrollo de la actividad deportiva. Ejemplos: pistas de frontón, squash, padel, etc.

Salas

Son espacios cubiertos de poca superficie donde se pueden realizar diferentes actividades deportivas y que no tienen los requerimientos dimensionales y de marcación de las pistas. Ejemplos: las salas de artes marciales, esgrima, gimnasia, halterofilia, etc.

Piscinas

Cuerpos cubiertos de agua para la práctica de deportes acuáticos, pueden estar al aire libre o cubiertas. Piscinas de natación (de 25 m, 33 m o 50 m), saltos, waterpolo [32].

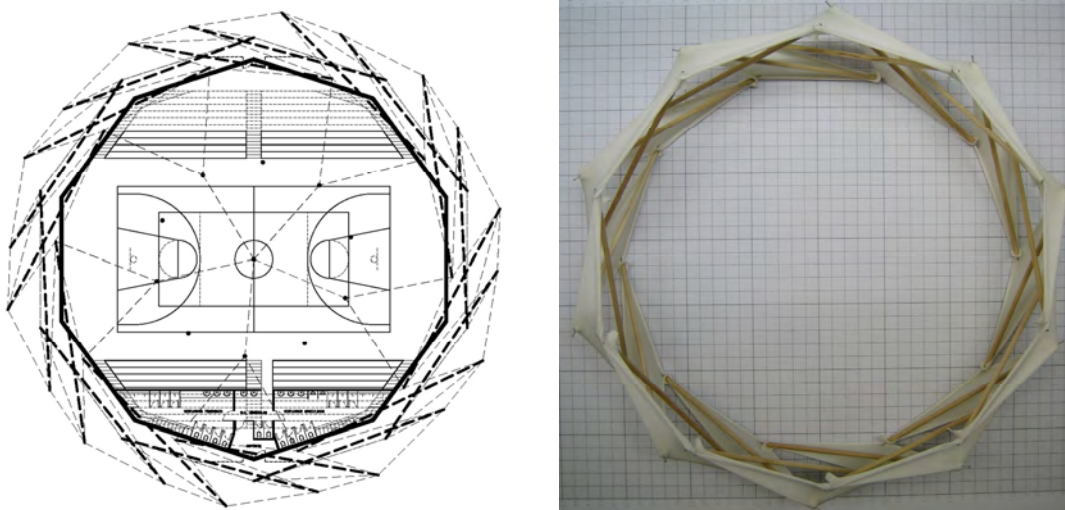


Figura 178. Planta polideportivo & Planta anillo.

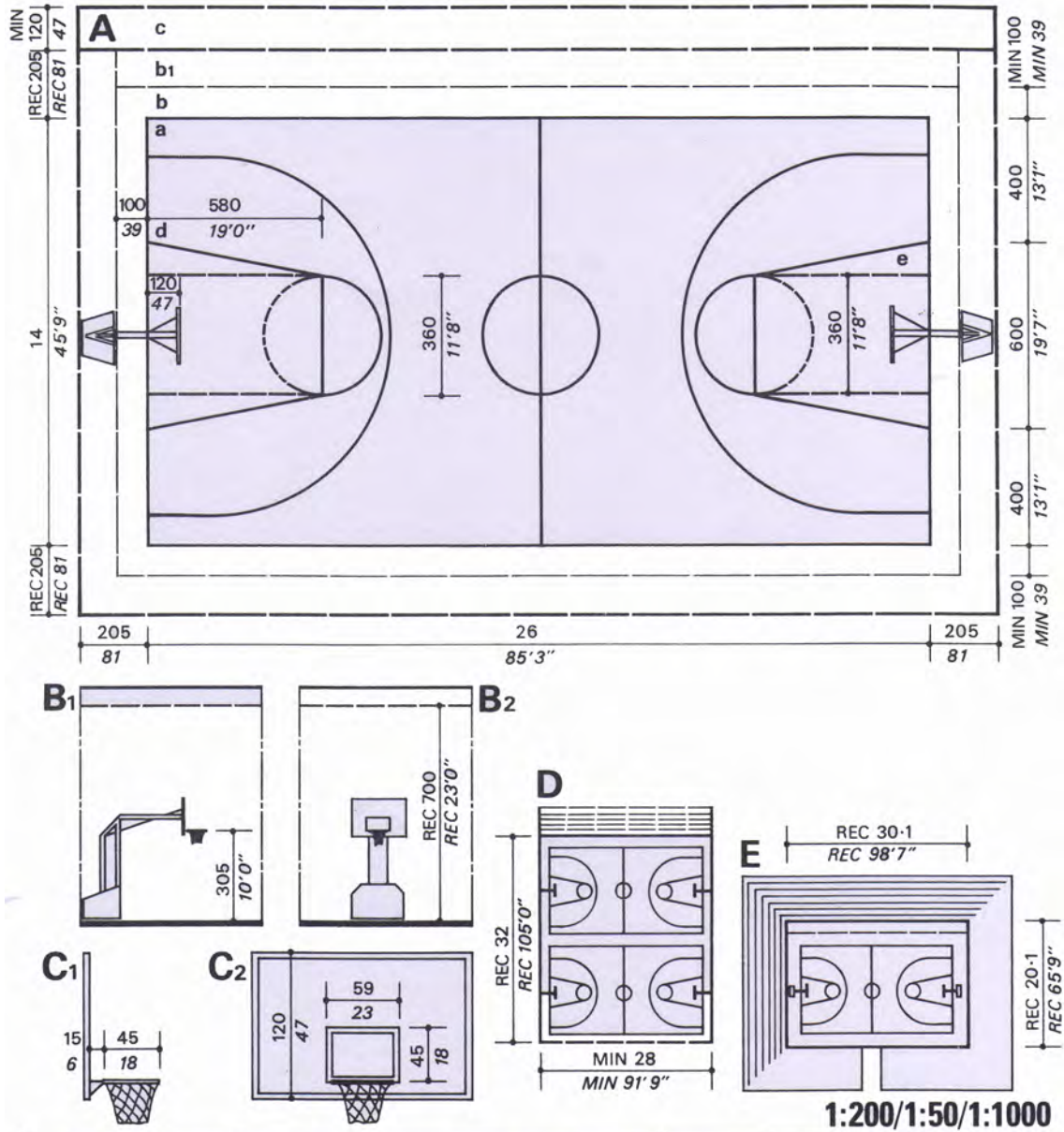
DIMENSIONES DE PISTAS Y SALAS DEPORTIVAS 4.1.2

SALAS DE DEPORTE									
TIPO DE DEPORTE	AREA ÚTIL				Zona adicional libre de obstrucciones		Areas utilizables libres de obstrucción.		Altura libre
	Dimensiones permitidas		Dimensiones estándar						
	Largo m.	Ancho m.	Largo m.	Ancho m.	Lado largo	Lado corto	Largo m.	Ancho m.	
* BADMINTON	13.4	6.1	13.4	6.1	1.5	2.0	17.4	9.1	9
* BASKETBALL	24 - 28	13 - 15	28	15	1	1	30	17	7
* BOXING	4.9 - 6.1	4.9 - 6.1	6.1	6.1	0.5	0.5	7.1	7.1	4
* CRICKET	29.12 - 33.12	3.66 - 4.00	33.12	4.00	1	1	35	6	4.0 - 5.5
* LEVANTAMIENTO DE PESAS	4	4	4	4	3	3	10	10	4
BALON MANO	40	20	40	20	1	2	44	22	7
HOCKEY EN EL HIELO	36 - 44	18 - 22	40	20	0.5	2	44	21	5.5
* JUDO	9. - 10	9. - 10	10.	10.	2	2	14	14	4
* NETBALL (Basketball femenino)	28	15	28	15	1	1	30	17	5.5
* HALTEROFILIA	12	12	12	12	1	1	14	14	5.5
GIMNASIA	52	27	52	27	-	-	52	27	8
* GIMNASIA RÍTMICA	13	13	13	13	1	1	15	15	8
* LUCHA GRECORROMANA	9. -12	9. -12	12.	12.	2	2	14	14	4
HOCKEY EN PATINES	34 - 40	17 - 20	40	20	-	-	40	20	4
PATINAJE ARTÍSTICO	40	20	40	20	-	-	40	20	4
* BAILE	15 - 16	12. - 14	16	14.	-	-	16	14	4
TENNIS	23.77	10.97	23.77	10.97	3.65	6.4	36.57	18.27	7
* PING-PONG	2.74	1.525	2.74	1.525	5.63	2.74	14	7	4
* TRAMPOLING	4.57	2.74	4.57	2.74	4	4	12.57	10.74	7
* VOLLEYBALL	18	9	18	9	5	8	34	19	12.5
FOOTBALL SALA	30 - 50	15 - 25	40	20	0.5	2	44	21	5.5

* Deportes que se pueden practicar en la pista deportiva propuesta

Tabla 19. Dimensiones de pistas y salas deportivas [33].

PISTA DE BASKETBALL



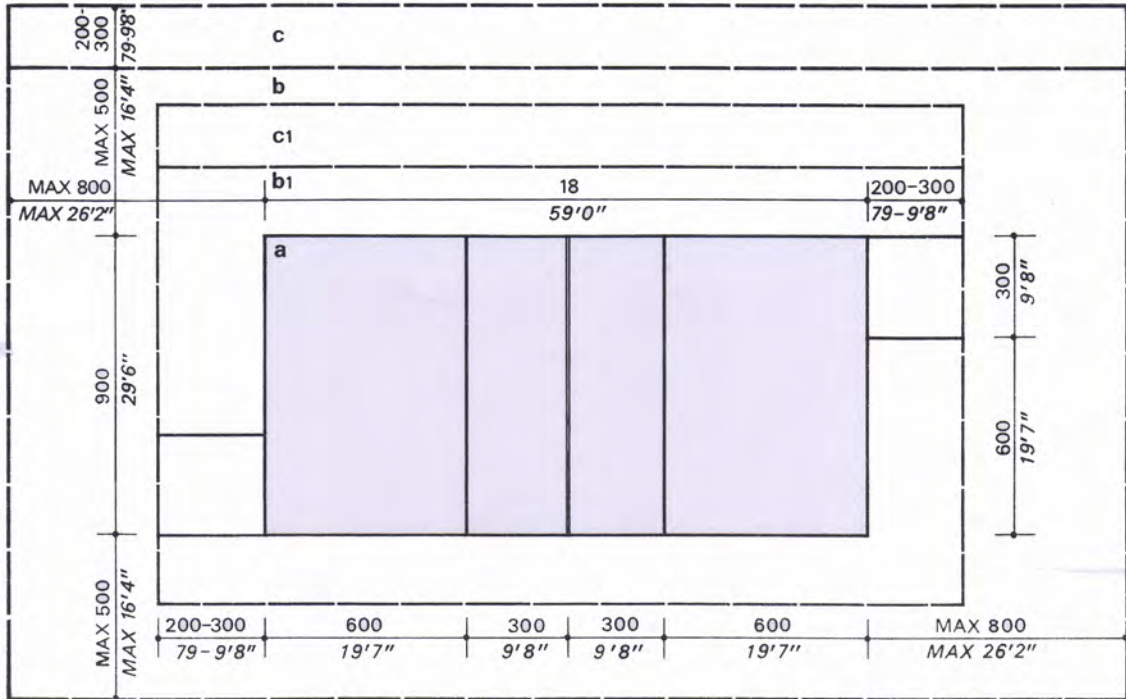
- A** Planta de la zona de juego.
a Pista, terreno de juego.
b,b1 Franja libre.
c Zona de jueces y banquillo de suplentes.
d Área de tiros libres (baloncesto europeo).
e Área de tiros libres (baloncesto norteamericano).
B Secciones.
B1 Altura de la canasta.
B2 Altura libre.
C1,2 Dimensiones del tablero y canasta.
D Agrupación de varias pistas con posible colocación de asientos.
E Pista para competición, con disposición de asientos.

Notas

- La superficie del terreno de juego debe ser dura.
- La longitud y anchura de la pista pueden variar entre 1 m/39' y 2 m/49', respectivamente, pero las proporciones deben mantenerse.
- Los espectadores deben estar como mínimo a 2 m/79' de la pista.
- Se requiere una iluminación uniforme y antideslumbrante.

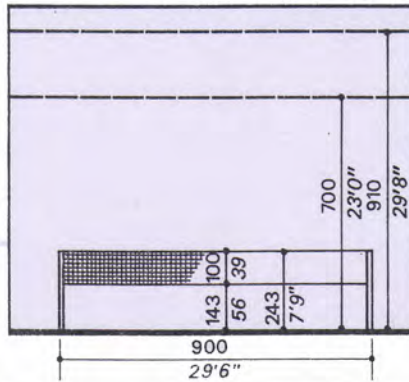
Figura 179. Dimensiones de una pista de basketball [34].

PISTA DE VOLLEYBALL

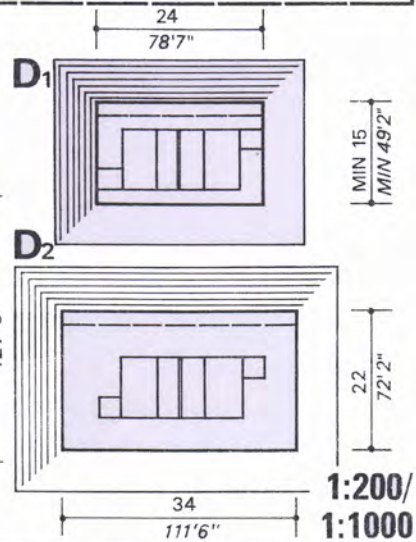
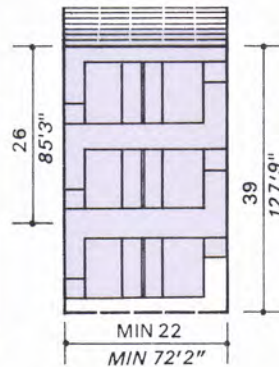


A

B



C

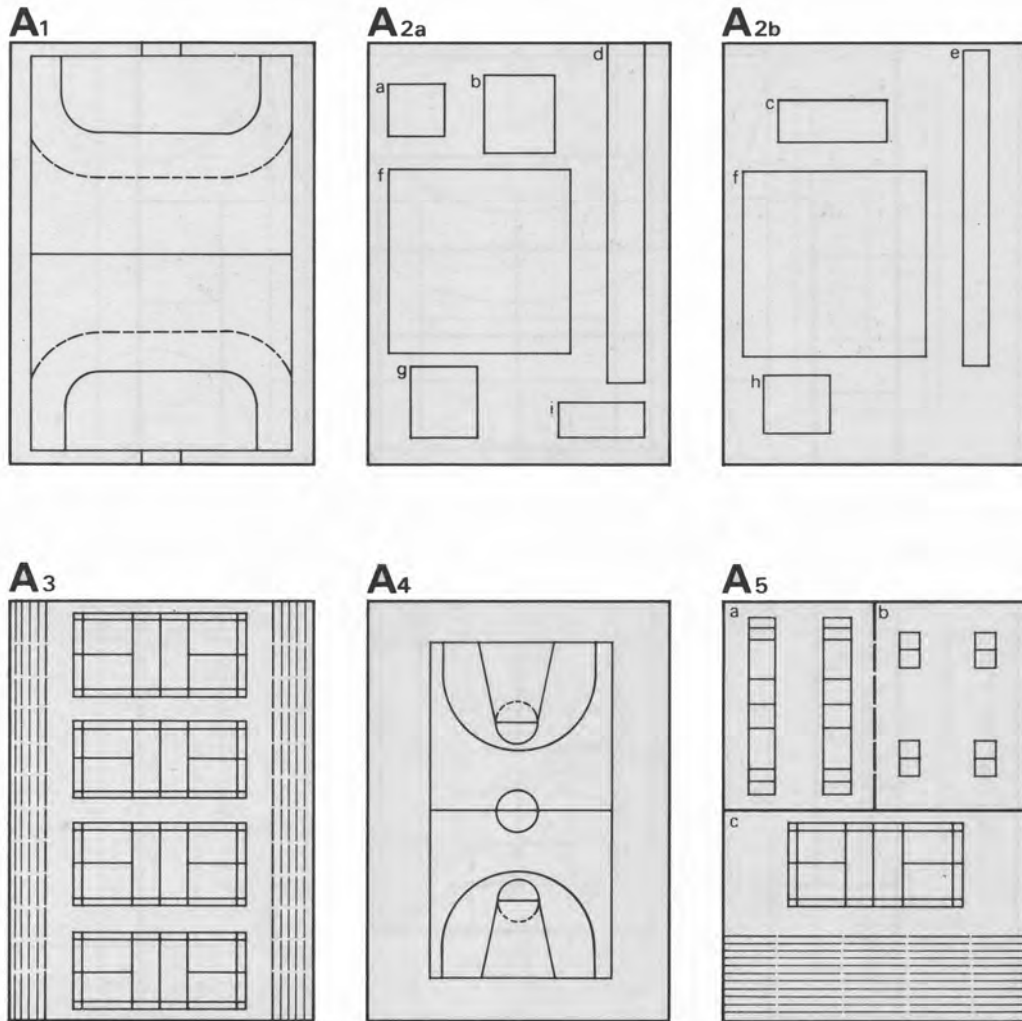


- A** Planta de la zona de juego.
- a** Pista, terreno de juego.
- b** Franja libre (internacionales).
- b1** Franja libre (torneos).
- c,c1** Jueces y banquillo de suplentes.
- B** Sección, con dimensiones de la red y alturas libres.
- C** Agrupación de varias pistas con sugerencia de colocación de asientos.
- D** Tamaños de pistas de competición.
- D1** Dimensiones mínimas.
- D2** Dimensiones para competiciones internacionales.

Nota. Deben evitarse los deslumbramientos sobre la pista, ya que los jugadores están mirando hacia arriba continuamente.

Figura 180. Dimensiones de una pista de volleyball [34].

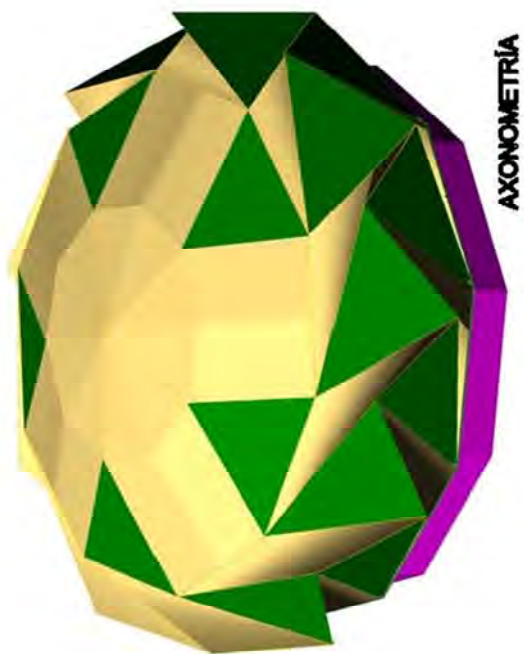
COMBINACIÓN DE ACTIVIDADES



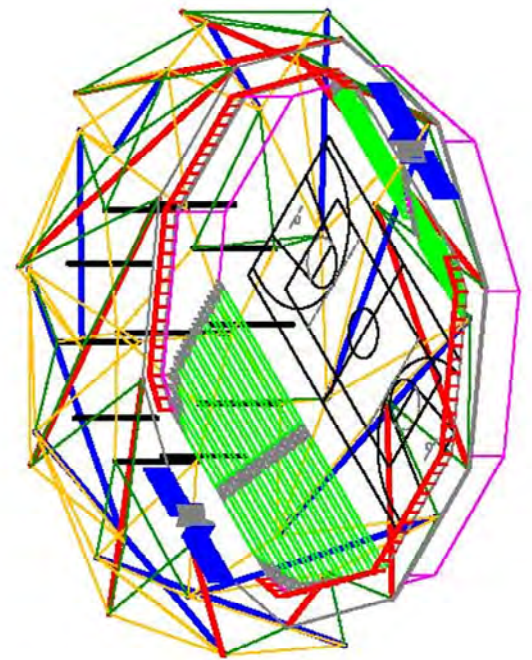
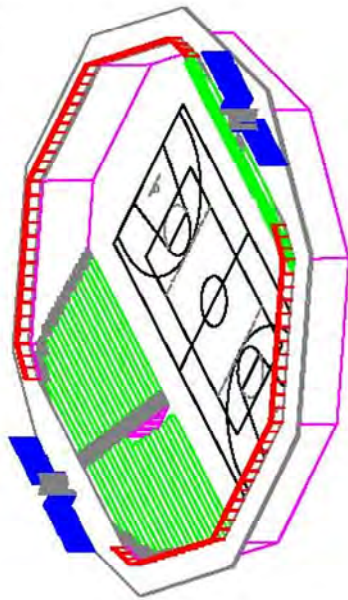
1:500

- A** Espacio de actividad (32×23 m / $104'9'' \times 75'4''$ = 736 m² / 7922 pies²). Altura recomendable: 7,6-9,1 m / $24'9''$ - $29'8''$.
- A1** Pista de balonmano (30×20 m / $98'4'' \times 65'6''$).
- A2** Gimnasia.
- a** Gimnasia masculina (práctica/entrenamiento) equipada como espacio grande de actividad (véanse Fichas 2.13 y 2.14).
- b** Gimnasia femenina (práctica/entrenamiento) equipada como espacio grande de actividad (véanse fichas 2.13 y 2.14).
- A3** 4 pistas de badminton.
- A4** Pista de baloncesto (26×14 / $85'3'' \times 45'9''$).
- A5** Combinación.
- a** 2 pistas de esgrima.
- b** 4 mesas de tenis de mesa (torneos normales).
- c** Pista de badminton con gradas de asientos.

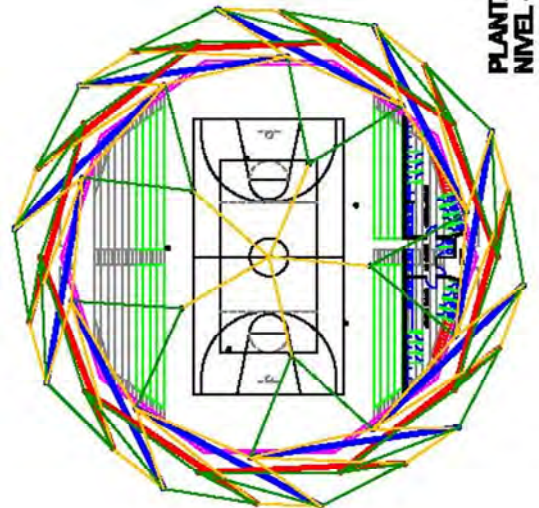
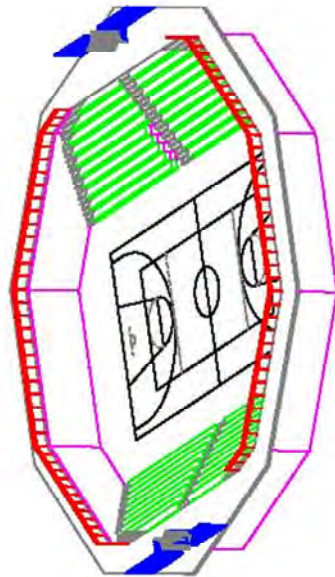
Figura 181. Dimensiones de una pista con actividades combinadas [34].



AXONOMETRÍA



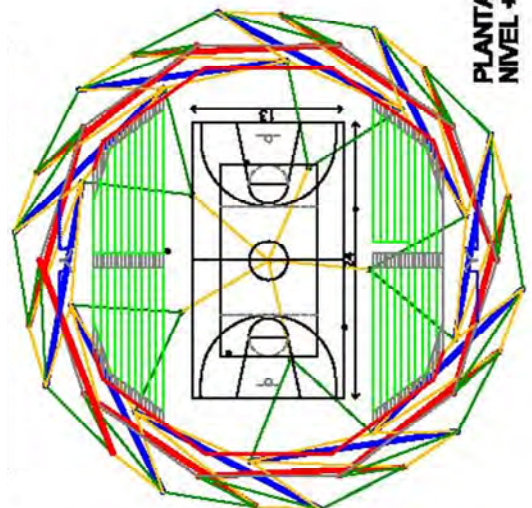
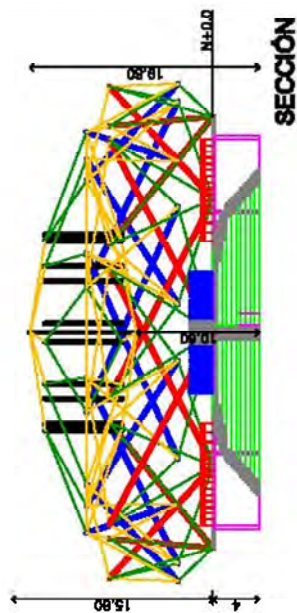
ALZADO



PLANTA
NIVEL - 4.00



PLANTA



PLANTA
NIVEL + 0.00

Figura 182. Plantas, alzado, sección y axonometrías del proyecto.

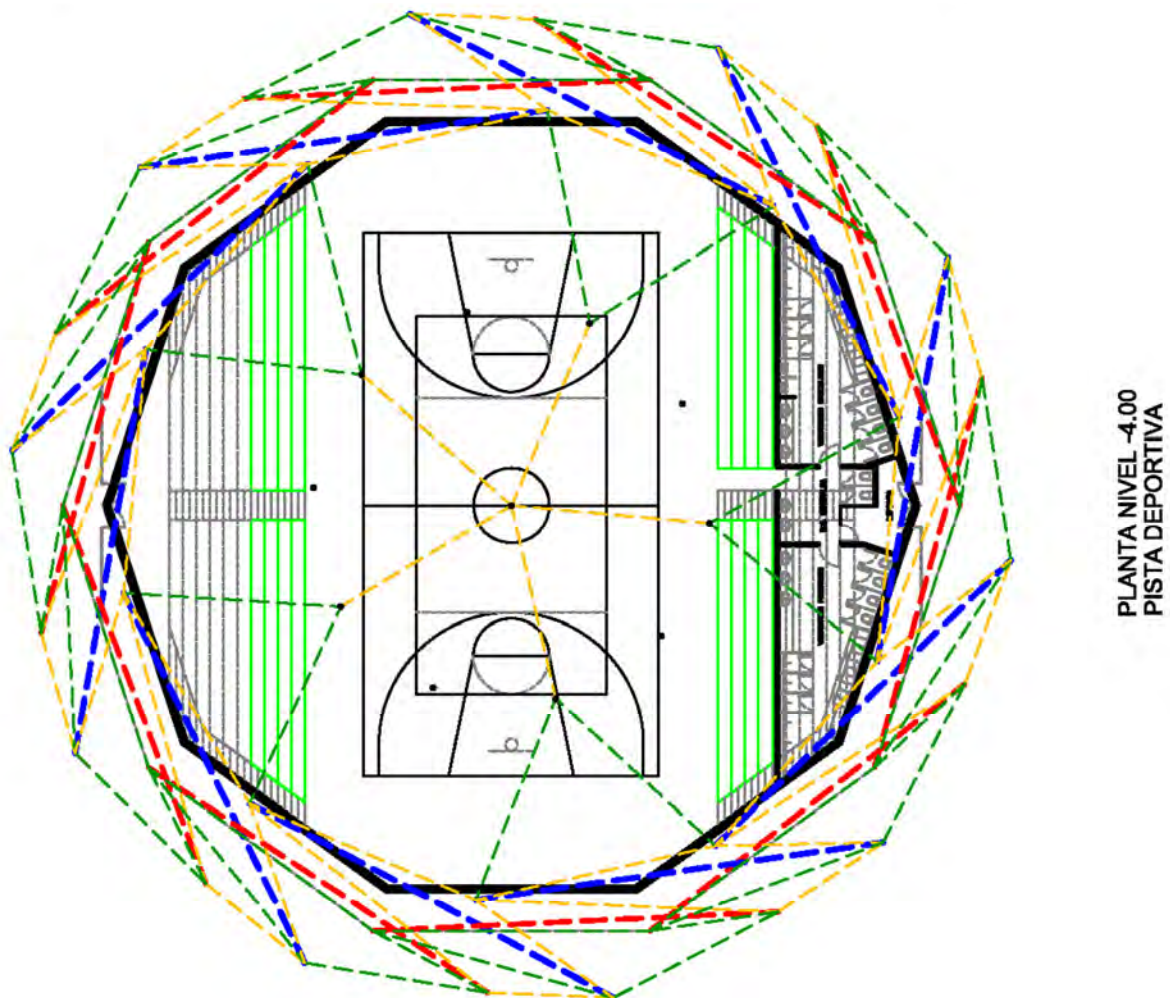
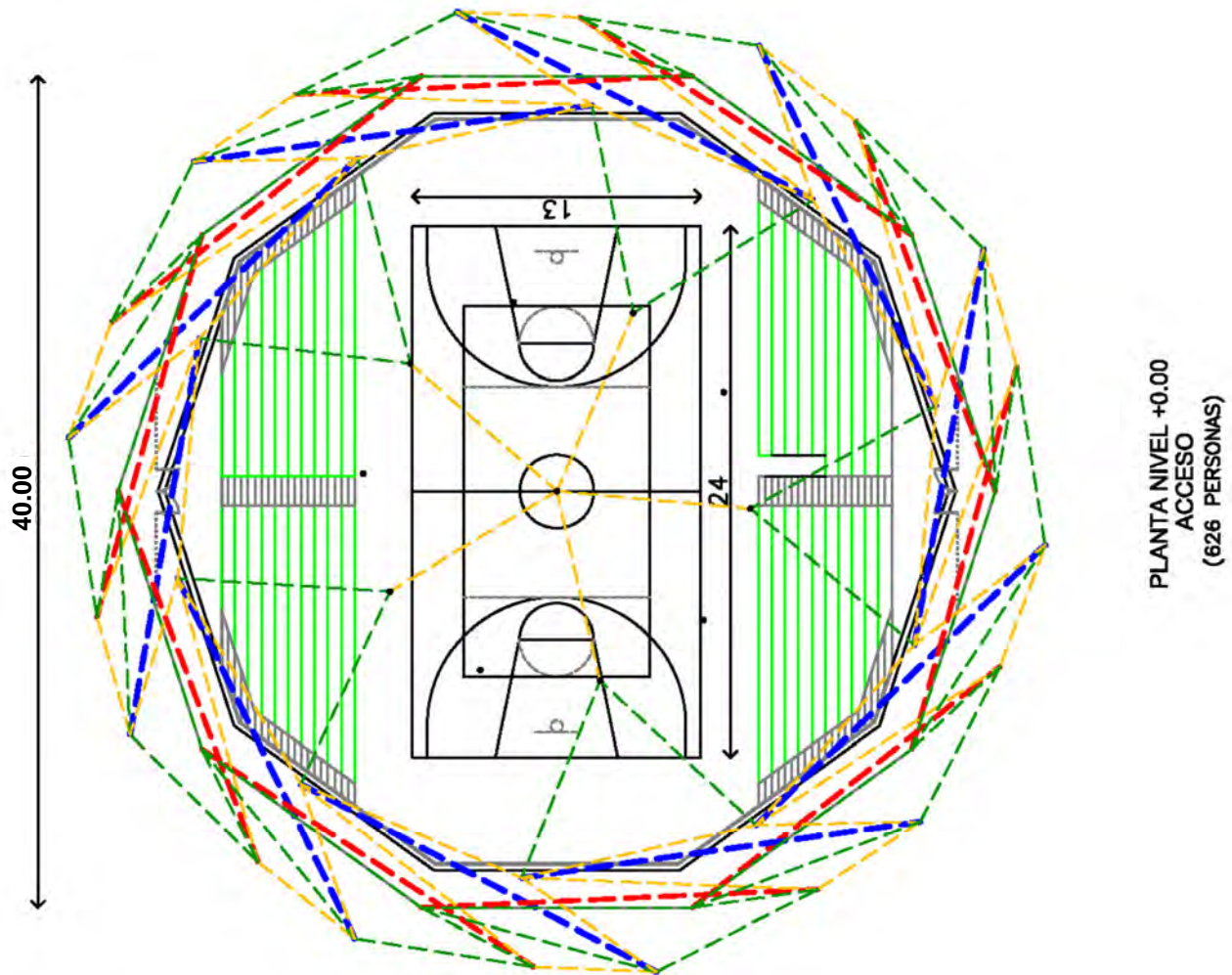


Figura 183. Plantas arquitectónicas del proyecto.

PATRONES DE LA ESTRUCTURA

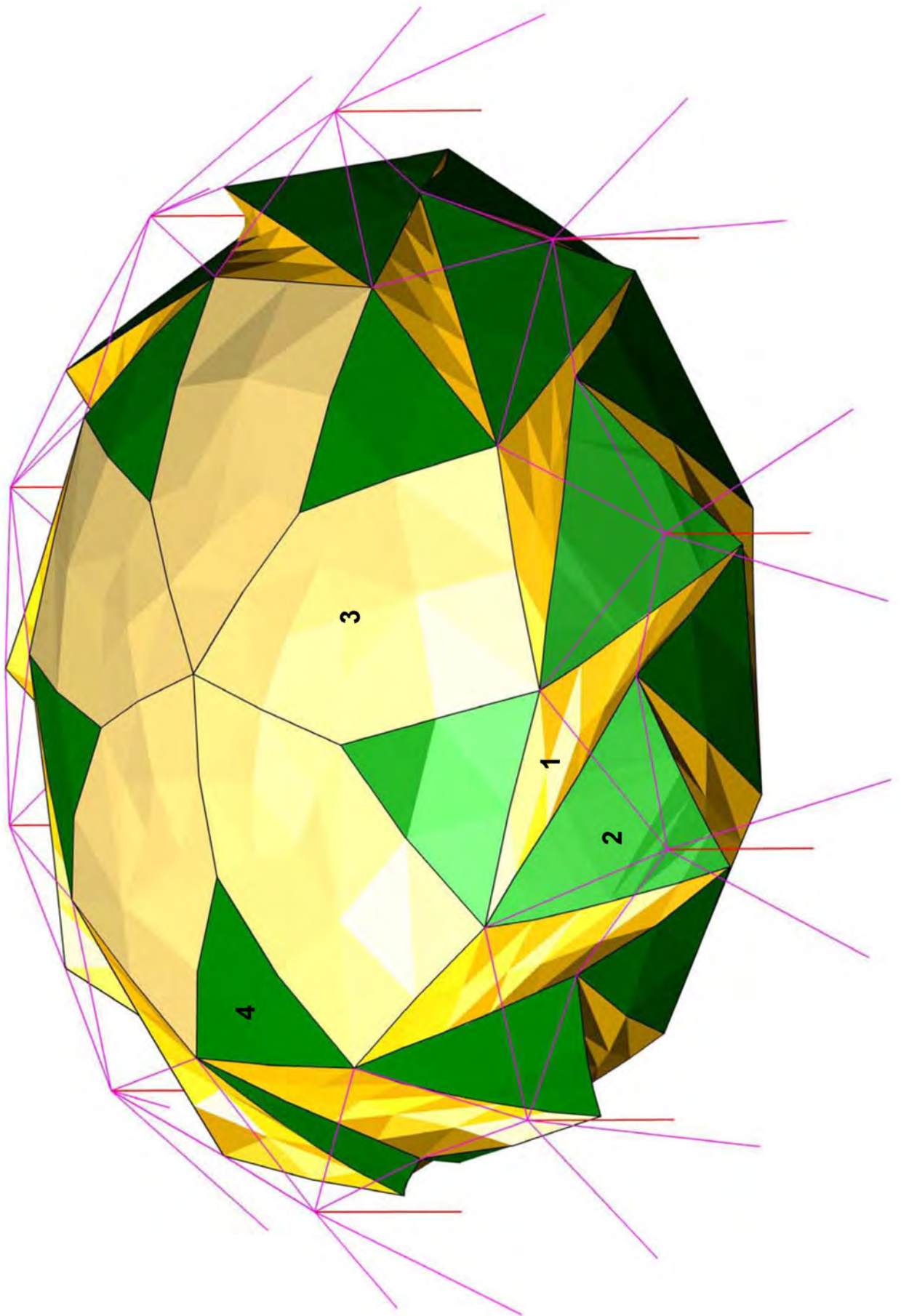


Figura 184. Axonometría - Patrones de la estructura.

PLANOS DE LA PROPUESTA 4.1.3

Después del análisis de pistas deportivas para nuestro proyecto proponemos una pista que puede ser usada para basketball, volleyball o actividades combinadas como lo vimos en las figuras 179,180,181.

Descripción del proyecto

El polideportivo está formado por un anillo que actúa como cerramiento exterior o marco estructural que soporta el domo central o cubierta en tensegrity y a su vez cierra el espacio. La estructura final es un domo completamente en tensegrity, esto quiere decir que todos sus elementos de compresión (barras) están equilibrados por la tensión de los elementos a tracción, en este caso la membrana que cierra el sistema y completa el equilibrio del mismo. (Fig.182,183,184)

El espacio interior es una planta en forma de decágono, de 40 metros de diámetro, libre de cualquier elemento de soporte que interfiera con lo diáfano del espacio de aproximadamente 1.200 m². El diseño final es una pista deportiva rectangular con graderías lineales que definen la pista central.

El proyecto se desarrolla en 2 niveles. En el nivel -4.00 encontramos la demarcación de la pista de basketball y volleyball, la zona de servicios, baños, vestidores, circulaciones, áreas auxiliares para los deportistas y el inicio de las graderías.

En el nivel +0.00 que corresponde al nivel de calle encontramos el acceso al proyecto, las circulaciones respectivas para la distribución en las graderías y la vista general de la pista. La altura libre para el desarrollo de la actividad deportiva es de 10.60 m.

El aforo general del proyecto es de 626 personas aproximadamente, este resultado demuestra como este proyecto responde a la gran necesidad de estructuras para cubiertas capaces de cubrir grandes superficies libres.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4.2

1. La conclusión general de este capítulo es que por el área libre de casi 1.200 m² y aforo de aproximadamente 626 personas, podemos usar el prototipo propuesto, el domo en tensegrity, como un espacio polivalente en el que se pueden realizar las siguientes actividades:
 - Recreativas: salas de conciertos.
 - Culturales: centro de convenciones o reuniones, salas de exposiciones, etc.
 - Deportivas: pistas deportivas, etc.
2. Se propone específicamente un polideportivo en el cual se pueden practicar los siguientes deportes:
 - Bádminton
 - Basketball
 - Boxing
 - Críquet
 - Levantamiento de pesas
 - Judo
 - Netball (basketball femenino)
 - Halterofilia
 - Gimnasia rítmica
 - Lucha grecorromana
 - Baile
 - Ping-pong
 - Trampolling
 - Volleyball
3. Y se desarrolla el diseño específico para una pista de:
 - Basketball
 - Volleyball
 - Actividades combinadas:
 - Gimnasia
 - Esgrima
 - Ping-pong
 - Bádminton

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 4.3

- [31] ILEK, Tensinet, Tectextil, *Folleto del concurso internacional de estudiantes "Estructuras Textiles para Nuevos Edificios 2011"* Messe Frankfurt - Alemania, 2011.
- [32] Plazola, A., *Arquitectura deportiva, juegos, deportes y diversión*. Limusa Wiley S.A., Méjico, 1998.
- [33] Neufert, E., *Arte de proyectar en arquitectura*. Gustavo Gili, Méjico, 1990.
- [34] Crane, R. y Dixon, M., *Colección dimensiones en arquitectura: Espacios deportivos cubiertos*. Gustavo Gili, Méjico, 1992.

CAPÍTULO 5. **CONCLUSIONES**

RAZÓN DE SER DE ESTA TESIS 5.1
CONCLUSIONES RELEVANTES 5.2
REFLEXIONES PERSONALES 5.3
INVESTIGACIÓN A FUTURO 5.4

CONCLUSIONES 5.

RAZÓN DE SER DE ESTA TESIS 5.1

La razón de ser de esta tesis es que el tema del tensegrity es relativamente **nuevo**, en general si lo comparamos con otros sistemas estructurales hay poca investigación. Este tipo de estructura tuvo su origen en el año 1921 en la exposición del primer grupo de constructivistas en Rusia, desarrollado por Karl Ióganon. Sus primeras aplicaciones fueron artísticas, en los años cuarentas Snelson y Fuller buscaron aplicaciones más complejas pero sólo fue hasta los sesentas que tuvieron un uso arquitectónico en domos, como se explicó en el capítulo de los antecedentes.

Mi interés por el tema además de ser nuevo y de haber poca investigación es que las estructuras tensegrity por su composición geométrica y estructural son estructuras muy interesantes y complejas, visualmente son muy llamativas, es increíble ver como las barras se mantienen suspendidas, casi en el aire, por la tensión de los cables o las membranas, como lo explico Fuller con su célebre frase: “pequeñas islas de compresión en un mar de tensión” o como lo reflejan las obras escultóricas de Snelson.

TESIS – HIPÓTESIS

El aporte al conocimiento de esta investigación, principalmente fue buscar una aplicación arquitectónica, integrando los principios del tensegrity, sus características, con las construcciones textiles atirantadas. Y se logró como se demostró en el desarrollo de los diferentes capítulos, que es posible el uso de las estructuras **completamente en tensegrity** en espacios de grandes luces y libres de soportes interiores y que estructuralmente responden a las necesidades de rigidez y equilibrio. Con lo cual respondimos a nuestra **hipótesis**: **¿Es posible la Aplicación de los Principios del Tensegrity a las Construcciones Textiles Atirantadas? SI.**

UTILIDAD

La utilidad de esta tesis además de su aplicación arquitectónica para espacios de grandes luces, libres de soportes interiores, con un uso recreativo, cultural o deportivo, es que abre el interés en el tema para investigación futura, por medio de la ayuda de nuevos programas informáticos, que los investigadores están desarrollando para terminar de entender su comportamiento estructural.

La metodología planteada se anota también como un aporte al conocimiento porque de manera clara se definieron los puntos básicos para poder proponer y analizar una estructura espacial ligera con membranas textiles. La metodología aplicada se basó en:

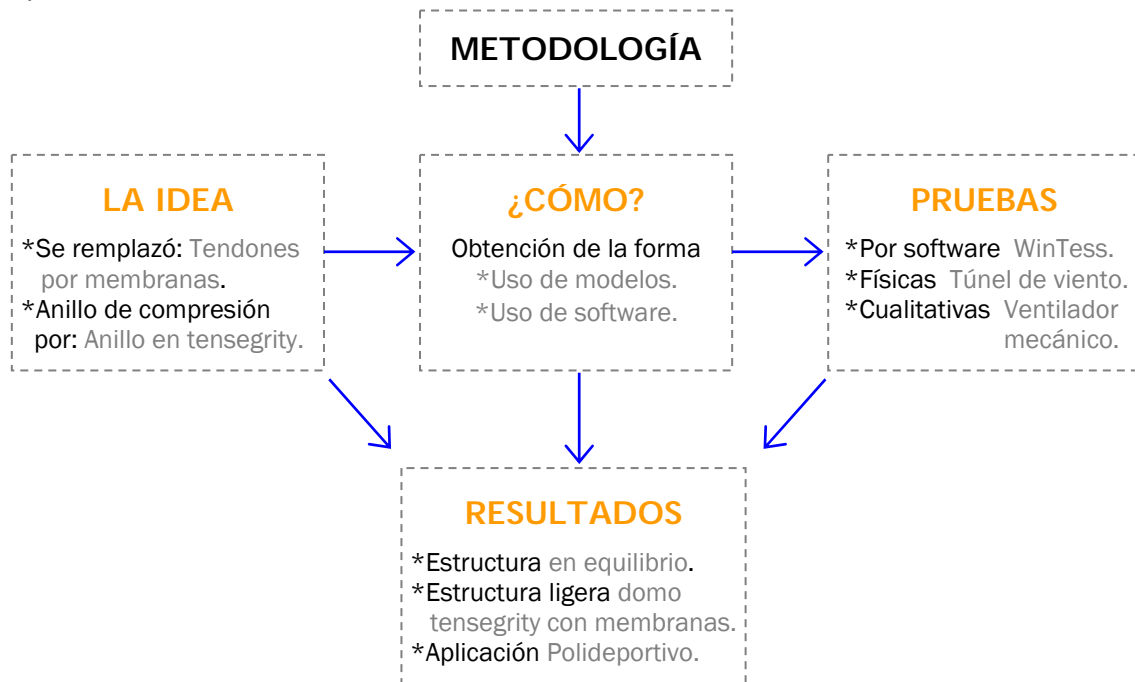


Figura 185. Esquema de la metodología

OBJETIVOS CUMPLIDOS

También podemos afirmar que se cumplieron los objetivos generales y específicos como lo explicaremos más adelante; que la metodología planteada y aplicada ayudó a demostrar nuestra tesis.

Dentro de los objetivos generales se cumplió con el objetivo principal:

- de crear un interés general en este tipo de estructuras,
- de entender el sistema y su aplicación arquitectónica,
- se profundizó en los estudios realizados por otros investigadores,
- se definieron los principios del tensegrity,
- sus características y cómo se podían aprovechar en las construcciones textiles atirantadas y en el comportamiento estructural del sistema.

En los objetivos específicos:

- se demostró la importancia del tremendo poder de los modelos físicos a escala para entender estas estructuras espaciales tan complejas,
- se logró construir los modelos a escala para entender de manera práctica los principios del tensegrity, su funcionamiento físico y estructural,
- se construyeron casi 70 modelos usando cables, membranas y diferentes materiales,

- se desarrollo el proceso de obtención de la forma basado en la geometría,
- se propuso una nueva tipología de tensegrity remplazando los cables tradicionales por las membranas,
- se desarrolló un sistema estructural teniendo componentes ligeros, el resultado fue un domo completamente en tensegrity creado con barras, cables y membranas,
- se definieron sus características, su trabajo a compresión (barras) y a tracción (cables y membranas),
- se analizó el equilibrio del sistema y distribución de cargas del mismo,
- su comportamiento estructural ante su propio peso, pretensado y cargas externas como viento y nieve, por medio del software WinTess,
- se realizaron pruebas experimentales como el túnel de viento y ventilador mecánico que validaron el funcionamiento del sistema, del domo tensegrity propuesto.

CONCLUSIONES RELEVANTES 5.2

Después del estudio desarrollado a través de esta tesis doctoral podemos concluir lo siguiente:

- La contribución clave de este prototipo en el campo de las estructuras ligeras es que es la primera vez que un anillo tensegrity ha sido utilizado en lugar de un anillo de compresión, para generar un domo en puro tensegrity. Ninguna de las barras que conforma el sistema se toca entre sí y las mismas se equilibran directamente por la pretensión de la membrana.
- Las estructuras tensegrity son una opción para cubrir espacios de grandes luces, en nuestro caso arenas deportivas. Después hacer los cálculos pertinentes se propone un anillo completamente en tensegrity con un domo central, usando la tipología del modelo con patrón en membrana en forma de diamante con barras en una doble capa, para cubrir un polideportivo de 40m de diámetro, que tiene una superficie de casi 1.200m² y puede ser ocupada por aproximadamente 626 personas.

Geométricas y obtención de la forma

- Obtención de la forma, relación directa entre la forma y la geometría.
- Se resuelve el equilibrio del sistema por medio de la obtención de la forma, método constructivo y las posibilidades de pretensión. Proponiendo modelos en membrana continua y patrón en diamante con barras en capa sencilla y doble capa.

Estructurales

- Según el esquema de mayores tensiones es importante clasificar y dimensionar los elementos que conforman la estructura, barras, cables externos (vientos), cables de borde (relingas), membrana, etc. y además se debe aplicar un coeficiente de seguridad como lo demostró el software WinTess.
- La dificultad de estos sistemas es que aunque estén equilibrados por sí mismos ante cargas externas como viento y nieve hay que reforzarlos por medio de barras exteriores que ayudan al sistema para que no colapse ante condiciones extraordinarias.
- La pretensión del sistema se logra por medio de la membrana y de elementos externos como tubos y cables (vientos).
- Nuestras pruebas iniciales con el WinTess y los coeficientes de presión hallados en el túnel de viento, demostraron que era necesario re-optimizar los elementos estructurales para construir una estructura en el mundo real.
- Al analizar la estructura formada sólo por cables, o sólo con membrana, o la estructura formada por cables y membrana, probada ante cargas de viento, peso propio, pretensión y cargas de nieve se llegó a la conclusión que se observaron mayores desplazamientos antes de que la estructura fuera reforzada con tubos y cables externos. Los desplazamientos de la carga de viento bajaron de 950 mm hasta 179mm, en los nudos libres de las barras superiores del anillo tensegrity.
- Se concluyó que la estructura propuesta responde aerodinámicamente a cargas de viento, pero no es óptima para zonas que experimenten fuertes nieves los desplazamientos ante una carga de nieve de 50Kg/m fueron de casi 600 mm.
- También se demostró con la prueba del ventilador mecánico y el análisis cualitativo, que los resultados hallados al compararlos con los coeficientes de presión del túnel de viento tienen un comportamiento similar. En general en la estructura se producen presiones a barlovento y succiones a sotavento.
- También se compararon los coeficientes de presión hallados en el túnel de viento con los valores que recomienda el Código Europeo de Viento y nuestros resultados son coherentes con lo que recomienda el código.
- Para concluir podemos afirmar que este estudio es el primer paso en el proceso de construir el modelo propuesto en el mundo real. Para construir el prototipo es necesario hacer mayores estudios entre ellos el análisis dinámico de viento, el desarrollo de los detalles constructivos, realizar un modelo a mayor escala, etc. para poder realizar un proyecto completo que se pueda ejecutar en la realidad.

REFLEXIONES PERSONALES 5.3

Después de ver el resultado de la tesis y su contenido gráfico y visual, creo ayudará al interés por este tema tan complejo y apasionante.

Una de las mayores reflexiones personales es la satisfacción de ver realizados los modelos físicos, que en un inicio pensé sería incapaz de construir, pero como todo en la vida este es un proceso de aprendizaje; la satisfacción de ver los 70 prototipos son un orgullo personal.

El resultado del arduo y motivante trabajo también se vio reflejado en el modelo final, la tipología No.4 “Patrón en diamante con membrana y malla con veinte barras en doble capa” y cuya aplicación con el nombre de “Anillo tensegrity para una arena deportiva” recibió el segundo lugar en la categoría de Macro Arquitectura en el concurso internacional de estudiantes “*Estructuras Textiles para Nuevos Edificios 2011*” dentro del marco de la Feria de Frankfurt – Alemania, TechTextil y cuyos asesores académicos fueron los prestigiosos Prof. Dr.-Ing. Werner Sobek y Dipl.-Ing. Clemens Freitag.

Como parte del trabajo realizado durante el desarrollo de esta tesis doctoral, tuve la oportunidad de asistir y de participar en diferentes congresos internacionales y hacer publicaciones en revistas técnicas relacionadas con el tema de estudio.

Las cito en el siguiente párrafo:

- *Application of the tensegrity principles on tensile textile constructions.*
 - Publicado en la revista IJSS International Journal of Space Structures Vol.25 N°1. ISSN 0266-3511. Editor Rene Motro. Multi-Science Publishing Co. Ltda. UK., 2010.
Presentado en los congresos:
 - Textile Composites and Inflatable Structures IV – Structural Membranes. ISBN 978-84-96736-70-2, Cimne International Center for numerical Methods in Engineering. Editores E. Oñate, B. Kröplin. Stuttgart, Germany, 2009.
 - Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. ISBN 978-84-8363-459-2. 50th Anniversary Symposium of the International Association for Shell and Structures IASS. Editores A. Domingo y C. Lázaro. Valencia, España, 2009.
- *Application of the tensegrity principles on tensile textile constructions: formfinding and analysis.*
Revista IASS International Association for Shell and Structures. Vol.52 No.2 ISSN 1028-365X, 2011.

- *Formfinding and structural analysis of a tensegrity dome.*
 - Publicado en el libro de Tensinet Symposium - Tensile Architecture: Connecting Past and Future. Editores Heidrun Bögner-Balz y Marijke Mollaert. ISBN 978-90-9025666-5. UACEG University of Architecture Civil Engineering and Geodesy. Sofia, Bulgaria, 2010.
 - Presentado en el congreso: Spatial Structures - Temporary and Permanent. ISBN 978-7-112-12504-3. International Symposium of the International Association for Shell and Structures IASS. Editores Q. Zhang, L. Yang, Y. Hu. Shanghai, China, 2010.
- *Tensegrity for a sports arena.*
Publicado en el libro de SEWC Structural Engineers World Congress. Impreso por L.E.G.O. spa - Como, Italia, 2011.
- *Tensegrity ring for a sports arena: formfinding & testing.*
Presentado en el congreso: Textile Composites and Inflatable Structures V – Structural Membranes. Cimne International Center for numerical Methods in Engineering. Editores E. Oñate, B.Kröplin and K.-U.Bletzinger. Barcelona, España, 2011.

Sólo me resta decir que el trabajo desarrollado en esta investigación, no se hubiera podido lograr sin el apoyo, el conocimiento y el entusiasmo de profesores tan valiosos para los estudiantes de la Universidad Politécnica de Catalunya como Josep I. Llorens, Ramon Sastre, Daniel Crespo y Joshua Martínez, que con su generosa ayuda contribuyeron al resultado de esta tesis doctoral.

INVESTIGACIÓN A FUTURO 5.4

No se puede terminar esta tesis sin dejar abierta una visión a futuro. Esta investigación podría ser el punto de partida de otros estudios teóricos y prácticos sobre las estructuras ligeras: estructuras tensegrity y construcciones textiles atirantadas.

A termino personal somos concientes que el estudio realizado en esta tesis doctoral, como se concluyó anteriormente es el primer paso en el proceso de construir el modelo propuesto en el mundo real.

Para ello es necesario hacer mayores estudios entre los cuales, uno de los primordiales es el **análisis dinámico de viento, estudio de frecuencia del viento**, el estudio estático realizado, demostró valores favorables, pero sabemos que las estructuras tensegrity son susceptibles a la vibración.

Los efectos dinámicos del viento sobre las estructuras constituyen siempre un fenómeno de difícil tratamiento desde el punto de vista del cálculo. En este sentido la Norma estructural EN-1991 (Eurocódigo 1) ofrece un completo tratamiento de este tipo de cargas y sus efectos sobre las estructuras. Para este análisis futuro se propone construir un detallado modelo de elementos finitos y con la ayuda de herramientas informáticas, se llevará a cabo un riguroso tratamiento de las acciones del viento, sus efectos dinámicos según la Norma de referencia EN-1991 para poder controlar los desplazamientos y los efectos de la vibración producidos por el viento sobre la estructura.

Como siguiente paso se propone el **desarrollo y cálculo de los detalles constructivos** del modelo y su **montaje constructivo** en el mundo real. Desde ya hemos definido nueve detalles a desarrollar, denominados **D1 a D9**.

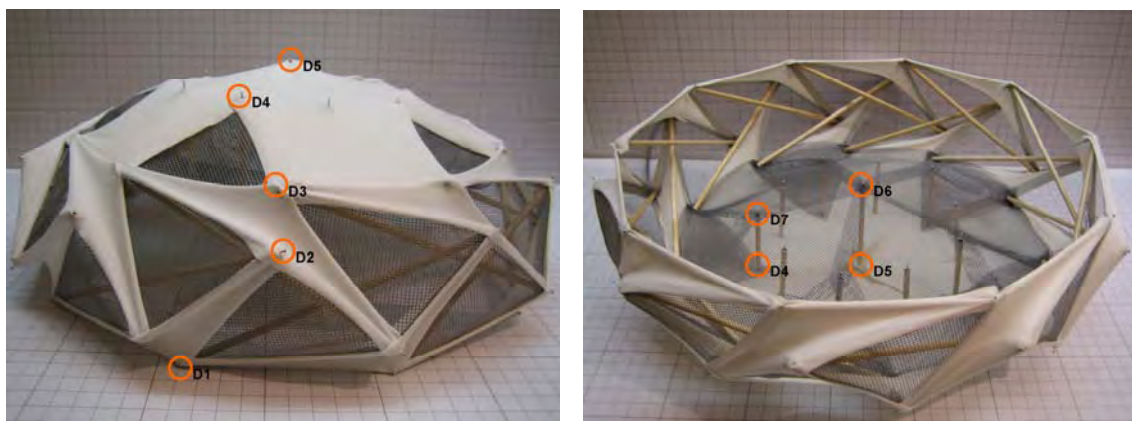


Figura 186. Detalles constructivos exteriores e internos del domo tensegrity.

- El D1 corresponde a las barras que se fijan al suelo, a los nudos del apoyo.
- El D2 corresponde a las barras del primer nivel del anillo, a los nudos libres del anillo.
- El D3 corresponde a las barras del segundo nivel del anillo, a los nudos libres que se unen con el domo superior.
- El D4 corresponde a la parte superior de los mástiles menores.
- El D5 corresponde a la parte superior del mástil principal.
- El D6 corresponde a la parte inferior del mástil principal.
- El D7 corresponde a la parte inferior de los mástiles menores.
- El D8 corresponde a la parte superior de los mástiles exteriores auxiliares.
- El D9 corresponde a la parte inferior de los mástiles exteriores auxiliares.

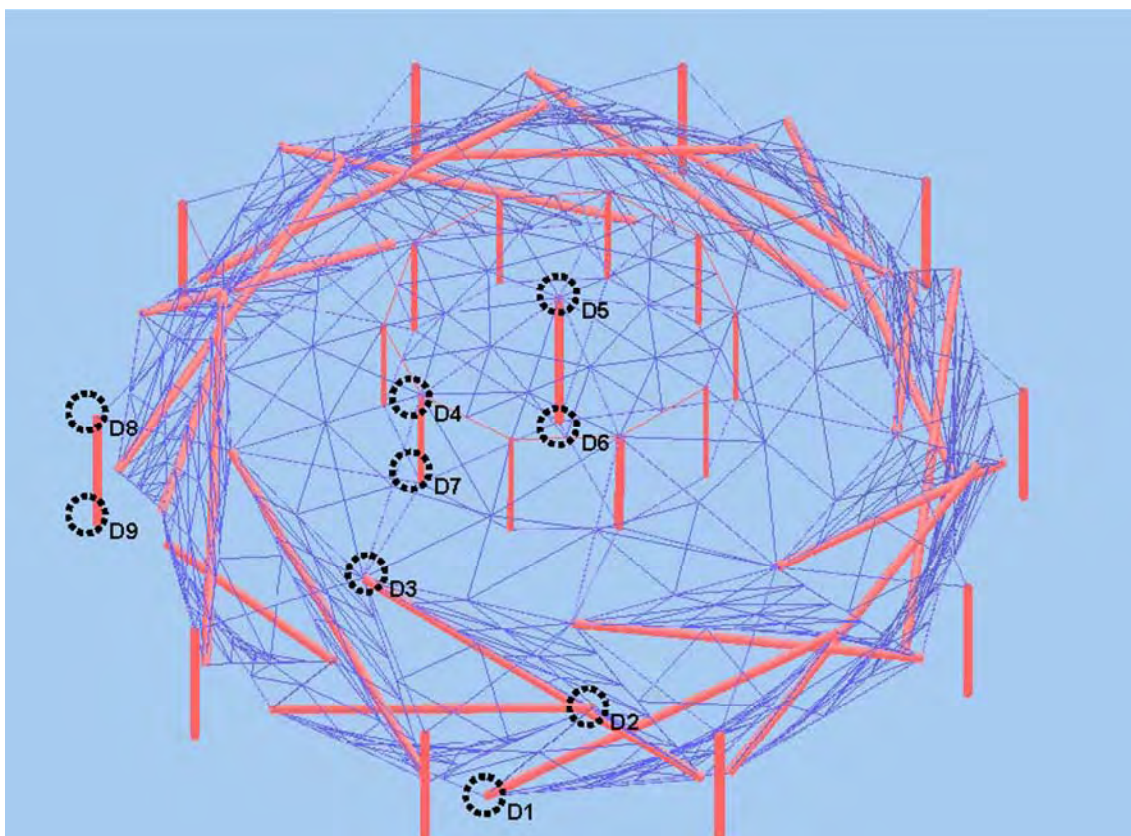


Figura 187. Detalles constructivos D1 a D9.

Y para finalizar con el fin de potenciar la aplicación y construcción de estos sistemas se plantea, un sistema de corta ejecución, de rápido y fácil montaje, además lo anterior se vería reflejado en una reducción de costes gracias al ajuste de los tiempos de ejecución. Con ello se quiere crear un interés por parte de las empresas relacionadas, que vean como esta tipología de estructura tensegrity tiene grandes ventajas sobre las estructuras tradicionales, como lo son:

Ligera, sostenible, económica, de fácil montaje y desmontaje es decir, que tiene un impacto mínimo sobre los recursos naturales, al mismo tiempo que ofrece el máximo confort a sus usuarios. Nuestra estructura por lo tanto no sólo ayudará a proteger el medio ambiente, sino también a mejorar la calidad de bienestar humano y su productividad. El resultado es un equilibrio perfecto de impacto ambiental, de beneficio social y eficiencia de las inversiones de capital.

BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA

A-A

- Ambrose J., *Análisis y diseño de estructuras*. Limusa. D.F.Mexico, 1998.
- Averseng, J., *Interactive design and dynamic analysis of tensegrity systems*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.

B-B

- Berger H., *New developments in lightweight dome structures*. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, vol. 30, n.101, 135-145. IASS Madrid,1989.
- Berger H., *Tensile structures highlight new Denver airport*. Bulletin of the international association for shell and spatial structures. Vol. 35, n. 115, 2/94 p. 110-116, 1994.
- Berger H., *Light Structures-Structures of Light. The Art and Engineering of Tensile Architecture*. Verlag. Basel, Birkhäuser, 1996.
- Bieniek Z., *Chosen Ideas of Geometrical Shaping of Modular Tensegrity Structures* Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011
- Bonet J., Mahaney J., *Form finding of membrane structures by updates reference method with minimum mesh distortion*. University of Wales, UK. International Journal of Solids and Structures, No.38, pp. 5469-5480, 2001.
- Bubner E., *Membrane Construction Connection Details*. Gmbh. Druckerei Wehlmann, 1997.
- Burkhardt, R.W., *A Practical Guide to Tensegrity Design*. Software Services Cambridge, USA, 1994.

C-C

- Calatrava S., *La plegabilidad de los entramados en Arquitectura Transformable*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, pag. 35-124, 1980.
- Calladine, C.R., *Buckminster Fuller's tensegrity structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames*. International Journal of Solids and Structures 14, pp. 161-172, 1978.
- Campesato A. *Tensegrity Cad: A new methodology in computer aided design to form find tensegrity systems*. Spatial structures - Temporary and permanent. IASS International Association for Shell and Structures. Symposium Shanghai, China, 2010.
- Capasso A., Majowiecki M., Pinto V., *Le tensostrutture a membrana per l'architettura*. Maggioli Editori. Rimini, 1993.
- Crane, R. y Dixon, M., *Colección dimensiones en arquitectura: Espacios deportivos cubiertos*. Gustavo Gili, Méjico, 1992.
- Chaplin F., *The technology of suspended cable net*. Construction Press, UK. 1984.

D-D

- Dalland T., Goldsmith N., *FTL Softness movement and light*. Academy Editions. Chichester (UK), 1997.
- Dalilsafaei S., *Application of Flexibility Analysis for Design of Tensegrity Structures*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.
- Defossez M., *Shape memory effect in tensegrity structures*. Montreal, Canada, Mechanics Research Communications, No. 30, pp. 311-316, 2003.
- Deifeld T., Pauletti R., *Um breve estudo sobre as estruturas tensegrity*. Universidade de Sao Paulo, abstract pp. 1-12, 2003.
- Delarue J. M., *Minimal folding tensegrity configurations*, Villemin School of Architecture, Paris. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 34, No.113, pp. 211-220, 1993.
- Dent R. N., *Arquitectura neumática*. Editorial Blume. Barcelona, 1975.
- Drew P., *Tensile Architecture*. Granada Publishing Limited. London, 1979.

E-E

- Emmerich D. G., *Structures Tendues et Autotendantes*, Ecole d'Architecture de Paris La Villette, 1988.
- Emmerich D. G., *On-self tensioning structures*. International Journal of Space Structures, Vol. 11, No.1, pp. 29-36, 1996.
- Emmerich, D.G. *Reseaux*. International Conference on Space Structures, University of Surrey, 1966.
- Emmitt S., *Architectural Technology*. Blackwell Science. UK, 2002.
- Escrig F., *Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas: I, II y III*. RE: revista de edificación N°. 11 p. 9-19, mayo 1992.
- Escrig F. *Sistemas ligeros autopretensados utilizados en la EXPO'92 de Sevilla*. Hormigón Y Acero. N. 186 p. 55-101 (1er Tri.1993).
- Escrig F., *La Cúpula autotensada o el triunfo de la levitación*. Hormigón y Acero. N° 187, p. 95-112 (2° Tri. 1993).
- Escrig F., *Mobile and Rapidly assembled structure vol. I and vol.II*. Mechanis Publications. Sevilla, 1995.
- Escrig F., *Cubiertas tensadas enmarcadas*. Hormigón Y Acero N° 195 p. 153-158, 1995.
- Escrig F., *La Cubierta desplegable de la piscina de San Pablo de Sevilla*. Hormigón y Acero. N° 199 p. 85-114 (1° Tri. 1996).
- Escrig F., *La Cubierta*. Hormigón y Acero. N° 201, p. 103-114 (3° Tri. 1996).

F-F

- Fischer R., *Engineering for architecture: An Architectural record book*. McGraw-Hill. New York, 1980.

- Fisel D., *Proposition of an index description system for geometric and mechanical properties of spatial tensegrity structures*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.
- Foster B., Mollaert M., *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, Madrid: Munilla Lería, LD 2009.
- Fuller R.B., *Synergetics: explorations in the geometry on thinking*. Mac-Millan Publishing, New York, 1975.

G-G

- Gego, *Desafiant estructures*. Exposició Museo d'Art Contemporani de Barcelona, Enero 2007.
- Geiger D.H., *Roof structure*, U.S. Patent No. 4,736,553, Abril 12, 1988.
- Glaeser L., *The work of Frei Otto*. The Museum of Modern Art. New York, 1972.
- Goldberger P., *La Medida del tiempo : Richard Rogers, la Cúpula del Milenio en Londres*. Arquitectura viva. Nº 62, p. 22-27, (Sep.-Oct. 1998).
- Gómez Jauregui, V., *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*. Master Thesis in Architecture, Queen's University Belfast -UK. 2004.
- Gómez Jauregui V., *New Configurations for Double-Layer Tensegrity Grids*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.
- Gründig L., *An example of the static-analitical computation for a suspended model. IL-10*. Institute for Lightweight Structures, pag.184-221. Stuttgart, 1974.
- Gutiérrez E. M., Pérez J. B., *Generation of foldable domes formed by bundle modules with quadrangular base*. Departament of Technology of Construction of A. Coruna University. Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 43, No.140, pp. 133-141, 2002.

H-H

- Hanaor A., *Double layer tensegrity grids: geometric configuration and behaviour*. Edited by H. Nooshin, Studies in Space Structures, Multiscience, 1991.
- Hanaor A., *Aspects of design of double layer tensegrity domes*. International Journal of Space Structures, Vol. 7, No. 2, pp. 102-113, 1992.
- Hanaor A., *Geometrically rigid double layer tensegrity grids*. International Journal of Space Structures, Vol. 9, No. 4, pp. 227-238, 1994.
- Happold E., *Calculation of the Shell. IL-13*. Multihalle Mannheim. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart, pag. 60-98,1976.
- Herzog T., *Construcciones neumáticas: manual de arquitectura hinchable*. Gustavo Gili, Barcelona, 1977.

I-I

- ILEK, Tensinet, Techtexil, *Folleto del concurso internacional de estudiantes "Estructuras Textiles para Nuevos Edificios 2011"* Messe Frankfurt - Alemania,2011.
- Ingber D., *The architecture of life*. Scientific American, January 1998.
- Ishii K., *Membrane Structures in Japan*. SPS Publishing Company. Tokyo, 1995.
- Ishii K., *Form finding analysis in consideration of cutting patterns of membrane structures*. Yokohama National University, Japan. International Journal of Space Structures, Vol. 14, No. 2, pp. 105-119, 1999.

J-J

- Jérôme Q., *Mechanical behaviour of a foldable tensegrity ring: parametric study*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.

K-K

- Kadlcák J., *Statics of suspension cable roofs*: Jaroslav Kadlcák. RotterdamBrookfield, A.A. Balkema, Rotterdam 1995.
- Karl K., *Minimal nets*. Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke-IL, 1971.
- Kawaguchi M., Abe M., Tatemichi I., *Desing, test and realization of suspen-dome system*. Hosei University, Koganei, Tokyo. Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 40, No.131, pp. 179-192, 1999.
- Kawaguchi M., *Physical models as powerful weapons in structural design*. IASS International Association for Shell and Spatial Structures, Symposium Montpellier, 2004.
- Khala N. B., Moussa B., Ponds J. C., *Nonlinear dynamic analysis of tensegrity systems.*, Universite Montpellier II, Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 41, No.132, pp. 49-58, 2000.
- Kenner H., *Geodesic Math and How to Use It*. University of California Press, Berkeley, CA. 1976.
- Kim Y., Daeha P., Kihak L., Jaehong L. *Experimental study of girder members with under-tension cable system*. Spatial structures - Temporary and permanent IASS International Association for Shell and Structures. Symposium Shanghai, China, 2010.
- Kono Y., Choong K. K., Shimada T., Kunieda H., *An experimental investigation of a type of double layer tensegrity grids*. Kyoto University, Japan. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol.40, No.2, pp. 103-111, 1999.
- Kronenburg R., *Portable Architecture*. Architectural Press UK., 1996.

L-L

- Lalvani H., Albert. H.K., *A class of periodic deployable space frames using regular prismatic nodes*. Pratt Institute Brocklyn, New York, USA., Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 39, No.126, pp. 37-45, 1998.
- Lazarevi D., Gidak P., Uros M. *Tensegrity structure at the Dubrovnik airport: Idea and design*. Spatial structures - Temporary and permanent. IASS International Association for Shell and Structures. Symposium Shanghai, China, 2010.
- Lazzari M., Vitaliani R. V., Majowiecki M., Saetta A. V., *Dynamic behaviour of a tensegrity system subjected to follower wind loading*. University of Padova, Italia, Computers & Structures, No. 81, pp. 2199-2217, 2003.
- Levi M., *The innovation of lightness*, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 35, No.115, pp. 77-84, 1994.
- Levin S. M., *Continuos tension, discontinuos compression*. A model for biomechanical support of the body. The bulletin of structural integration, Vol. 8, No. 8, 1982.

- Levi M., *From Shell to membrane*. IASS International Association for Shell and Spatial Structures, Symposium Montpellier, 2004.
- Liapi K., *Tensegrity structures for the Hellenic Maritime Museum*. Evolution and trends in design, analysis and construction of shell and spatial structures. Symposium IASS Valencia, 2009.
- Liapi K., Anagnostopoulou C., *A portable and collapsible tens grity kiosk structure for use in open markets*. Spatial structures - Temporary and permanent. IASS International Association for Shell and Structures. Symposium Shanghai, China, 2010.
- Livesley R. K., *Matrix methods of structural analysis*. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- Llorens J., Soldevila A., *L'Envelat. Catálogo de exposición*. Ayuntamiento del Paret del Vallés, Paret del Vallés, 1985.
- Llorens J., *Ancoratges passius d'estructures traccionades*. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, 1986.
- Llorens, J., García Ch. y Pöppinghaus H., *Tensegrity Structures for Textile Roofs*. Textile Composites and Inflatable structures, E. Oñate and B. Kröplin (Eds.), Cimne, Barcelona, 2003.
- Llorens, I. y Pöppinghaus H., *Bifid Tension Dome*, archivo de los autores. Forum Barcelona, 2004.
- Llorens J., *El Pabellón de Venezuela en Expo 2000 Hannover*. II Jornadas latinoamericanas de Arquitectura y Urbanismo. Institut Catala de Cooperació Iberoamericana-ICCI, Col.lecció Amer&Cat N° 3. pag. 130-137. Barcelona, 2001.
- Luchsinger, R. H., Pedretti, A, Steingruber, P. and Pedretti M., *Light Weight Structures with Tensairity*, R. Motro (Ed.), Shell and Spatial Structures from models to Realisation, Editions de L'Espérou, IASS Symposium Montpellier, 2004.
- Luchsinger, R. H., Ulmann C., Crettol R., Gauthier L., *Straight and curved: Recent developments with Tensairity*. Tensile architecture, connecting past and future. Tensinet symposium. Sofia, 2010.

M-M

- Majowiecki M., *Tensostrutture: progetto e verifica*. Consorzio CREA. Italia, 1994.
- Marks R., Fuller, B.R., *The Dymaxion World of Buckminster Fuller*. Anchor Books, Garden City, NY. 1973.
- MeeB-Olsohn L. *Textegrity - Textiles and Tensegrity*. Shell and Spatial Structures from models to Realisation, Editions de L'Espérou, IASS Symposium Montpellier, 2004.
- Micheletti A., *Structural performances of single-layer tensegrity domes*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.
- Moholy-Nagy L., *Retrospektive, Meister des Bauhauses*. Kunsthalle Frankfurt, Octubre 2009.
- Mollaer M., *The Design of membrane and lightweight structure*. University Press. VUB. Brusellas, 2002.
- Monjo J., *Introducción a la Arquitectura Textil*. COAM Colegio de Arquitectos de Madrid, 1991.

- Motro R., *Tensegrity systems and geodesic domes*. International Journal of Space Structures, Vol. 5, No. 3-4, pp. 341-351, 1990.
- Motro R., *Systemes de tensegrite: structures autocontraintes constituees de barres et de cables*. Universite Montpellier II. Construction Metallique, No. 2, pp. 3-16, 1991.
- Motro R., *Tensegrity systems: the state of the art*. University of Montpellier II, International Journal of Space Structures, Vol. 7, No. 2, pp. 75-83, 1992.
- Motro R. *Computation of tensegrity systems form-finding, mechanisms and selfstress-states determination*. Universite Montpellier II, IASS-IACM, Proceedings of the fourth International colloquim on computation of shell & spatial structures, Chania - Crete, Greece. Pp. 1-20, 2000.
- Motro R., Raducanu V., *Tensegrity systems and tensile structures*. Paper number TP 140. Proceedings of IASS symposium on theory, desing and realization of shell and spatial structures. Edited by H. Kunieda, Nagoya, Japan, 2001.
- Motro R., Raducanu V., *New tensegrity grids*. University of Montpellier II. IASS Symposium Nagoya, TP143, pp. 1-8, 2001.
- Motro R., *Tensegrity structural systems for the future*. Kogan page science. London and Sterling, VA, 2003.
- Motro R., and Smaili, A., *Foldable/Unfoldable Curved Tensegrity Systems by Finite Mechanism Activation*. Journal of The International Association For Shell and Spatial of Structures, Vol. 48, No. 3, Dec n.155, 2007.
- Motro R., Bagneris M., Quirant J., Maurin B., *Four studies on tensegrity foldability*. Spatial structures - Temporary and permanent. IASS International Association for Shell ans Structures. Symposium Shanghai, China, 2010.
- Murakami H., Nishimura, Y., *Static and dynamic characterization of tensegrity modules*. Proceedings of ASME DETC99, Las Vegas, 12-15 September, p. 9. 1999.
- Murakami H., Nishimura, Y., *Static and dynamic characterization of some tensegrity modules*. ASME Journal of Applied Mechanics 67 (4). 2000.
- Murakami H., Nishimura Y., *Static and dynamic characterization of regular truncated icosahedral and dodecahedral tensegrity modules*, International Journal of Solids and Structures No. 38, pp. 9359-9381, 2001.
- Murakami H., *Static and dynamic analysis of tensegrity structures. Part 1. Nonlinear equations of motion*. International Journal of Solids and Structures 38 (20), 3599-3613. 2001.
- Murakami H., *Static and dynamic analysis of tensegrity structures. Part 2. Quasi-static analyses*. International Journal of Solids and Structures 38 (20), 3615-3629. 2001.

N-N

- Neufert E., *Arte de proyectar en arquitectura*. Gustavo Gili, Barcelona, 1984.
- Nishimura Y., Murakami H., *Initial shape finding and modal analysis of cyclic frustum tensegrity modules*. University of California, San Diego, USA. Computer methods in applied mechanics and engineering, No. 190, pp. 5795-5818, 2001.

O-O

- Oppenheim I. J., Williams W. O., *Vibration of an elastic tensegrity structure*, Carnegie Mellon University, Pittsburg, USA. Solids No. 20, pp. 1023-1031, 2001.
- Otto F., *Cubiertas colgantes*. Versión española por Francisco Folguera. Editorial Labor, Barcelona, 1958.
- Otto F., *Tensile structures: design, structure, and calculation of buildings of cables, nets, and Pneumatic structures*. Cambridge, MA London, MIT Press, cop. 1967.
- Otto F., *Estructuras estudios y trabajos sobre construcción ligera*. Gustavo Gili. Barcelona, 1973.
- Otto F., *Grid Shells. IL-10*. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart, 1974.
- Otto F., Tange K., *Grid Shells. IL-10*. Institute for Lightweight Structure University Stuttgart, 1974.
- Otto F., *Experiments, Form, force and mass. IL-23*. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart, 1990.
- Otto F., Bodo R., *Finding form: towards an architecture of the minimal*. Edition Axel Menges. Munich, 1995.
- Otto F., Rasch B., *Finding form*. Edition Axel Menges. Bayern, 1995.

P-P

- Pellegrino S. and Calladine C.R., *Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks*. International Journal of Solids and Structures No. 22 4, pp. 409-428, 1986.
- Pérez N., *Folding Closed Tensegrity*. Tesis en Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2003.
- Plazola A., *Arquitectura deportiva, juegos, deportes y diversión*. Limusa Wiley S.A., Méjico, 1998.
- Popovic O., Sakantamis K., *A novel approach to physical modelling formfinding on tensegrity systems*. University of Sheffield, UK. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 44, No.141, pp. 15-24, 2003.
- Pugh A., *An Introduction to Tensegrity*. University of California Press, Berkeley, CA. 1976.

Q-Q

- Quirant J., Kazi-Aoual M. N., Motro R., *Tensegrity systems: selfstress states and sensitivity*, , Universite Montpellier II, IASS- IACM, Proceedings of the fourth International colloquim on computation of shell & spatial structures, Chania - Crete, Greece. Pp. 1-20, 2000.
- Quirant J., Kazi M. N., Motro R., *Designing tensegrity systems: the case of double layer grid*. Universite Montpellier II. Engineering structures No.25, pp.1121-1130, 2003.
- Quirant J., Kazi-Aoual M. N., Laporte R., *Tensegrity systems: the application of linear programmation in search of compatible selfstress states.*, Universite Montpellier II, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 44, No.141, pp. 33-50, 2003.

R-R

- Rizzuto J. P., Saidani M., Chilton J. C., *Polyhedric space structures using reciprocally supported elements of various cross-section*. University of Nottingham, U.K. Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 42, No.137, pp. 149-159, 2001.
- Robbin T., *Engineering a New Architecture*. Yale University Press, Londres, 1996.
- Ródcchenko, *La construcción del futuro, Constructivismo*. Sala de exposiciones de Caixa Catalunya, La Pedrera, Enero 2009.
- Rhode-Barbarigos L., *Tensegrity systems for pedestrian bridges*. Evolution and trends in design, analysis and construction of shell and spatial structures. Symposium IASS Valencia, 2009, and Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.
- Rodríguez N., *Diseño de una estructura transformable por deformación de una malla plana en su aplicación a un refugio de rápido montaje*. Tesis Doctoral, UPC Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2008.
- Rogers R., *Dome: New Millennium Experience*. Company (NMEC), architect: Richard Rogers Partnership, engineer: Buro Happold, construction: McAlpine Laing Joint Venture, Booth-Clibborn. Londres, 2000.

S-S

- Sastre R., *Disseny i Càlcul d'Estructures de Barres Totalment Articulades amb Grans Deformacions*, Tesis Doctoral, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I UPC, Barcelona, 1981.
- Sastre R., <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/>, Barcelona, 2011.
- Schaeffer R.E., *Tensioned Fabric Structures a practical introduction*. American Society of Civil Engineers. New York, 1996.
- Schlaich J., *Conceptual Design of Light Structures*. IASS International Association for Shell and Spatial Structures. Symposium Montpellier, 2004.
- Schlaich M., *The Messeturm in Rostock - A tensegrity Tower*, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 45, No.145, pp. 93-98, 2003.
- Schock H-J., *Soft shells. Design and Technology of Tensile Architecture*. Birkhäuser Verlag. Basel, 1997
- Shaw F. S., Kabaila A. P., *Analysis of saddle shaped suspended cable roof structures (Part 1 - Theory)*. UNICIV Report No. R.45, University of New south Wales, Kensington, Australia, May 1969.
- Shea K., Fest E., Smith I. F., *Developing intelligent tensegrity structures with stochastic search*. Advanced Engineering Informatics No. 16, pp. 21-40, 2002.
- Skelton R.E., Sultan, C., *Controllable tensegrity, a new class of smart structures*. SPIE, San Diego, p. 12. 1997.
- Sobek W., *Lightness Through Adaptivity*. IASS International Association for Shell and Spatial Structures. Symposium Montpellier, 2004.
- Snelson K., *Continuous tension, discontinuous compression structures*. US. Patent No.3, 169,611. Febrero 16, 1965.

- Sultan C., *Modeling, Design and Control of Tensegrity Structures with Applications*. Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN. 1999
 - Sultan C., Corless M., Skelton R. E., *The prestressability problem of tensegrity structures: some analytical solutions*, International Journal of Solids and Structures, No. 38, pp. 5223-5252, 2001.
 - Sultan C., Corless M., Skelton R. E., *Linear dynamics of tensegrity structures*, Harvard University, Boston, USA. Engineering Structures No. 24, pp.671-685, 2002.
 - Sultan C., Corless M., Skelton R. E., *Symmetrical reconfiguration of tensegrity structures*. Harvard University, Boston, USA. International Journal of Solids and Structures No. 39, pp. 2215-2234, 2002.
 - Sultan C., Skelton R., *Deployment of tensegrity structures*, Harvard University, Boston, USA. International Journal of Solids and Structures, No. 40, pp. 4637-4657, 2003.
- T-T
- Tibert G., *Design and Form-Finding Analysis of Tensegrity Power Lines*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.
- V-V
- Vandenberg M., *Soft Canopies. Detail in building*. Academy Editions. Chichester (UK), 1996.
 - Vandenberg M., *Cable nets*. Academy Edition. London, 1998.
 - Vassart N., Motro R., *Multiparametered formafinding method: application to tensegrity systems*. University of Montpellier II, International Journal of Space Structures, Vol. 14, No. 2, pp. 147-154, 1999.
 - Vilnay O., *Structures made of infinite regular tensegric nets*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 18, No.63, pp. 51-57, 1977.
 - Vrontissi M., *Tensegrity workshop: designing the building process*. Evolution and trends in design, analysis and construction of shell and spatial structures. Symposium IASS Valencia, 2009.
- W-W
- Wagner, R., *Tensegrity and Cable Domes*. The Seventh International Workshop on the Design and Practical Realisation of Architectural Membranes, Berlin, 2002.
 - Walter B., *Tents, Pictures of realized membrane structures, remarks from the practice: the work of Peter Stromeyer IL-16*, Institut für leichte Flächentragwerke. Stuttgart, 1976.
 - Wang B. B., *Simplexes in tensegrity systems, Tower Centre of Space Structures Technology Development*, Xu Zhou Tower Group Co, Xu Zhou 221007, China. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 37, No.2, pp. 57-64, 1996.
 - Wang. B. B., *Tensegrity structures as ring beams*. Tianjin University, China. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 37, No.120, pp. 31-38, 1996.

- Wang, B. B., *Definition of tensegrity systems*. Proceedings of LSA98, Lightweight structures in architectural engineering and construction, Vol.2, 1998.
- Wang, B.B., *Cable struts systems: Part I-Tensegrity*. Journal of Constructional Steel Research, Vol.45, No. 3, 1998.
- Wang, B. B. and Li Y.Y., *Cable-Strut Systems of Non-Contiguous Strut Configuration-Morphological Study*, Journal of The International Association For Shell and Spatial of Structures, Vol. 46, No. 1, Abril n.147, 2005.

Y-Y

- Yoshino S., *From architecture to the table – design and fabrication of tensegrity structure*. Structural Engineers World Congress. Como, Italy, 2011.
- Yuang X. F., Dong S. L., *Study on static behaviour of cable domes*. Zhejiang University, Hangzhou China. Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 43, No.137, pp. 81-91, 2002.
- Yuang X. F., Dong S. L., *Nonlinear analysis and optimum desing of cable domes*, Zhejiang University, China. Enginnering Structures, No. 24, pp. 965-977, 2002.

ANEXO.

POLIEDROS ANEXO 1.

POLIEDROS - ANEXO 1.

GEOMETRÍA

No extraña a nadie el hecho de que las matemáticas tengan una aplicación directa en arquitectura. Todos nos podemos imaginar que, antes de poner manos a la obra, el arquitecto tiene que comprobar que la estructura que quiere construir es realizable teniendo en cuenta la resistencia de los materiales que empleará, las cargas que tienen que soportar y quizás también el coste económico. Sin embargo parece que esta aplicación se reduce sólo a esto, al cálculo de estabilidades, de tensiones, etc., pero de ninguna forma al diseño del objeto arquitectónico mismo.

“Toda creación arquitectónica es geometría” es una máxima que se puede encontrar en los tratados de geometría descriptiva. Desde siempre, los arquitectos han aprovechado superficies de las que pueden calificarse de clásicas y las combinaban acertadamente y en nuestros días también lo continúan haciendo.

La geometría permite al arquitecto diseñar superficies de manera sencilla y compleja a la vez basados en los tratados clásicos y actualmente con ayudas tan modernas como el ordenador por medio de programas informáticos especializados.

El astrónomo y físico italiano **Galileo Galilei** (1.564-1.642) refiriéndose al Universo escribía: “Este grandísimo libro que continuamente tenemos abierto ante los ojos no se puede entender si antes no se aprende a entender la lengua y a conocer los caracteres en los cuales está escrito. Está escrito en lengua matemática y los caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas”.

Existen los cuerpos geométricos omnipresentes en la Naturaleza y en las obras de los humanos: los poliedros. Veremos los más habituales y sencillos **los poliedros regulares**.

Un cuerpo sólido es todo lo que ocupa lugar en el espacio. En Geometría se estudian sus formas y medidas (**Geometría sólida o espacial**). Los cuerpos geométricos pueden ser de dos clases: o formados por caras planas (**poliedros**), o teniendo alguna o todas sus caras curvas (**cuerpos redondos**).

A los poliedros que tienen alguna cara sobre la que no se pueden apoyar, se les llama **cóncavos** y a los demás **convexos**. Nosotros vamos a trabajar con poliedros convexos.

Al número de caras que concurren en un mismo vértice se le llama orden del **vértice**.

En todos los poliedros convexos se verifica siempre que el número de caras más el número de vértices es igual al número de aristas más dos:

$$C+V=A+2 \text{ (Fórmula de Euler)}$$

POLIEDROS REGULARES

Entre todos los poliedros que existen hay unos especialmente importantes por sus propiedades, belleza y presencia en la vida real: **los poliedros regulares**.

Se les conoce con el nombre de **sólidos platónicos** en honor a **Platón** (siglo IV a. de C.) que los cita en el Timeo, pero lo cierto es que no se sabe en qué época llegaron a conocerse. Algunos investigadores asignan el cubo, tetraedro y dodecaedro a **Pitágoras** y el octaedro e icosaedro a **Teeteto** (415-369 a. de C.). Para Platón los elementos últimos de la materia son los poliedros regulares, asignando **el fuego al tetraedro** (El fuego tiene la forma del tetraedro, pues el fuego es el elemento más pequeño, ligero, móvil y agudo), **la tierra al cubo** (el poliedro más sólido de los cinco). El **aire al octaedro** (Para los griegos el aire, de tamaño, peso y fluidez, en cierto modo intermedios, se compone de octaedros). (Fig. A1)



a.



b.



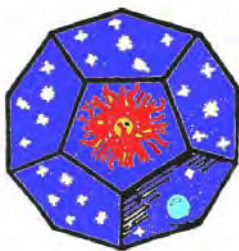
c.

Figura A1.

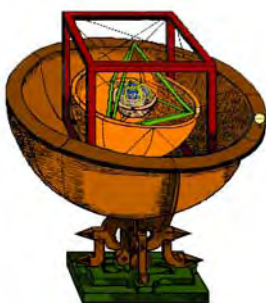
- a. Tetraedro - Fuego
- b. Hexaedro - Tierra
- c. Octaedro - Aire



d.



e.



f.

Figura A2.

- d. Icosaedro - Agua
- e. Dodecaedro - Universo
- f. Poliedros de Kepler

Y el **agua al icosaedro** (El agua, el más móvil y fluido de los elementos, debe tener como forma propia o “semilla”, el icosaedro, el sólido más cercano a la esfera y, por tanto, el que con mayor facilidad puede rodar). Mientras que el **dodecaedro (el universo)**. Como los griegos ya tenían asignados los cuatro elementos, dejaba sin pareja al dodecaedro. De forma un tanto forzada lo relacionaron con el Universo como conjunción de los otros cuatro: La forma del dodecaedro es la que los dioses emplean para disponer las constelaciones en los cielos. Dios lo utilizó para todo cuando dibujó el orden final.

A finales del siglo XVI, **Kepler** imaginó una relación entre los cinco poliedros regulares y las órbitas de los planetas del sistema solar entonces conocidos (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno). Según él cada planeta se movía en una esfera separada de la contigua por un sólido platónico. (Fig.A2)

Un poliedro es regular si todas sus caras son regulares e iguales y todos sus vértices son del mismo orden. Teniendo en cuenta las dos condiciones básicas para que se forme un poliedro:

- En un vértice de un ángulo poliédrico han de concurrir tres o más caras.
- La suma de los ángulos de las caras de un ángulo poliédrico ha de ser menor que 360 grados.

Algebraicamente también se puede deducir que sólo existen 5 poliedros regulares.

En un poliedro regular, llamamos **C** a su número de caras, **n** al número de lados de cada cara, **V** a su número de vértices, **A** el de aristas y **m** al número de aristas concurrentes en un mismo vértice.

Se verificarán, por tanto, las igualdades:

$$n.C = 2A \quad :: \quad m.V = 2A$$

Por tanto: $m.V = n.C$. Es decir:

$$A = \frac{nC}{2} \quad \text{y} \quad V = \frac{nC}{m}$$

Sustituyendo en la fórmula de Euler:

$$C + \frac{nC}{m} = \frac{nC}{2} + 2$$

Multiplicando por 2m:

$$2mC + 2nC = mnC + 4mC$$

Despejando C:

$$C = \frac{4m}{2(m+n) - mn}$$

Como el mínimo número de lados de un polígono es tres y el mínimo número de aristas que concurren en un vértice de un poliedro es tres, se pueden presentar los siguientes casos:

1.- Si $n = 3$ y:

a) $m = 3$, entonces $C = 4$ y obtenemos el **tetraedro regular**.

b) $m = 4$, entonces $C = 8$ y obtenemos el **octaedro regular**.

c) $m = 5$, entonces $C = 20$ y obtenemos el **icosaedro regular**.

d) $m = 6$, entonces $C = 24/0$ y no se obtiene ningún poliedro.

2.- Si $n = 4$ y:

a) $m = 3$, entonces $C = 6$ y obtenemos el **hexaedro regular** o **cubo**.

b) $m = 4$, entonces $C = 16/0$ y no se obtiene ningún poliedro.

3.- Si $n = 5$ y:

a) $m = 3$, entonces $C = 12$ y obtenemos el **dodecaedro regular**.

b) $m = 4$, entonces $C = -8$ y no obtenemos ningún poliedro.

4.- Si $n = 6$ y:

a) $m = 3$, entonces $C = 12/0$ y no obtenemos ningún poliedro.

POLIEDROS DE ARQUÍMEDES

Cortando adecuadamente los poliedros regulares o de Platón se obtienen otros poliedros que tienen todas sus caras regulares pero no iguales (aunque sí de la misma arista). A estos poliedros se les llama **Arquimedianos**, en honor a **Arquímedes** que los describió por primera vez, o semirregulares ya que mantienen la regularidad de las caras y de los vértices, aunque no la igualdad de las caras. (Fig.A3)

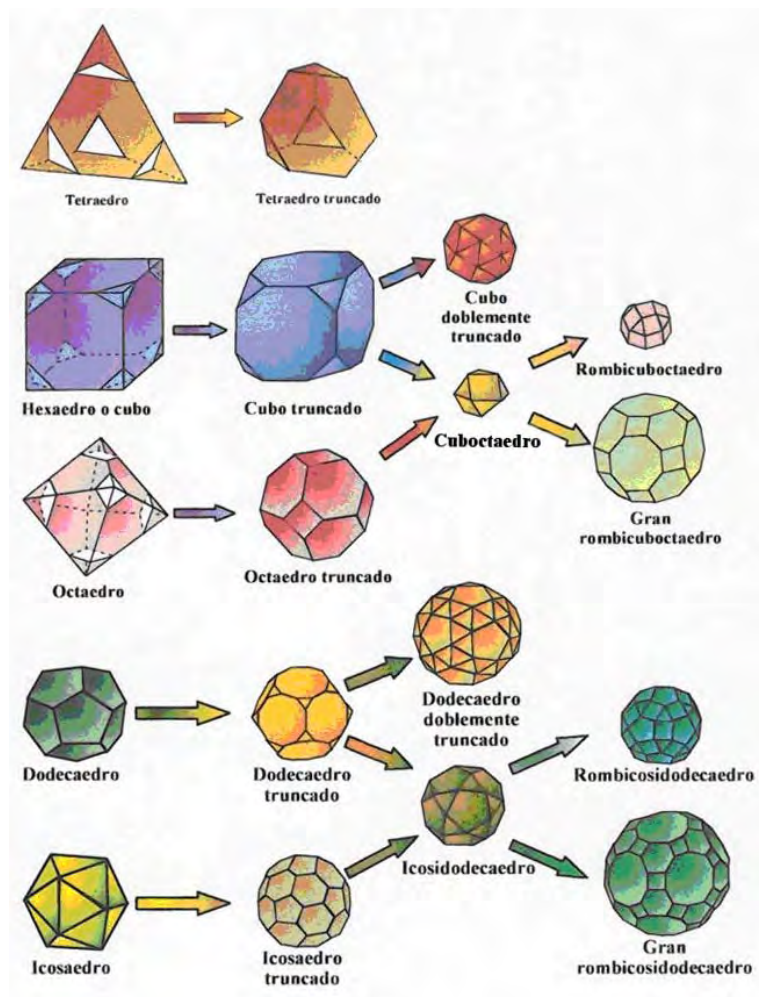


Figura A3. Poliedros de Arquímedes

PRISMAS Y ANTIPRISMAS

Un prisma es un poliedro limitado por dos caras iguales y paralelas (bases) y tantos paralelogramos (caras laterales) como lados tienen las bases.

Un prisma se llama **recto** cuando sus aristas laterales son perpendiculares a las bases (fig-1), y oblicuo en caso contrario (fig-2). La altura de un prisma será el segmento de perpendicular a las bases comprendido entre estas. (Fig.A4)

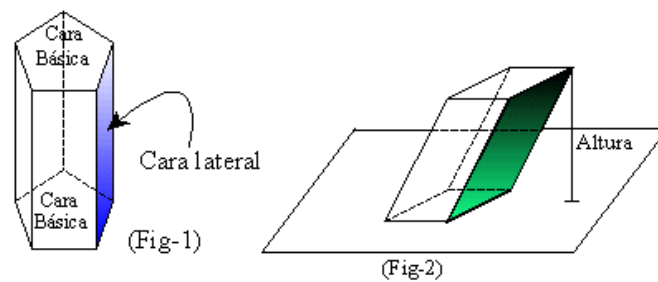


Figura A4. Poliedros de Arquímedes

Si la base del prisma es un triángulo, el prisma se llamará **triangular**; si es un cuadrado, se llamará **cuadrangular**, etc.

PRISMA

En el paralelepípedo rectángulo de la figura, demuestra que se verifica que el cuadrado de una diagonal es igual a la suma de los cuadrados de las tres aristas que concurren en un vértice. Este es el **teorema de Pitágoras en el espacio**. (Fig.A5)

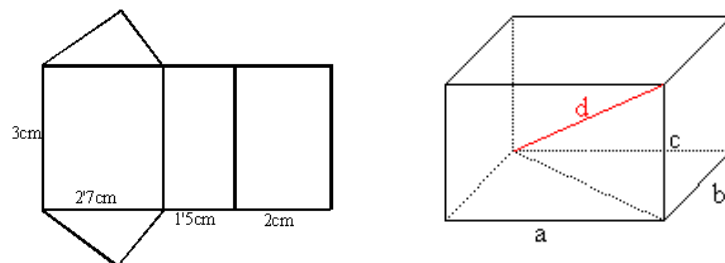


Figura A5. Poliedros de Arquímedes

ANTRIPRISMAS

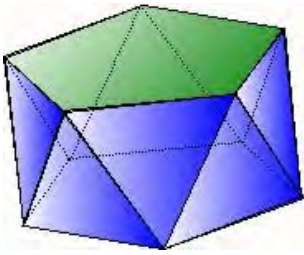


Figura A6. Antiprisma

Cuando las bases las unimos con triángulos y no con paralelogramos, las figuras que obtenemos se llaman **antiprismas**. En la figura adjunta tienes un antiprisma pentagonal. (Fig.A6)

En estos cuerpos, los polígonos de las bases son también paralelos e iguales, pero uno está girado respecto al otro (cuando los polígonos son regulares el vértice de uno se corresponde con el punto medio del lado del otro). Para dibujarlos tienes que unir cada vértice del polígono de arriba con dos vértices consecutivos del polígono de abajo, de manera que las aristas no se entrecrucen.

LOS POLIEDROS EN LA HISTORIA Y EL ARTE

Las figuras poliédricas, desde la más remota antigüedad, han estado relacionadas con la filosofía y el arte. Recibieron valores místicos y fueron utilizadas para explicar el universo, como lo demuestran los llamados poliedros platónicos. Pero también sirvieron de inspiración de obras de arte, en la orfebrería, la pintura, el grabado, la escultura y la arquitectura. A ello contribuyó la regularidad de sus formas, la simetría que encierran, la multiplicidad de la unidad y el carácter esotérico de los números a ellas asociados.

En esta página mostramos algunos ejemplos, con obras desde la cultura romana hasta nuestros días. La época en que con mayor prolijidad se han dado es el Renacimiento, lo que determina la presentación de la muestra:

**Pre-Renacimiento
Piedras poliédricas del Neolítico**

Cientos de esferas de piedra tallada, aproximadamente de 8 cm de diámetro, datadas alrededor de 2000 años AC, fueron encontradas en Escocia. Las esferas llevan talladas caras regulares formando poliedros. (Fig.A7)

Figura A7. Poliedros Neolíticos





Docenas de piezas huecas de dodecaedros e icosaedros de bronce se han hallado de la cultura romana, entre los siglos II y IV, en multitud de lugares a lo ancho de Europa. Objetos que van desde los 4 a los 11 cm., adornados con esferas en cada vértice y aros circulares de varios diámetros en las caras. Su función no ha sido determinada, aunque se especula que pudieran haber sido utilizados como soportes para velas o flores, instrumentos de nivelación, como calibre para anillos o para jugar a los dados. (Fig.A8)

Renacimiento italiano
Luca Pacioli (1445-1514)



Figura A8. Poliedros Romanos

Aparece en esta obra de Jacobo del Barbari (1505). Es el primer matemático del que tenemos un retrato auténtico. Luca Pacioli, fraile franciscano, aparece señalando con la mano izquierda un ejemplar de la *Summa de Arithmetica* (1494), mientras con la derecha indica en una pizarra una figura geométrica y una suma de números representada según la "nueva" notación.

Por la posición de los ojos de los personajes, Pacioli parece estar observando el cuerpo suspendido enfrente, que es un rombicuboctaedro de cristal con agua, y comprobando alguna propiedad del mismo en el dibujo de la pizarra, a la vez que consulta la *Summa*.



Figura A9. Poliedros Renacentistas

En la mesa, sobre el libro, aparece un dodecaedro. Su acompañante observa directamente al espectador. La rica vestimenta de éste hace suponer que se trata de uno de los hijos de un acaudalado comerciante veneciano de los que Pacioli fue tutor y maestro. De su relación con esta familia es de donde Pacioli desarrolló sus conocimientos sobre aritmética comercial. (Fig.A9)

Leonardo da Vinci (1452-1519)

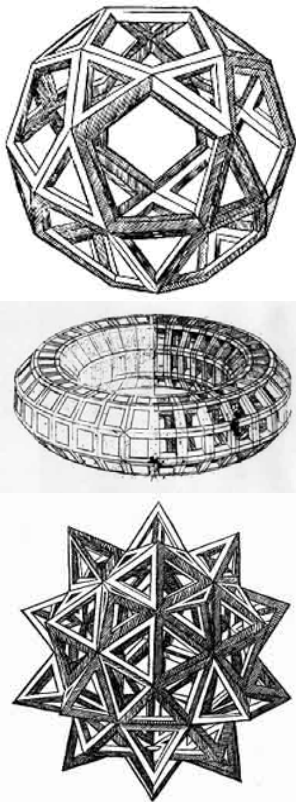


Figura A10. Poliedros de Leonardo da Vinci

Fue la quinta esencia del hombre del Renacimiento: artista, matemático, científico e ingeniero. Gran amante de la geometría, dedicó mucho tiempo al estudio de los sólidos. Su más famosa muestra de los poliedros son las ilustraciones para el libro de Luca Pacioli (1509) *La Divina Proporción*. Estas son algunas de ellas. (Fig.A10,A11)

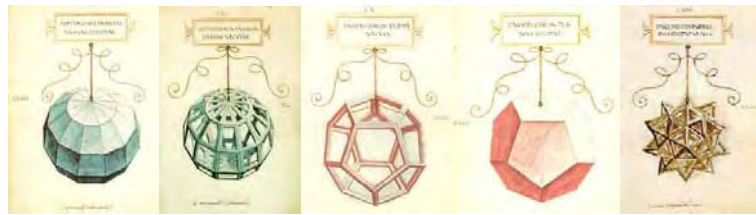


Figura A11. Poliedros de Leonardo da Vinci

Giovanni da Verona

Intarsias son mosaicos realizados con piezas de madera incrustada. Los más famosos se realizaron en el norte de Italia entre finales del siglo XV y principios del XVI. Fra Giovanni construyó cuatro alrededor de 1520, dos para el monasterio de Monte Olivetto Maggiore (cerca de Siena) y un segundo par para la catedral de Santa Maria in Organo, Verona. Estos cuatro son los que se muestran. (Fig.A12)



Figura A12. Poliedros de Giovanni da Verona

Renacimiento germano
Alberto Durero (1471-1528)



Figura A13. Poliedros de Alberto Durero

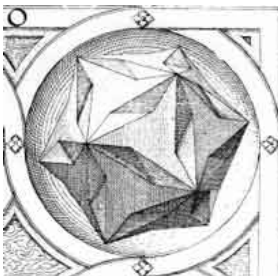


Figura A14. Poliedros de Wentzel Jaminitzer



Figura A16. Poliedros de Johan Kepler

Pintor y grabador alemán, y como buen renacentista, multidisciplinar. Gran conocedor de los números y estudioso de los cuerpos geométricos. El grabado que se muestra se titula *Melancolía* y representa un ángel pensativo acompañado de objetos matemáticos, una esfera, un cuadrado mágico y un dodecaedro truncado. Obra muy estudiada por su simbología, se cree que el cubo representa la masculinidad y su truncamiento tiene un simbolismo freudiano. El poliedro no es más que un cubo o un romboedro con el vértice superior truncado. (Fig.A13)

Wentzel Jamnitzer (1508-1585)

Nacido en Nuremberg, es uno de los más prolíficos creadores de poliedros artísticos de todos los tiempos. Todos ellos están recogidos en las ilustraciones de su libro *Perspectiva Corporum Regularium* (1568). He aquí algunos de ellos: (Fig.A14,A15)

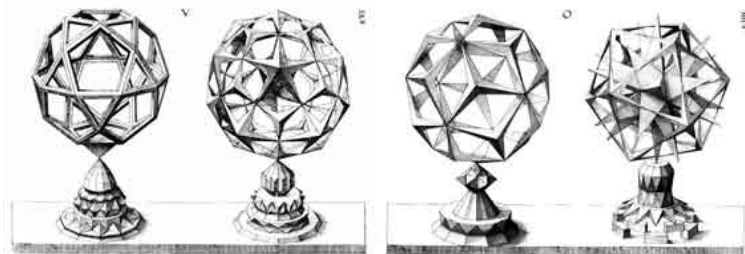


Figura A15. Poliedros de Wentzel Jamnitzer

Johann Kepler (1571-1630)

Más conocido por sus tres leyes de los movimientos de los planetas, fue uno de los matemáticos que más contribuyeron al estudio de los poliedros. Descubrió la serie infinita de los antiprismas y en su libro *Harmonice Mundi* mostró los sólidos platónicos asociados a los elementos fuego, aire, tierra, agua y cosmos. En su libro *Mysterium Cosmographicum* (1596) propone un modelo que relaciona estos sólidos con las esferas planetarias. (Fig.A16)



Figura A17.
Poliedros de Lorenz Zick

Durante el siglo XVII los artistas y artesanos realizaron artilugios giratorios con maderas y marfil para crear sus esculturas. La que se muestra es de Lorenz Zick (1594-1666) y consiste en capas esféricas concéntricas, cada una de ellas perforada con doce aperturas en las caras de un dodecaedro. (Fig.A17)

Algunos ejemplos del XVII

En Francia podemos encontrar esta ilustración del Livre de Perspective (1560) de Jean Cousin, y en la catedral de Salisbury en Inglaterra encontramos esta tumba, construida en 1635, de Thomas Gorges y su esposa. En ambos se observan las influencias de Leonardo. (Fig.A18)



Figura A18.
Ejemplos del siglo XVIII

Abraham Sharp (1651-1742)

Fue un reconocido astrónomo. Publicó en 1718 Geometry Improvid con numerosos diseños de nuevos y complejos poliedros, especialmente con caras tetragonales. El más complejo tenía 120 caras. Además realizó los cálculos necesarios para su construcción, con aproximaciones de 15 y 20 decimales. (Fig.A19)

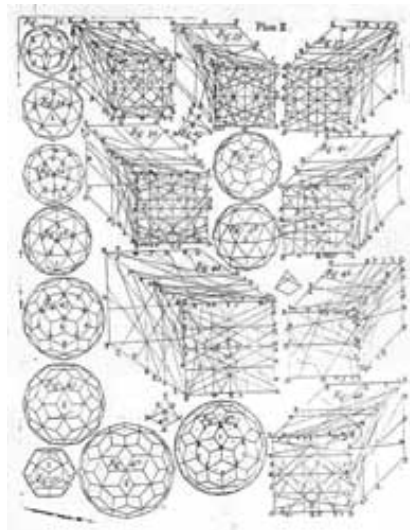


Figura A19. Poliedros de Abraham Sharp

Siglo XX

Maurit Cornelis Escher (1898-1972)

Este original artista matemático creó imaginativas imágenes con perspectivas imposibles y utilizando poliedros como elementos de sus composiciones. Entre sus obras destacan estas dos litografías: Stars (1948) y Waterfall (1961) (Fig.A20)

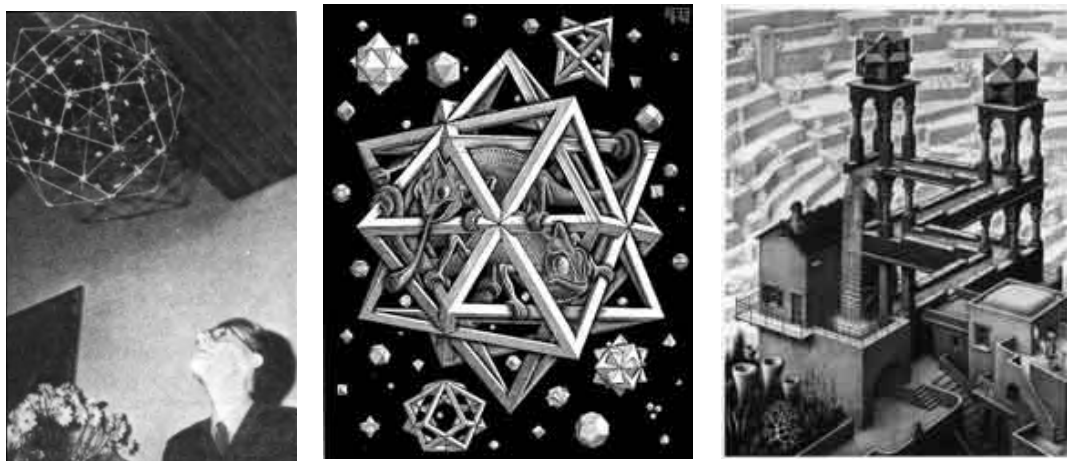


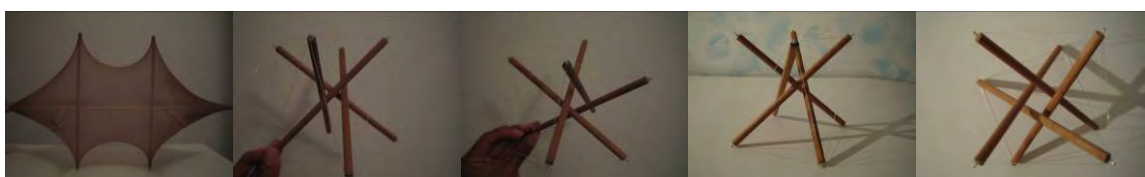
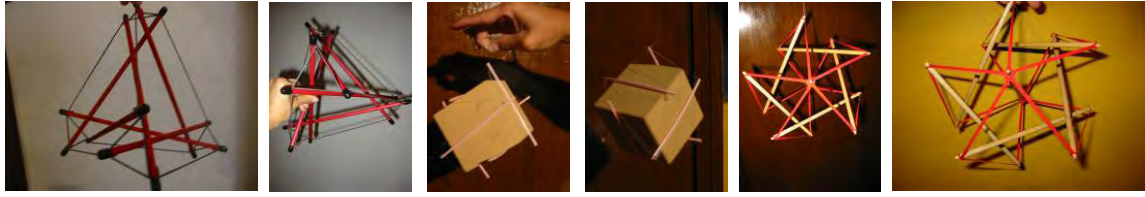
Figura A20. Poliedros de Mauris Cornelis

APÉNDICES.

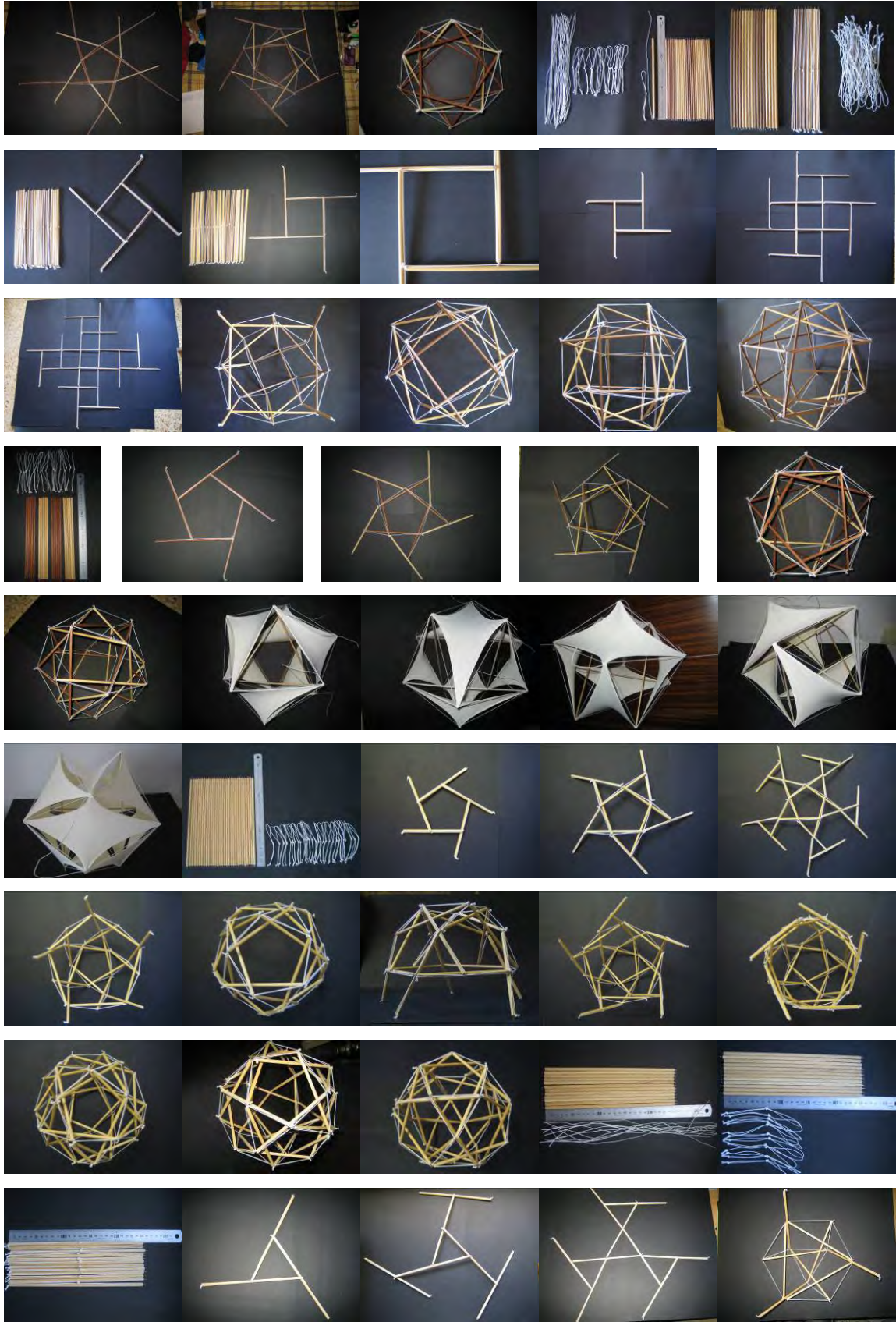
MODELOS - APÉNDICE A.
OBTENCIÓN DE LA FORMA POR MODELOS FÍSICOS- A1.
OBTENCIÓN DE LA FORMA POR MODELOS INFORMÁTICOS - A2.
WINTESS - APÉNDICE B.
TÚNEL DE VIENTO - APÉNDICE C.
VENTILADOR MECÁNICO - APÉNDICE D.

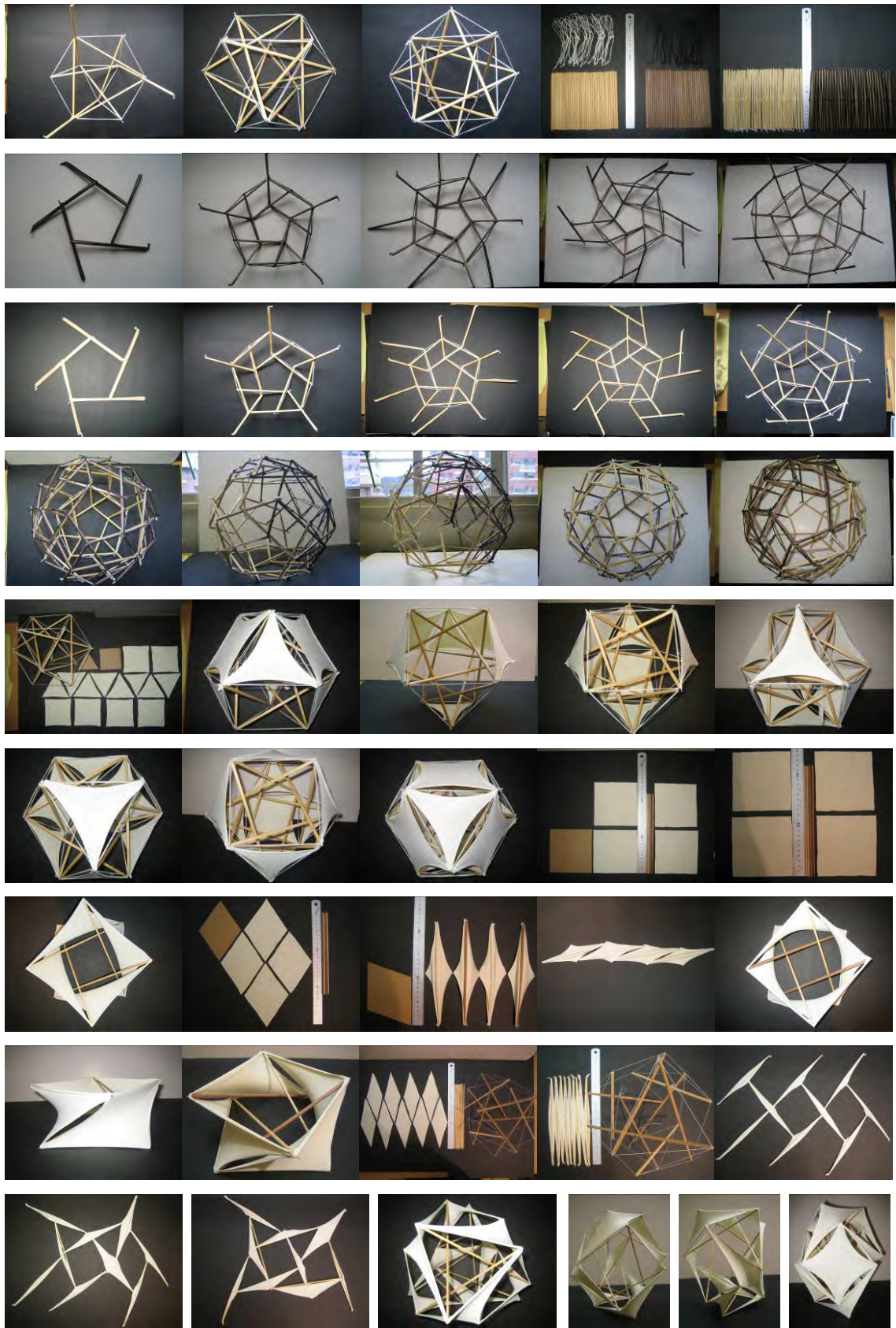
MODELOS - APÉNDICE A.

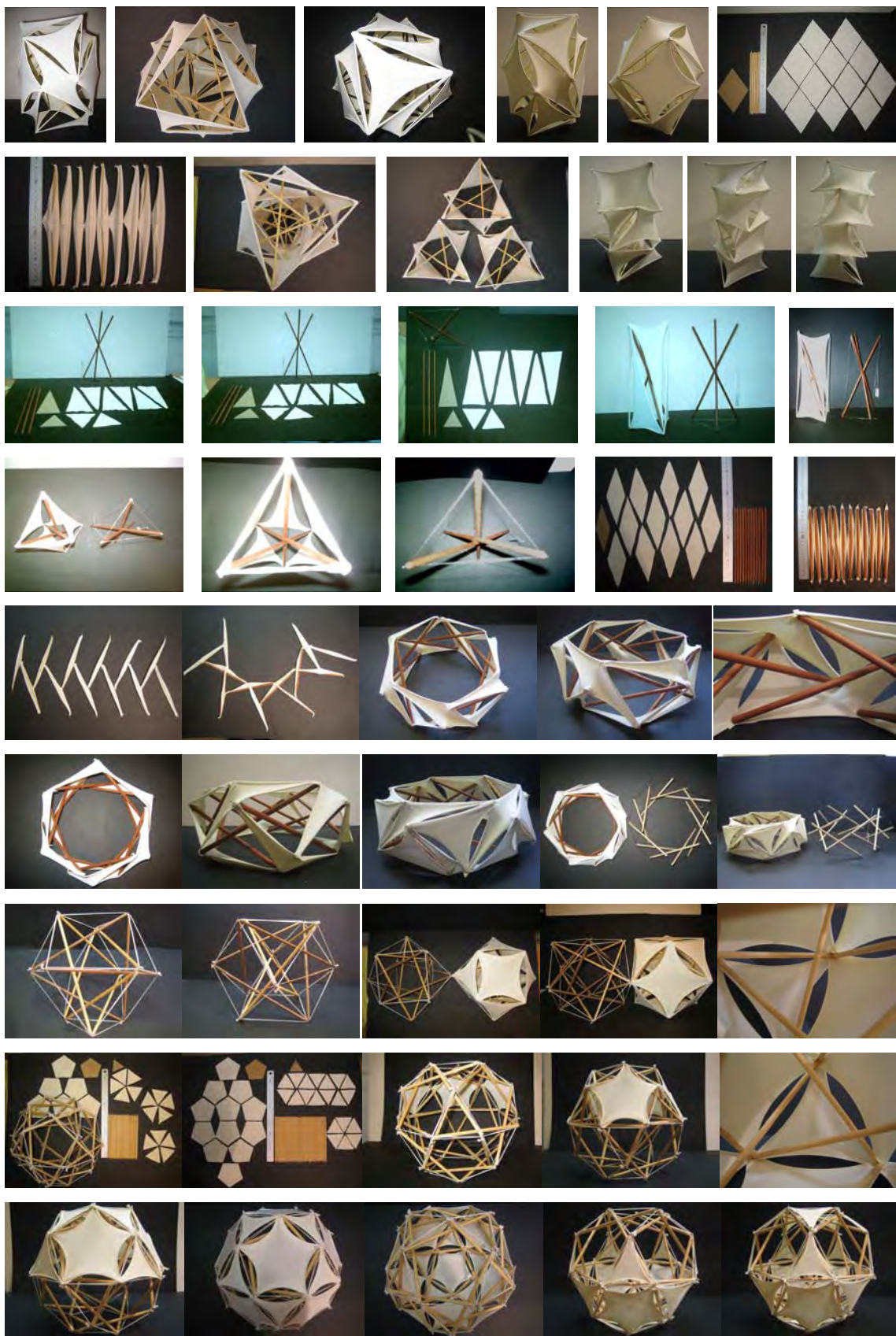
OBTENCIÓN DE LA FORMA POR MODELOS FÍSICOS A1.



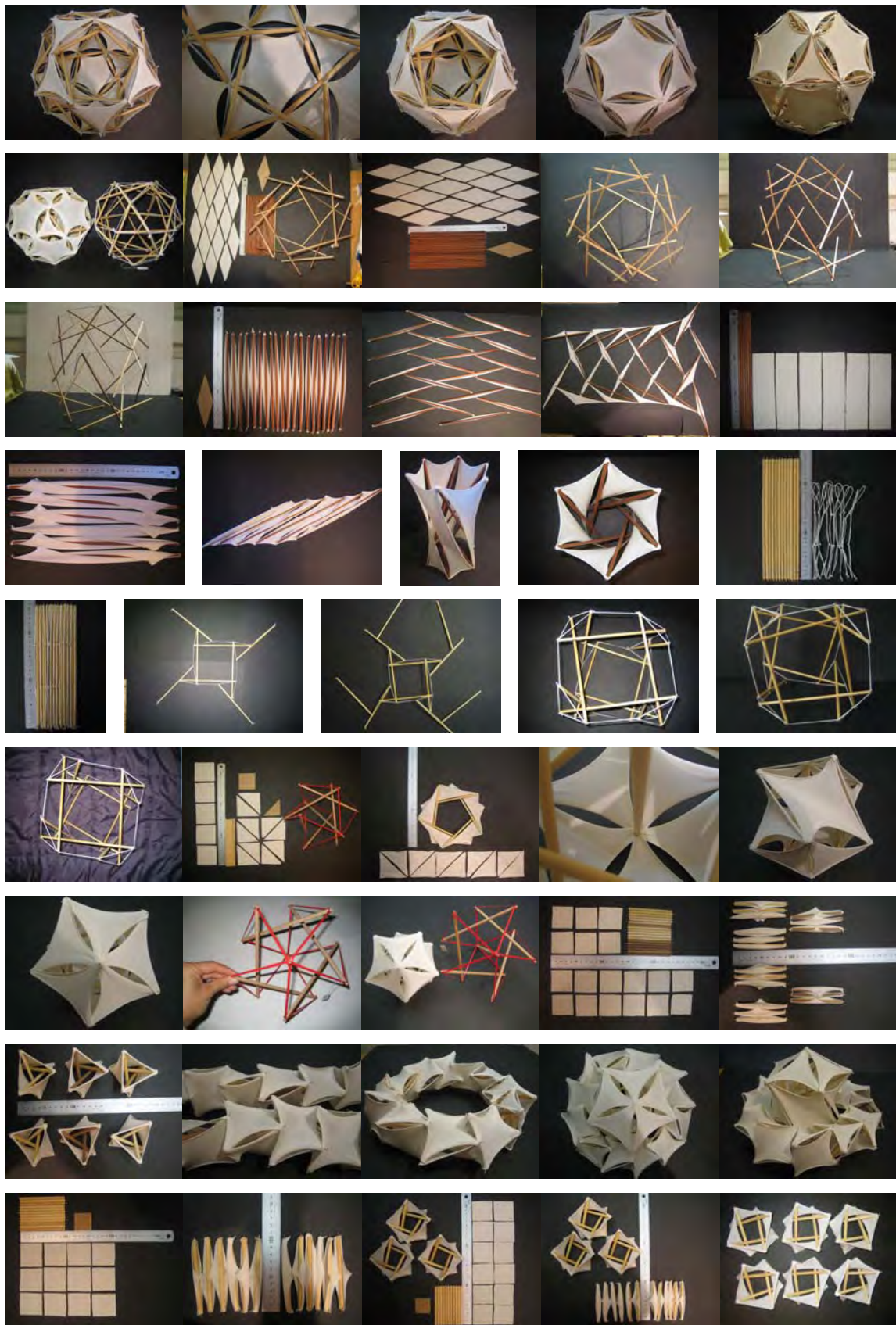








APLICACION DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATIRADAS













OBTENCIÓN DE LA FORMA POR MODELOS INFORMÁTICOS A2.

Nudo	Xf (m)	Yf (m)	Zf (m)	Rx (T)	Ry (T)	Rz (T)	RT (T)	dx/mm	dy/mm	dz/mm	dT/mm
1	1.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
2	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
3	0.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
4	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
5	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
6	2.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
7	2.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
8	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
9	3.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
10	2.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
11	1.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
13	3.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
14	9.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
15	3.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
16	4.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
17	9.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
18	0.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
19	3.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
20	9.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
21	4.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
22	8.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
23	5.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
24	4.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
25	9.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
26	8.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
27	8.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
28	4.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
29	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
30	6.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
31	7.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
32	8.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
33	5.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
34	7.000	2.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
35	7.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
36	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
37	6.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
38	5.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
39	6.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
40	6.500	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
Total				0.000	0.000	0.000					

Figura A21. Coordenadas iniciales de los nudos.

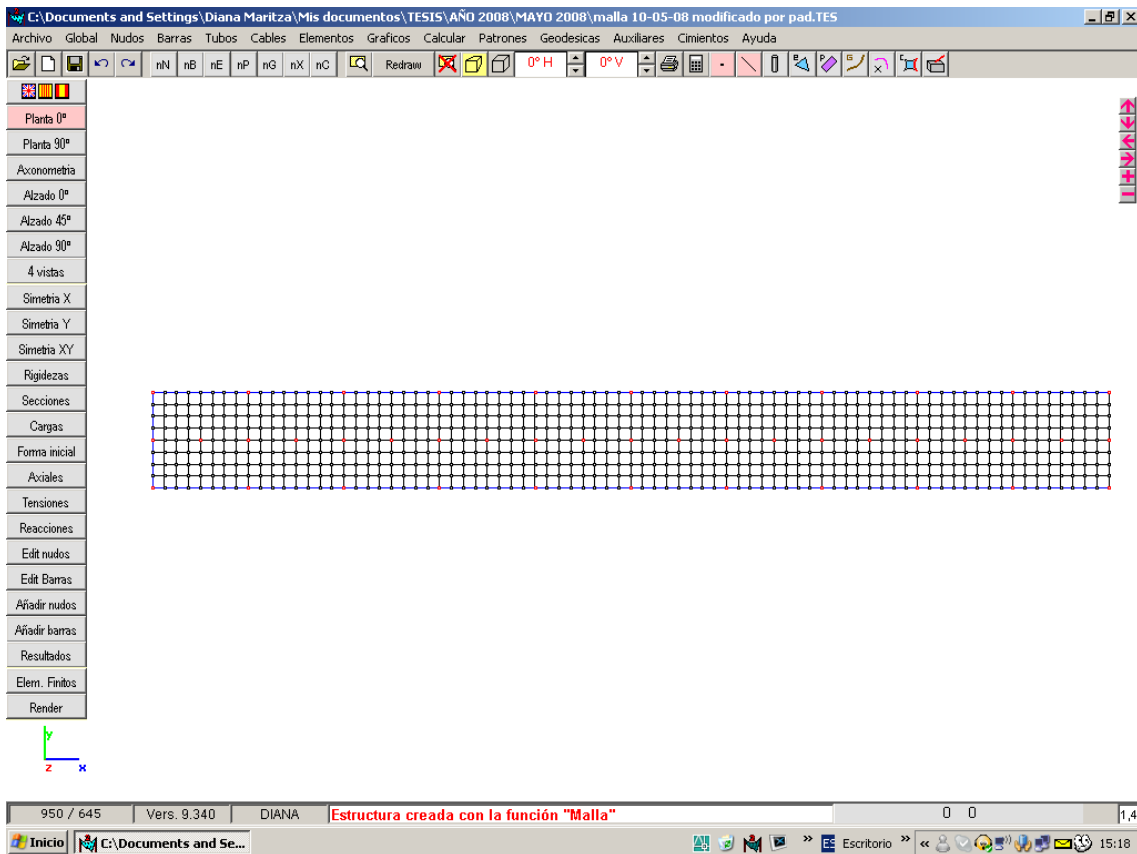


Figura A22. Malla ortogonal de puntos (puntos principales en rojo).

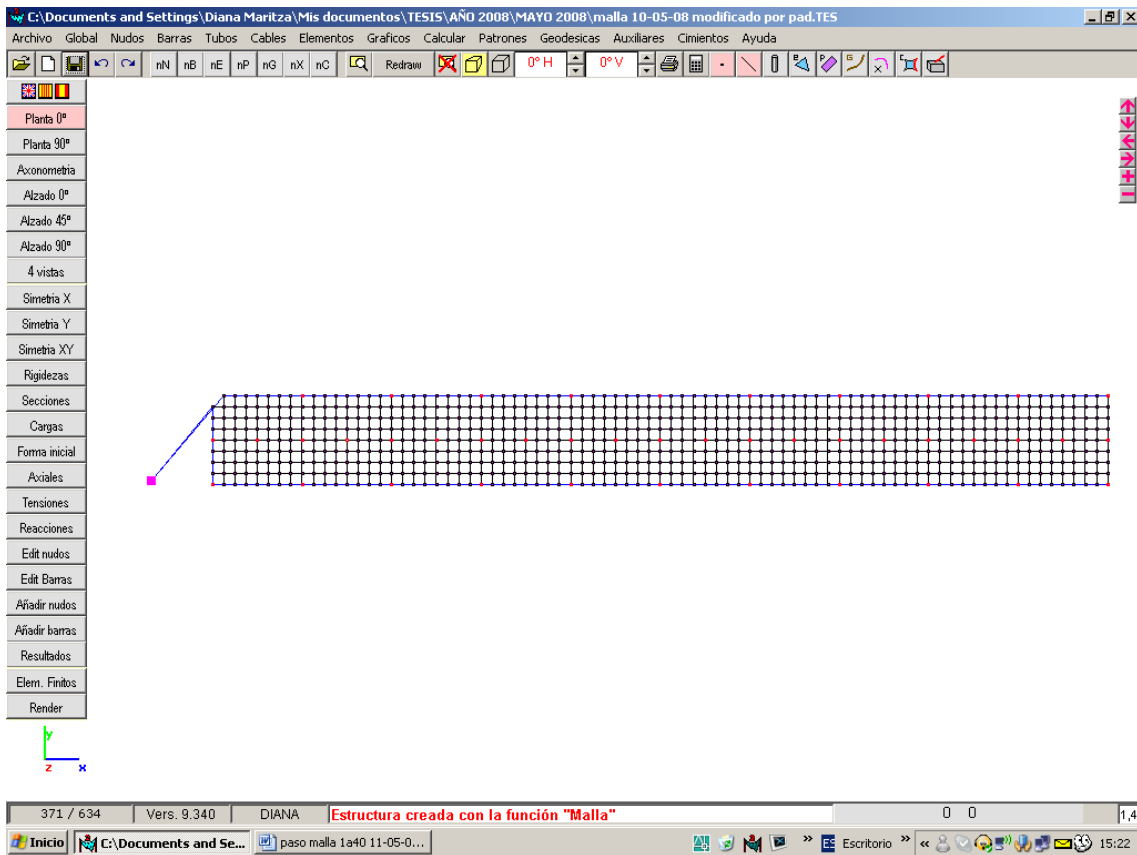


Figura A23. Coordenadas del nudo 1.

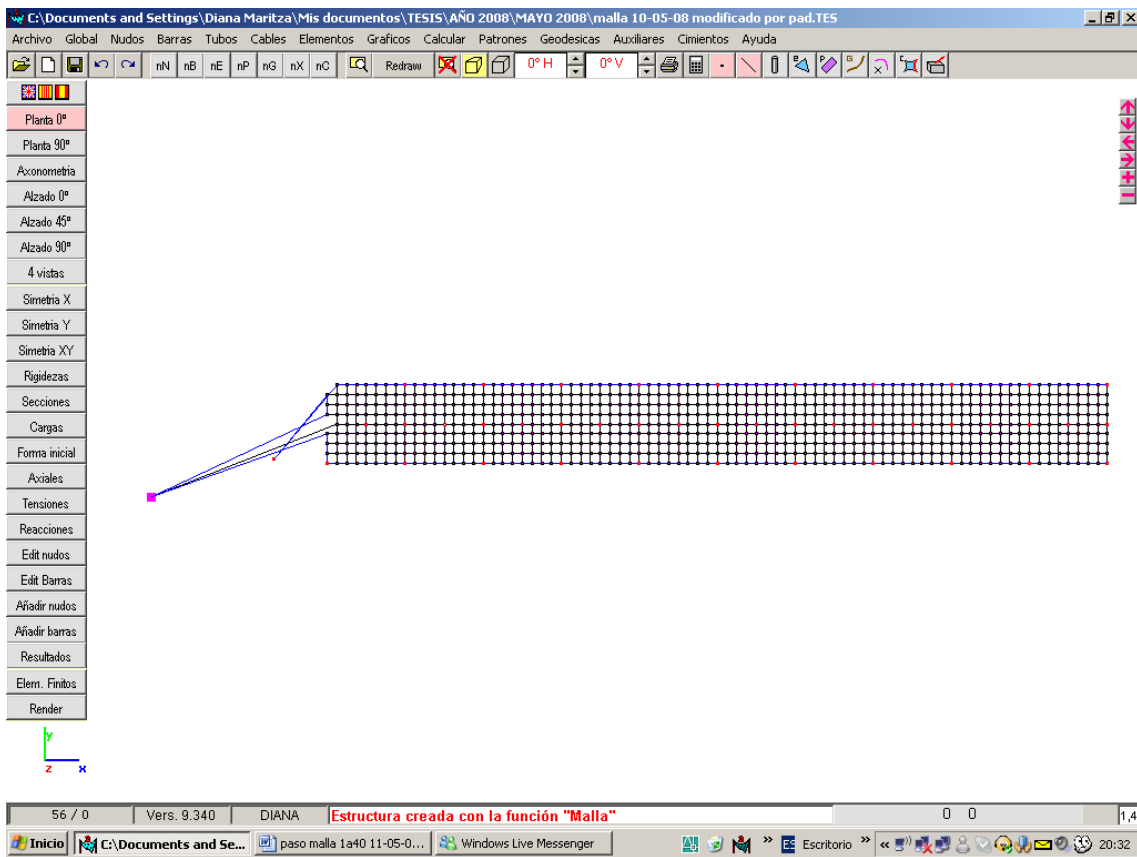


Figura A24. Coordenadas del nudo 2.

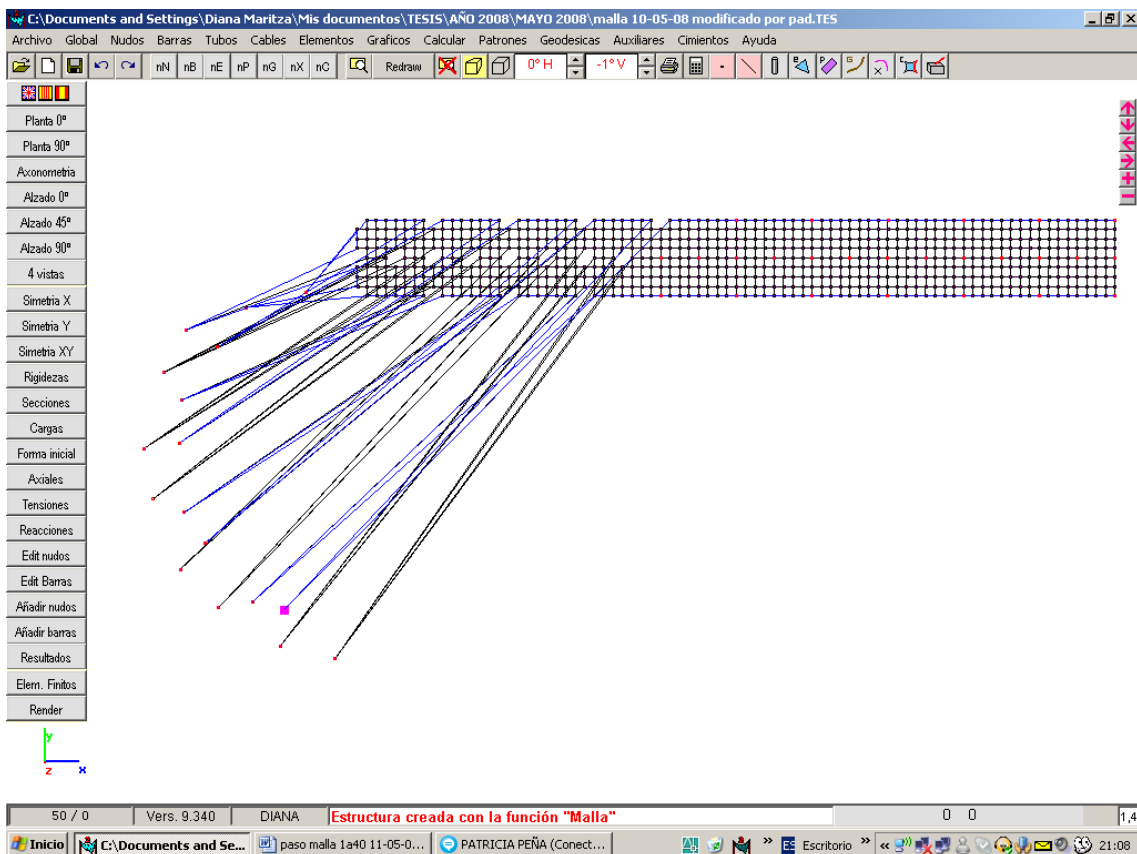


Figura A25. Coordenadas del nudo 17.

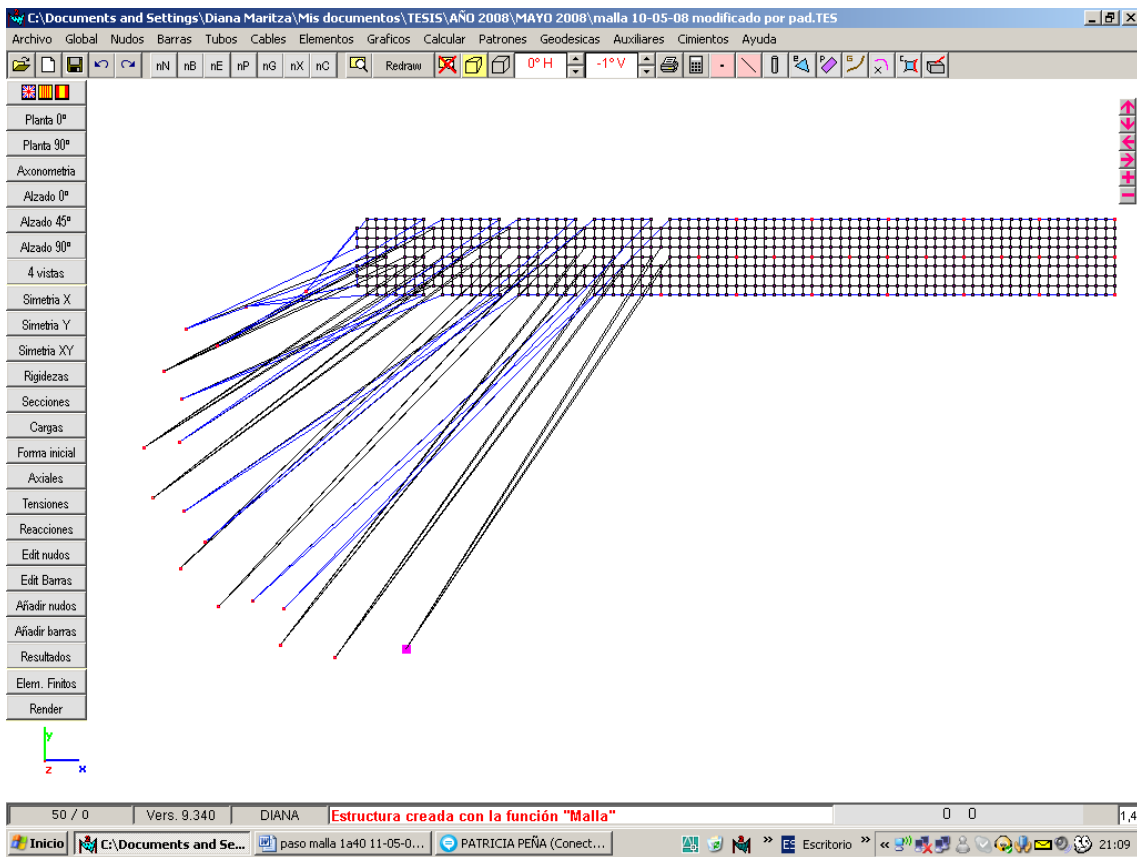


Figura A26. Coordenadas del nudo 18.

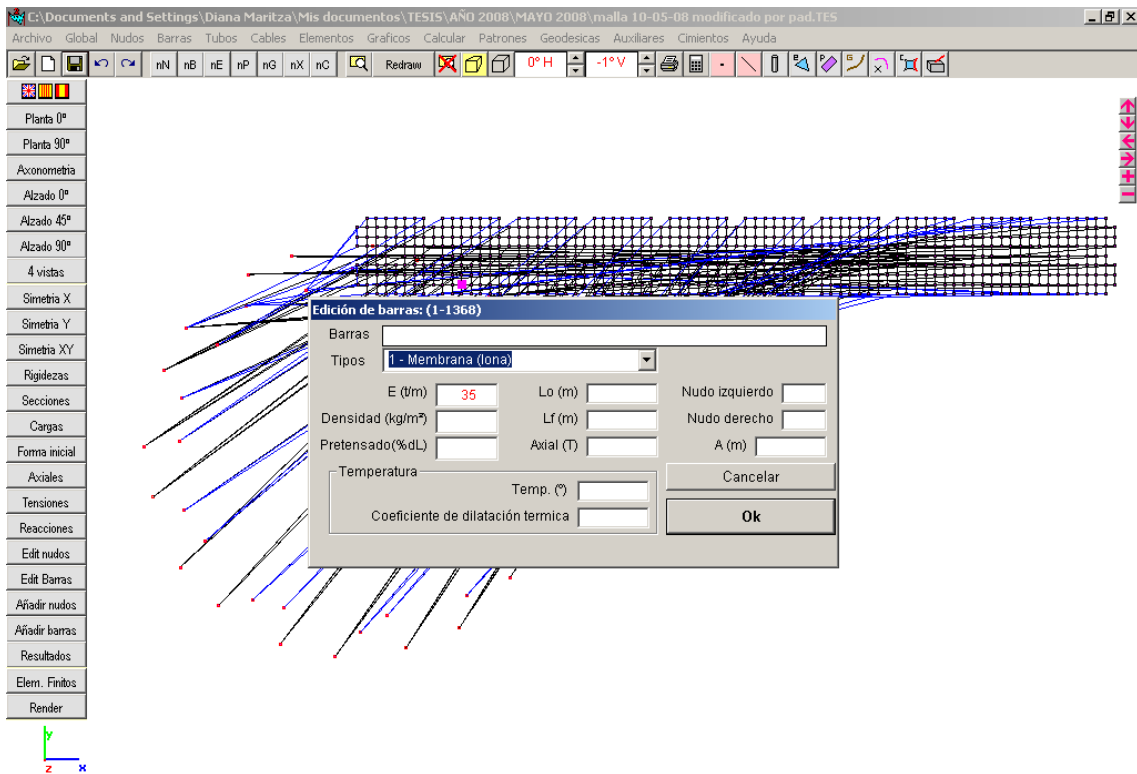


Figura A27. Edición de barras como membrana.

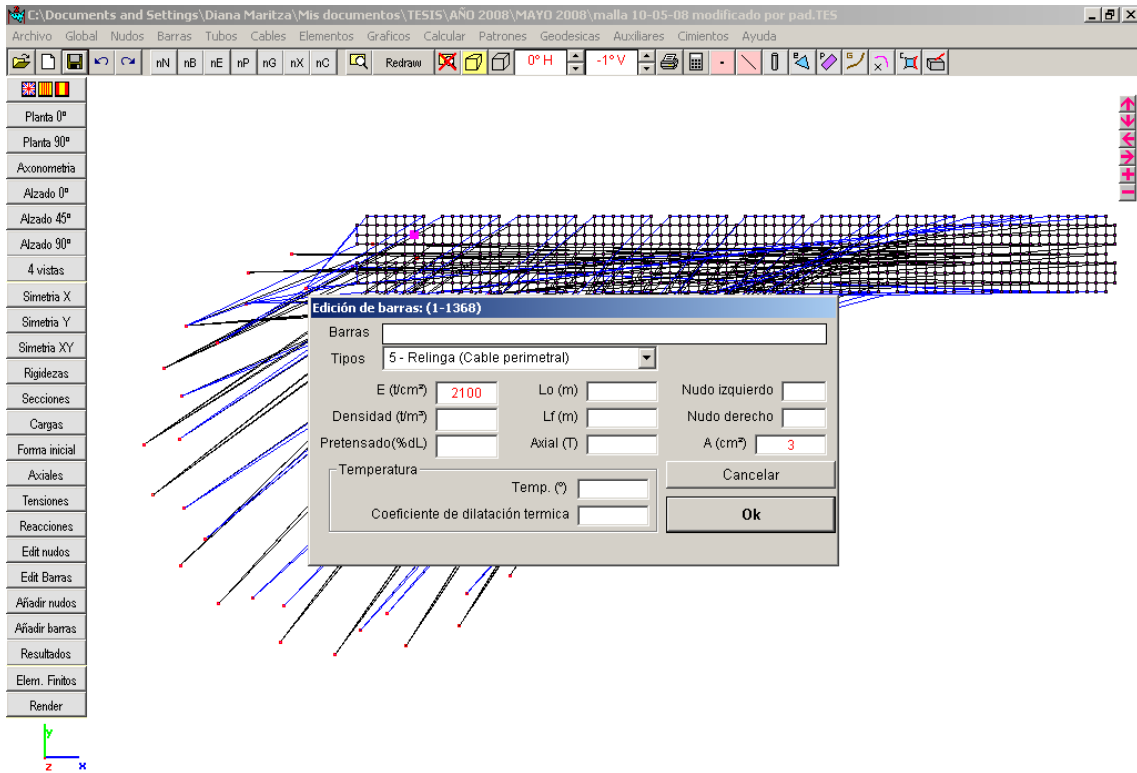


Figura A28. Edición de barras como relingas o cable perimetral.

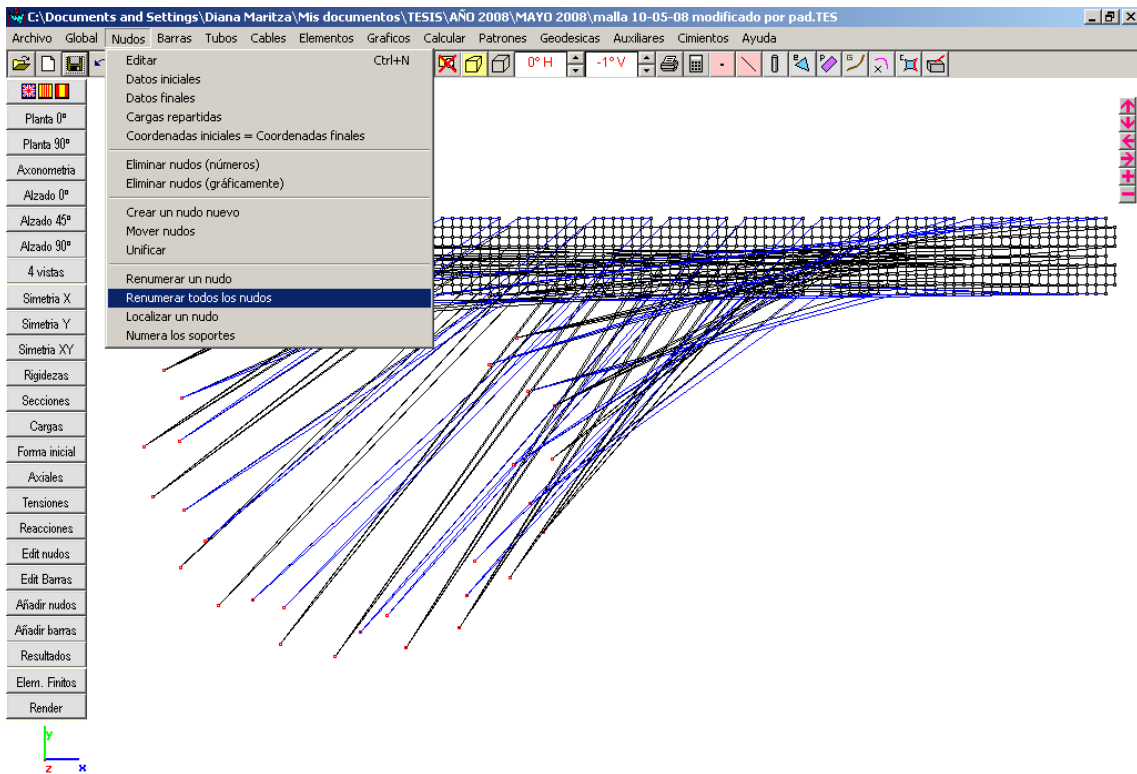


Figura A29. Renumeración de los nudos.

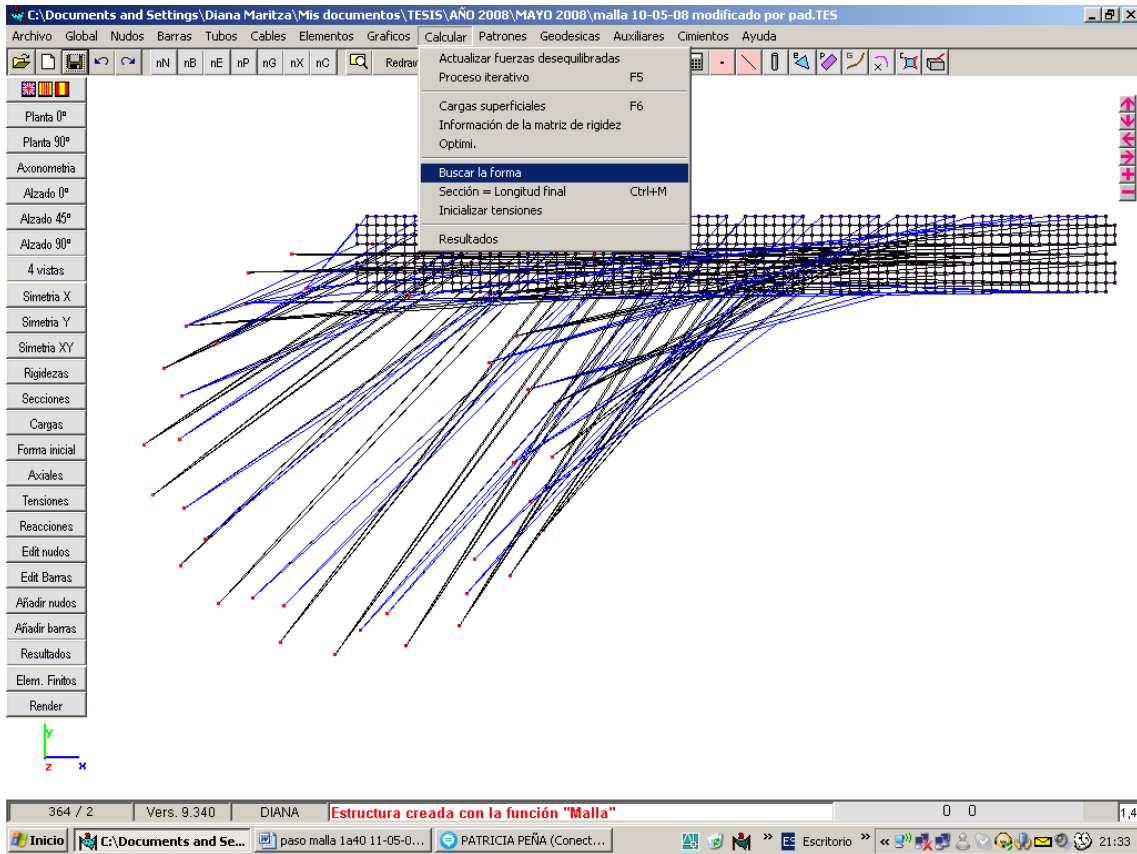


Figura A30. Búsqueda de la forma.

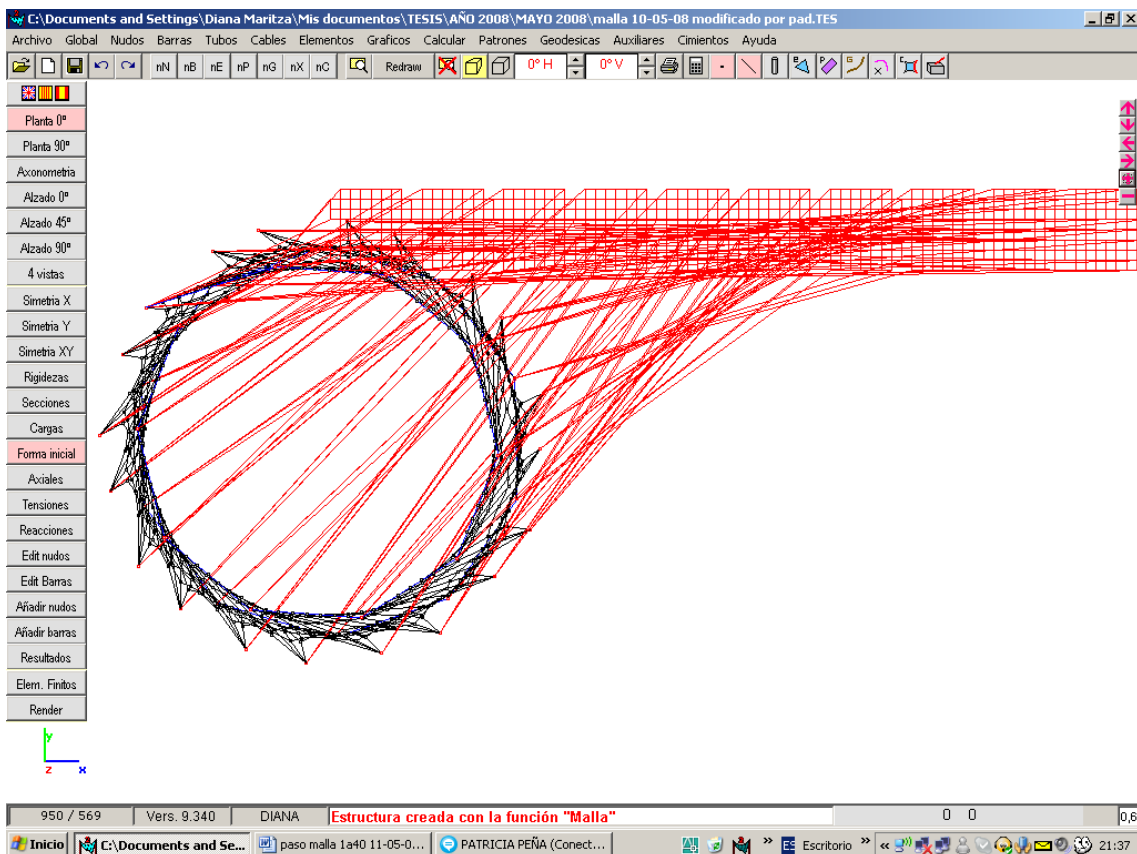


Figura A31. Generación del anillo tensegrity.

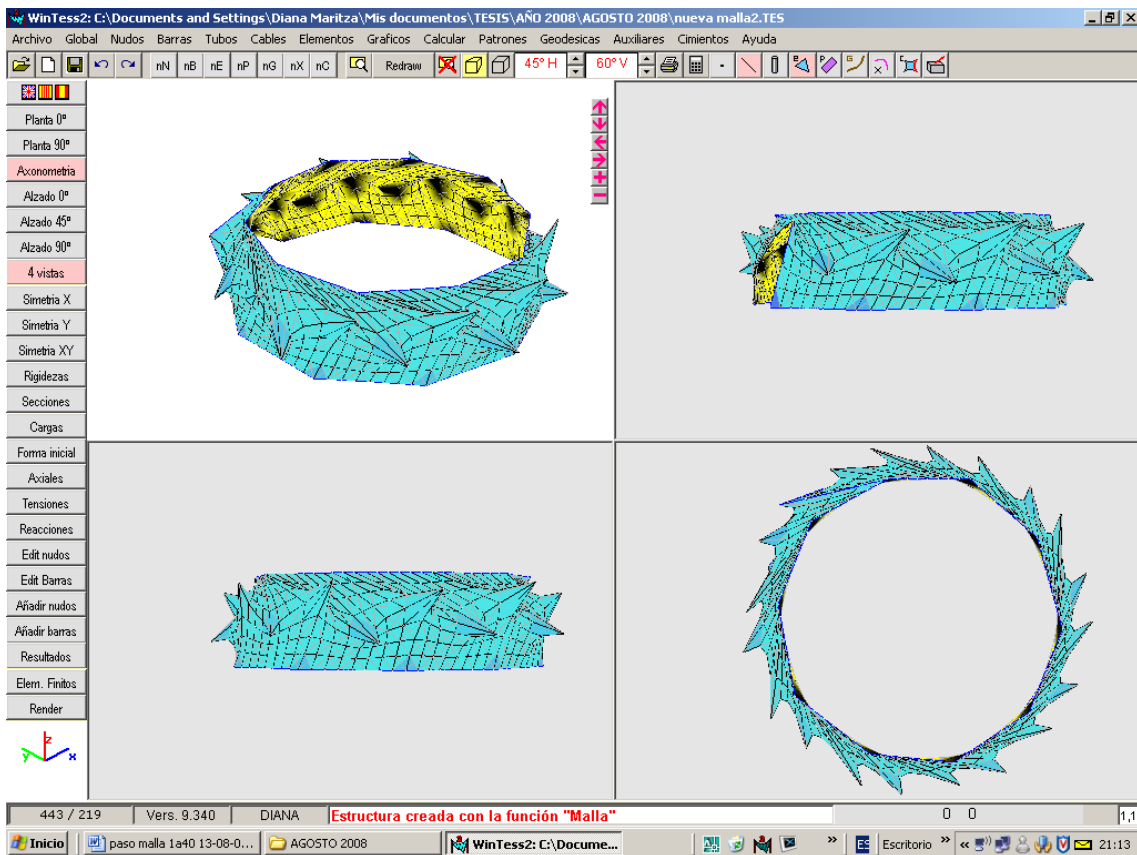


Figura A32. Cuatro vistas del anillo tensegrity.

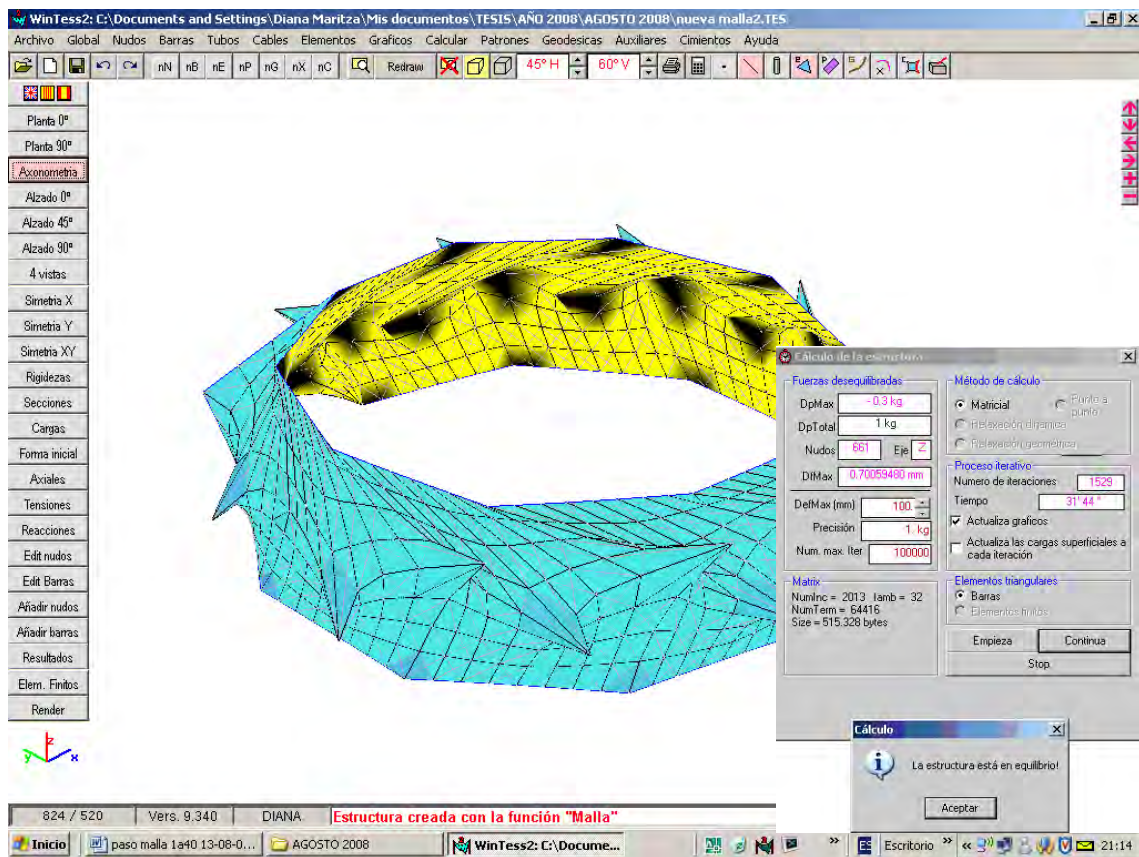


Figura A33. Cálculo del anillo tensegrity en WinTess (la estructura está en equilibrio).

Nudo	Xf (m)	Yf (m)	Zf (m)	Rx (T)	Ry (T)	Rz (T)	RT (T)	dx/mm	dy/mm	dz/mm	dT/mm
1	-23.017	-21.766	-8.010	0.010	0.015	0.018	0.025	0	0	0	0
2	-22.955	-16.157	-2.013	0.010	0.014	-0.020	0.026	0	0	0	0
3	-21.776	-7.987	-7.984	0.017	0.006	0.018	0.025	0	0	0	0
4	-20.316	-10.999	-11.056	0.001	-0.016	0.011	0.019	0	0	0	0
5	-20.082	-23.349	-11.056	0.010	-0.012	0.011	0.019	0	0	0	0
6	-19.141	-29.042	-1.998	-0.001	0.017	-0.020	0.026	0	0	0	0
7	-18.894	-15.558	-0.007	0.002	-0.016	-0.009	0.018	0	0	0	0
8	-18.379	-3.519	-1.998	0.016	0.006	-0.020	0.026	0	0	0	0
9	-16.229	-26.177	0.015	0.011	-0.012	-0.009	0.017	0	0	0	0
10	-15.942	-33.637	-7.998	0.000	0.018	0.018	0.025	0	0	0	0
11	-14.784	-5.397	-0.006	-0.008	-0.014	-0.009	0.018	0	0	0	0
12	-13.247	-0.870	-11.056	-0.008	-0.014	0.011	0.019	0	0	0	0
13	-12.633	-33.203	-11.056	0.016	-0.004	0.011	0.019	0	0	0	0
14	-12.615	2.403	-7.989	0.017	-0.005	0.018	0.025	0	0	0	0
15	-8.523	-37.258	-1.996	-0.010	0.013	-0.020	0.026	0	0	0	0
16	-7.850	-33.221	0.011	0.016	-0.003	-0.009	0.018	0	0	0	0
17	-7.253	4.044	-2.008	0.016	-0.005	-0.020	0.026	0	0	0	0
18	-5.451	0.383	0.003	-0.015	-0.007	-0.009	0.018	0	0	0	0
19	-3.235	-39.108	-8.002	-0.011	0.014	0.018	0.025	0	0	0	0
20	-1.573	3.170	-11.056	-0.015	-0.006	0.011	0.019	0	0	0	0
21	-0.814	-36.796	-11.056	0.015	0.006	0.011	0.019	0	0	0	0
22	0.836	5.478	-7.987	0.011	-0.014	0.018	0.025	0	0	0	0
23	3.070	-34.011	0.002	0.015	0.007	-0.009	0.018	0	0	0	0
24	4.895	-37.656	-2.000	-0.016	0.005	-0.020	0.026	0	0	0	0
25	5.467	-0.397	-0.002	-0.016	0.003	-0.009	0.018	0	0	0	0
26	6.139	3.628	-1.996	0.010	-0.013	-0.020	0.026	0	0	0	0
27	10.248	-0.422	-11.057	-0.016	0.004	0.011	0.019	0	0	0	0
28	10.256	-36.045	-7.995	-0.017	0.005	0.018	0.025	0	0	0	0
29	10.859	-32.757	-11.056	0.008	0.014	0.011	0.019	0	0	0	0
30	12.367	-28.220	-0.003	0.008	0.014	-0.009	0.018	0	0	0	0
31	13.557	0.031	-7.995	0.000	-0.018	0.018	0.025	0	0	0	0
32	13.847	-7.445	0.003	-0.011	0.012	-0.009	0.018	0	0	0	0
33	15.987	-30.101	-1.993	-0.016	-0.006	-0.020	0.026	0	0	0	0
34	16.478	-18.069	-0.002	-0.002	0.016	-0.009	0.018	0	0	0	0
35	16.754	-4.575	-1.995	0.001	-0.017	-0.020	0.026	0	0	0	0
36	17.677	-10.297	-11.056	-0.010	0.012	0.011	0.019	0	0	0	0
37	17.928	-22.627	-11.056	-0.001	0.016	0.011	0.019	0	0	0	0
38	19.372	-25.636	-7.988	-0.017	-0.006	0.018	0.025	0	0	0	0
39	20.513	-17.459	-2.003	-0.009	-0.014	-0.020	0.026	0	0	0	0
40	20.638	-11.865	-7.991	-0.010	-0.015	0.018	0.025	0	0	0	0
Total				0.000	0.000	0.000					

Figura A34. Coordenadas finales de los nudos.

WINTESS - APÉNDICE B.

PRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PROGRAMA INFORMÁTICO WINTESS 3

MENÚS

Archivo

Es un menú que tiene similares características a un programa de entorno Windows, desde allí se manejan los archivos, crear, abrir, cerrar, salvar, etc. lo importante es que podemos importar y guardar archivos con formato dxf y además mezclar o fusionar dibujos en este caso estructuras. (Fig.A35)

Global

- Datos generales (se puede activar con la tecla **F4**) información de la estructura, No. de nudos, barras, tubos, elementos, cables, geodésicas, patrones, peso de las barras, de la membrana, módulo de elasticidad, etc. (Fig.A36,A37)
- Origen (forma final=forma inicial) La figura vuelve a su geometría inicial.
- Reset (forma inicial=forma final) no guarda las modificaciones.
- Traslación, rotación, homotecia, son ayudas de dibujo.

Nudos

En este menú los nudos se crean, editan, eliminan, mueven, renumeran, localizan, unifican, etc. (se puede activar con la tecla **control + N**), aparece toda la información de la geometría de los nudos, sus coordenadas, desplazamientos, cargas aplicadas, etc. También aparecen cuadros auxiliares con toda esta información, el más importante es el de editar donde podemos modificar la información de los nudos. (Fig. A38,A39)

Barras

Este menú es similar al de nudos (se puede activar con la tecla control +B). El cuadro auxiliar más importante es el editor de barras, desde allí se puede modificar toda la información y características de las barras, se define el tipo de barra, si es de tipo membrana, cable de borde (relinga), cable exterior (viento), tubos, etc. y además se pueden materializar las barras, dándoles características a los materiales, espesores, resistencias, etc. (Fig.A40,A41)

Elementos

En este menú se hace la generación automática de los elementos, que son triángulos y además de crear, desde aquí se pueden eliminar, editar, invertir, localizar, etc. (Fig.A42)

Tubos

Desde aquí podemos editar y dar características a las barras denominadas tubos, los cuales admiten compresión. También aparece una base de datos técnicos con tubos estandarizados y usados en el mercado. (Fig.A43)

Cables

Igual que en el menú anterior podemos editar y dar características a las barras o conjunto de barras denominadas cables, también aparece una base de datos técnicos de cables estandarizados y usados en el mercado. (Fig.A44)

Membrana

En este menú aparece una base de datos editables y técnicos de membranas estandarizados y usadas en el mercado, en este caso de la casa francesa FERRARI con sus respectivas características, resistencia, módulo de elasticidad, peso, coeficiente de seguridad, pretensión, etc. (Fig.A45)

Cálculo

En este menú (Fig.A46) aparecen dos cuadros editores importantes, el de fuerzas superficiales (se puede activar con la tecla F6) y el editor de cálculo de la estructura (se puede activar con la tecla F5) en el primero definimos la magnitud de las cargas a aplicar y si son cargas de viento, nieve, pretensado, coeficientes eólicos, etc. (Fig.A47), en el segundo procedemos al cálculo estructural en este caso matricial (Fig.A48).

Botones auxiliares

A la izquierda tenemos otros botones, algunos son auxiliares de dibujo donde podemos comparar la geometría inicial (vistas en planta, alzado, axonometría, etc. o forma inicial marcada en color rojo) con la geometría resultante (forma final en color azul) después de haber calculado la estructura ante las cargas que hemos aplicado (Fig.A49).

Hay otros botones auxiliares que nos muestran gráficamente reacciones de fuerzas, rigideces, axiales, ratio, etc. (Fig.A50). También se puede desplegar una base de datos con resultados generales de la estructura, cargas en los nudos, axiales en los tubos, tracción en membrana, cables de borde (relingas) y cables exteriores (vientos).

En la parte superior aparecen unos íconos auxiliares que podemos activar y desactivar los cuales nos muestran la numeración de los nudos (nN), barras (nB), elementos (nE), cables (nC), etc. también otros que gráficamente y con colores representan los nudos, barras, elementos, tubos, cables, etc.

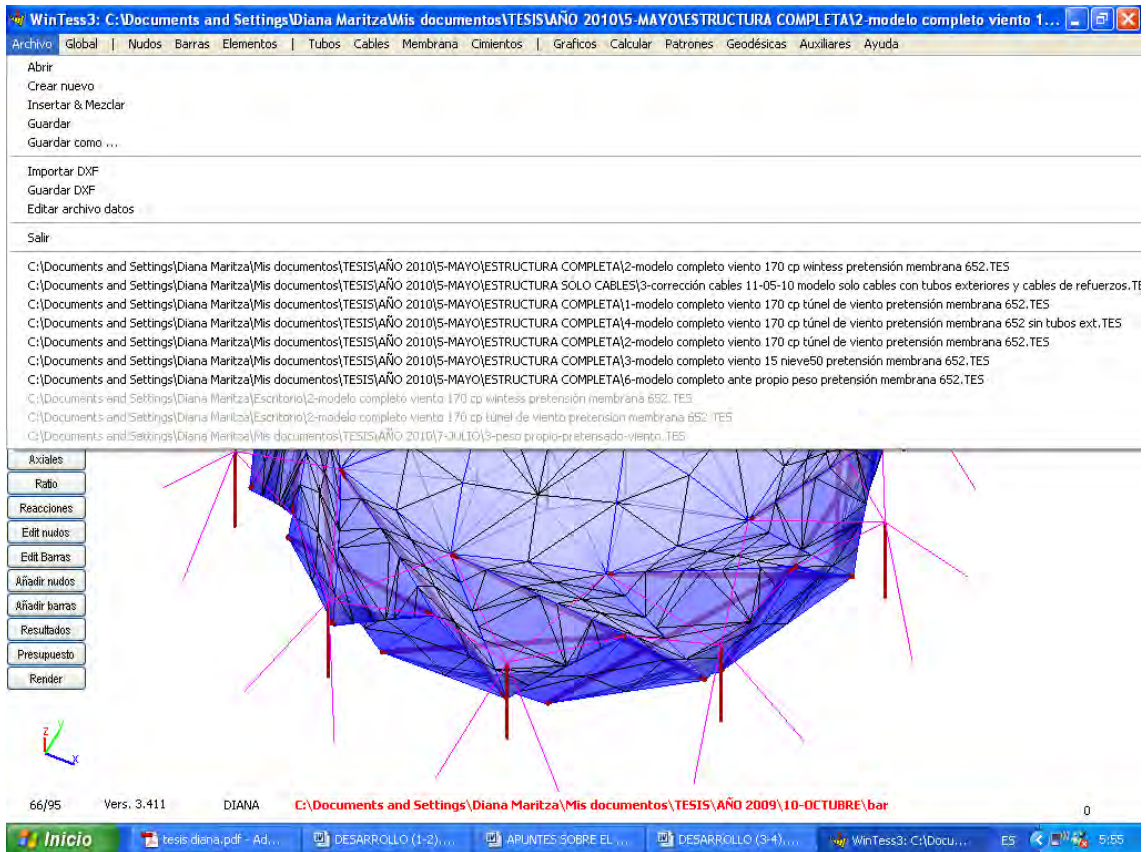


Figura A35. Menú ARCHIVO.

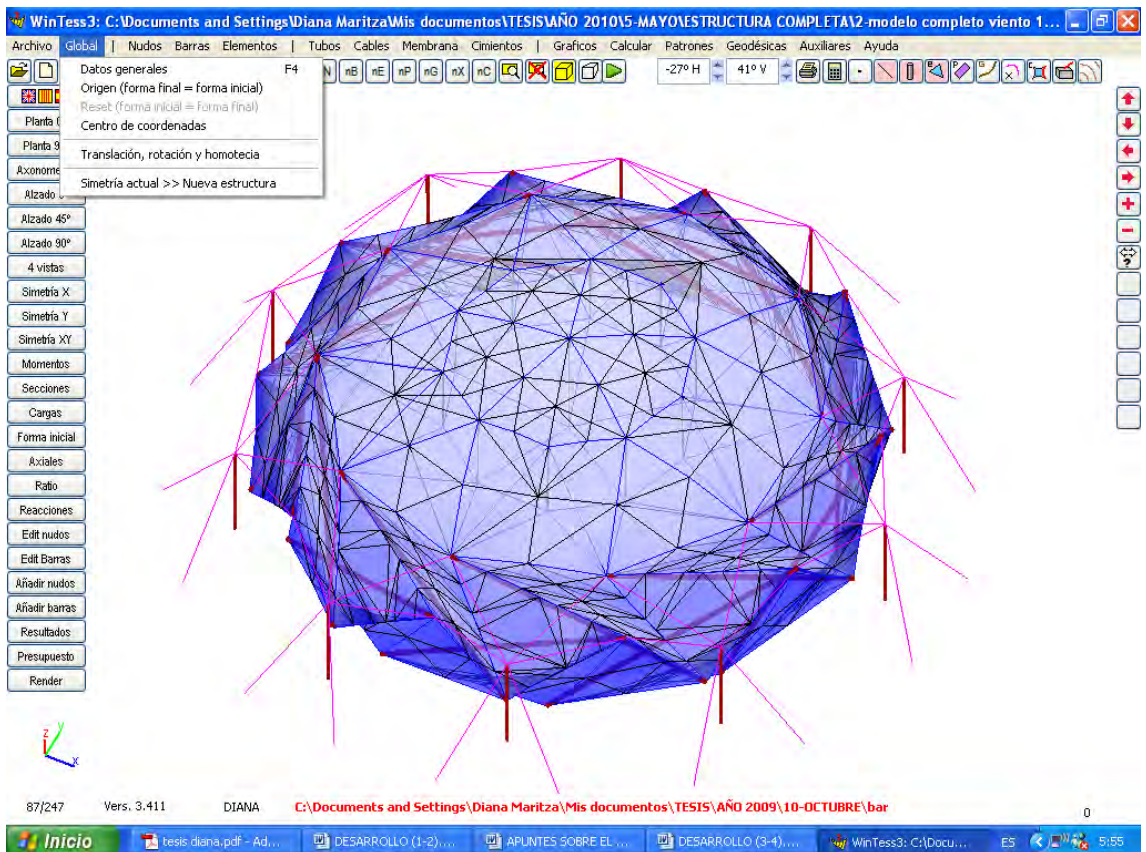


Figura A36. Menú GLOBAL.

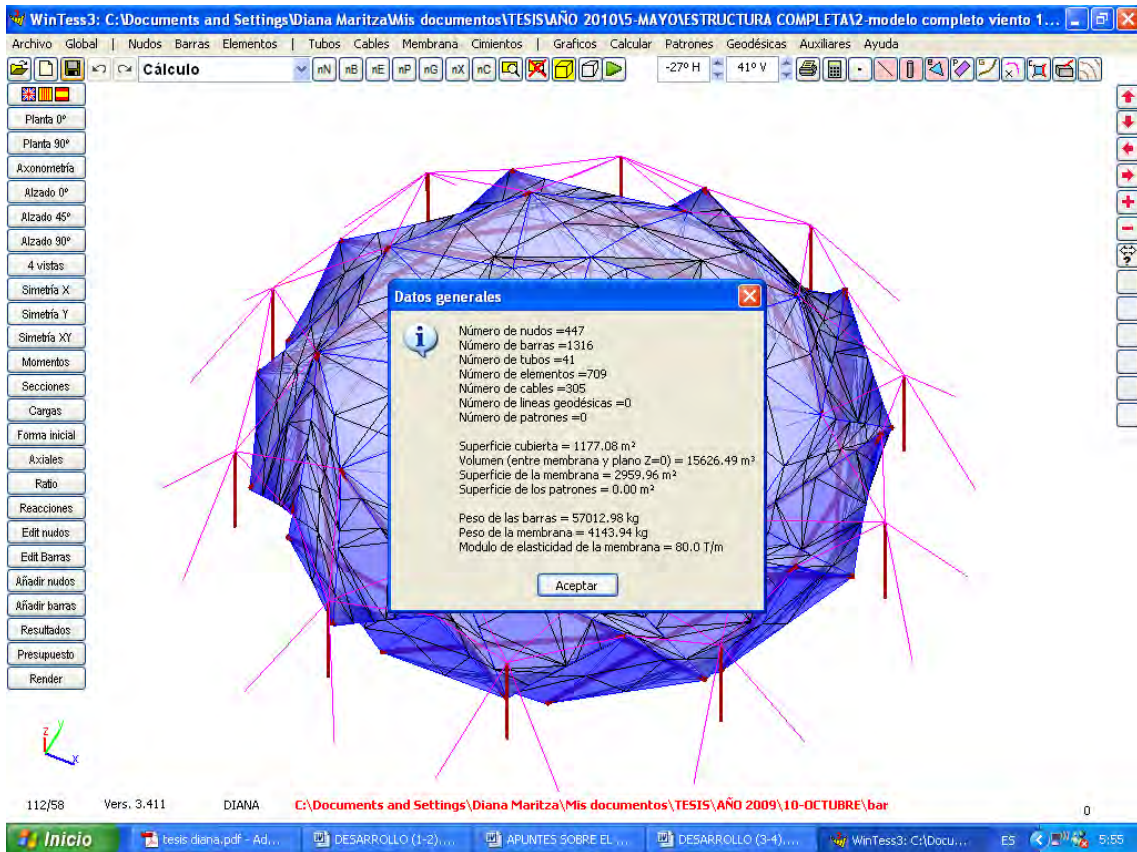


Figura A37. Menú GLOBAL / datos generales de la estructura.

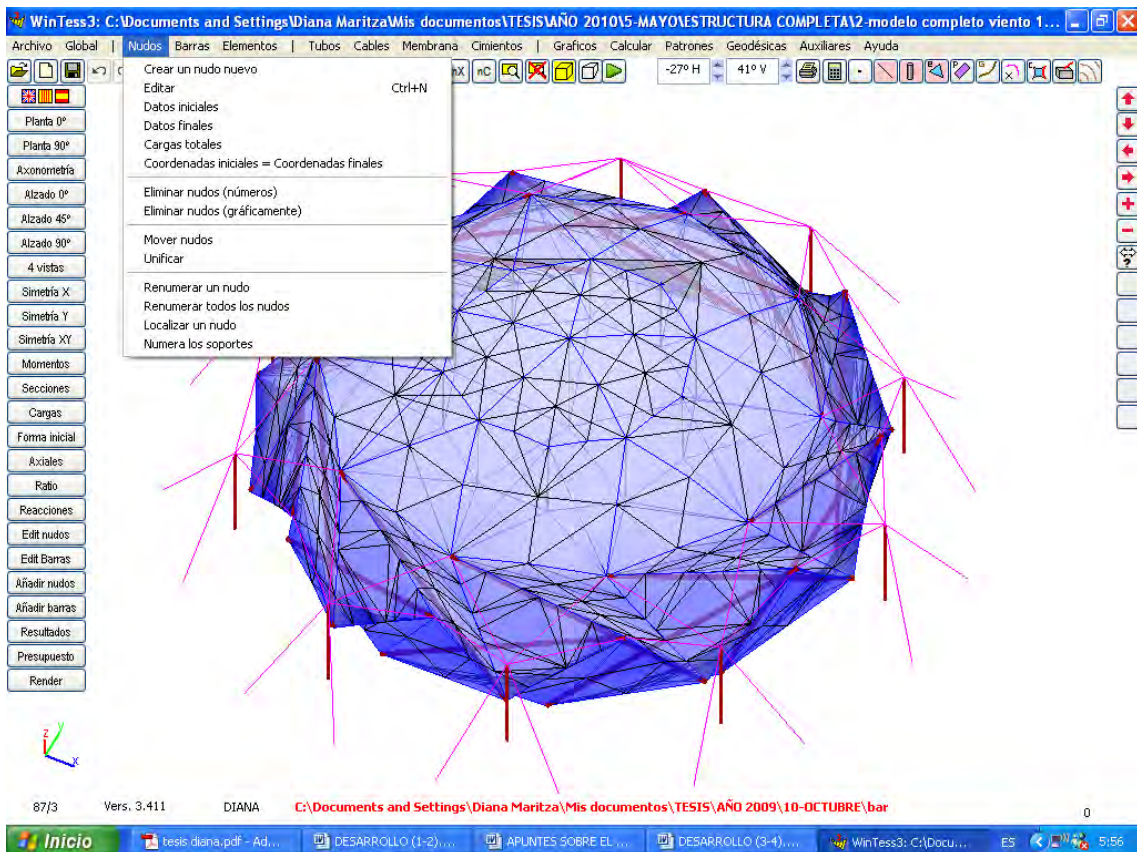


Figura A38. Menú NUDOS.

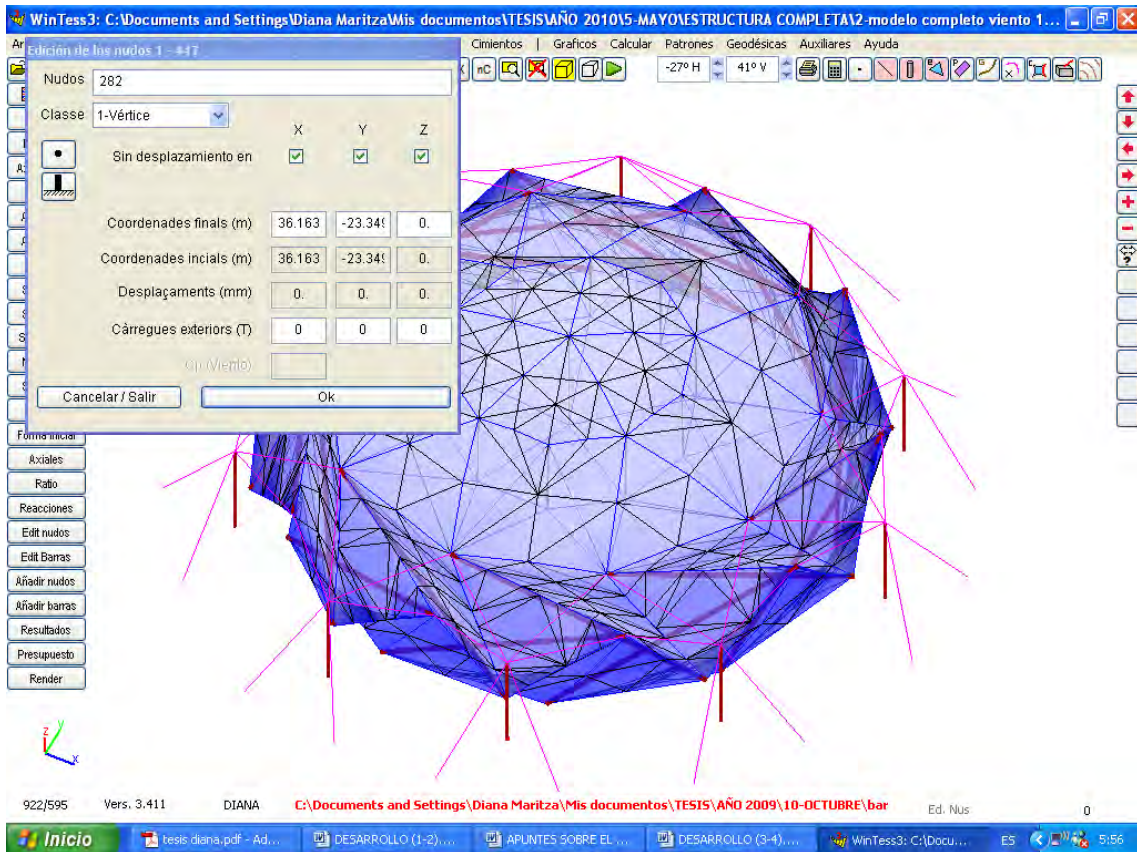


Figura A39. Menú NUDOS / Editor de nudos.

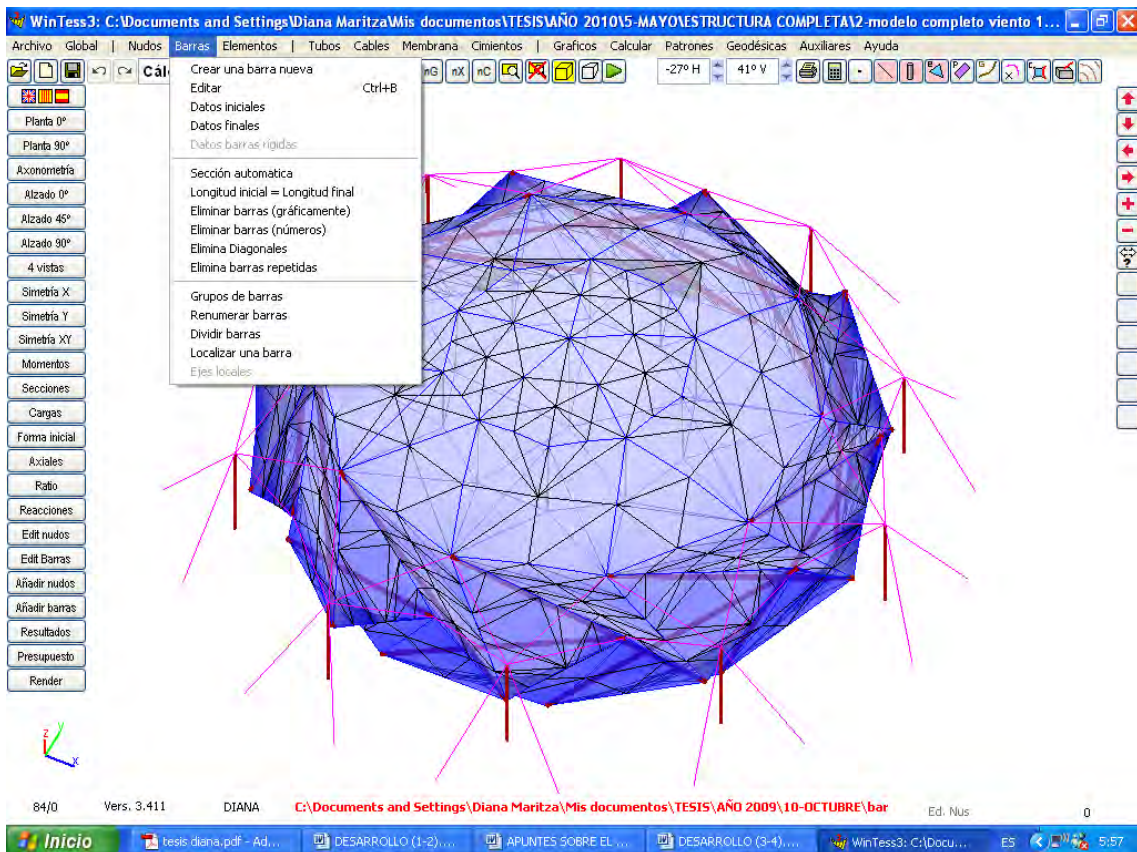


Figura A40. Menú BARRAS.

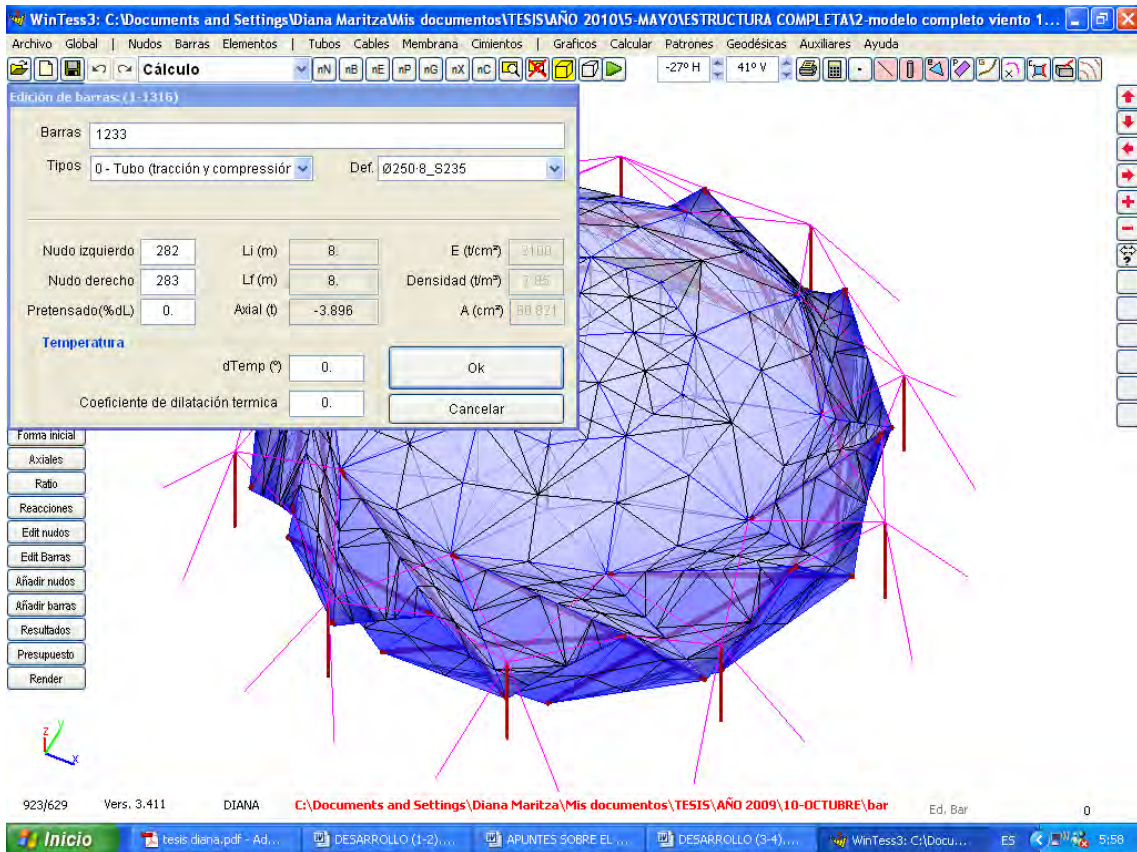


Figura A41. Menú BARRAS / Editor de barras.

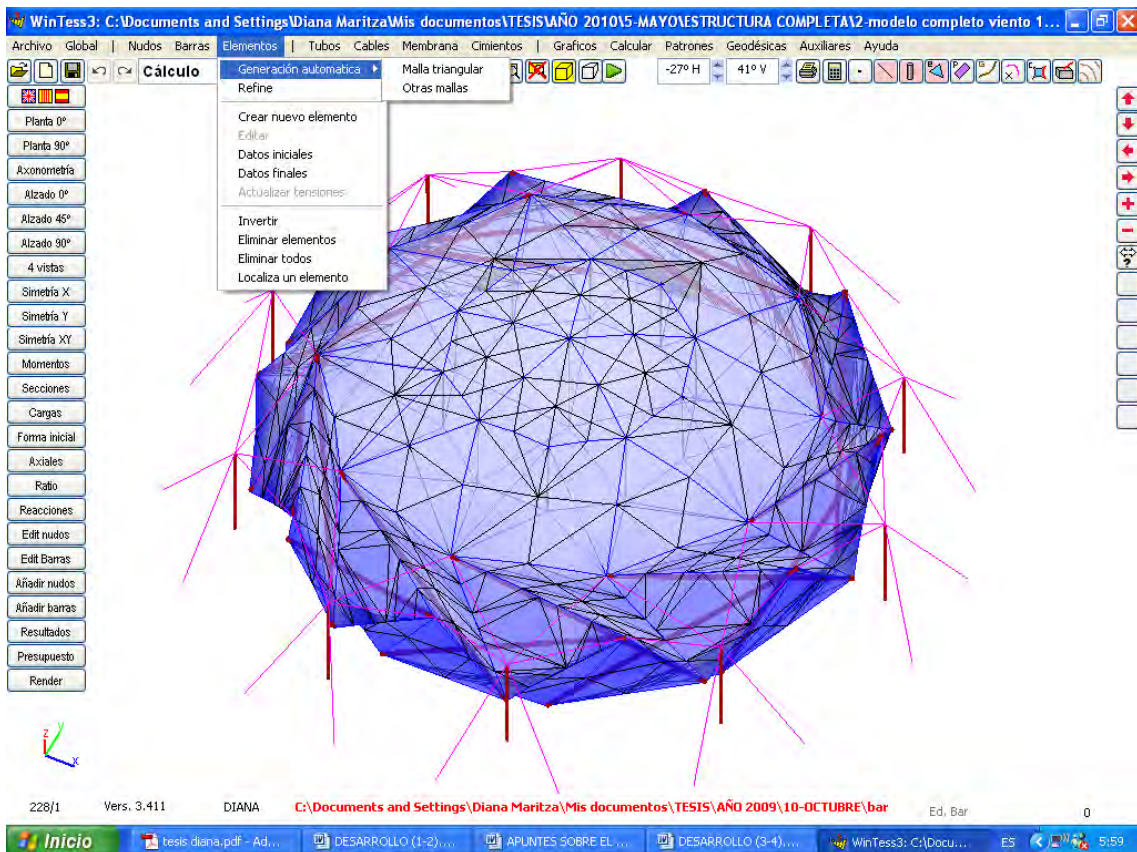


Figura A42. Menú ELEMENTOS.

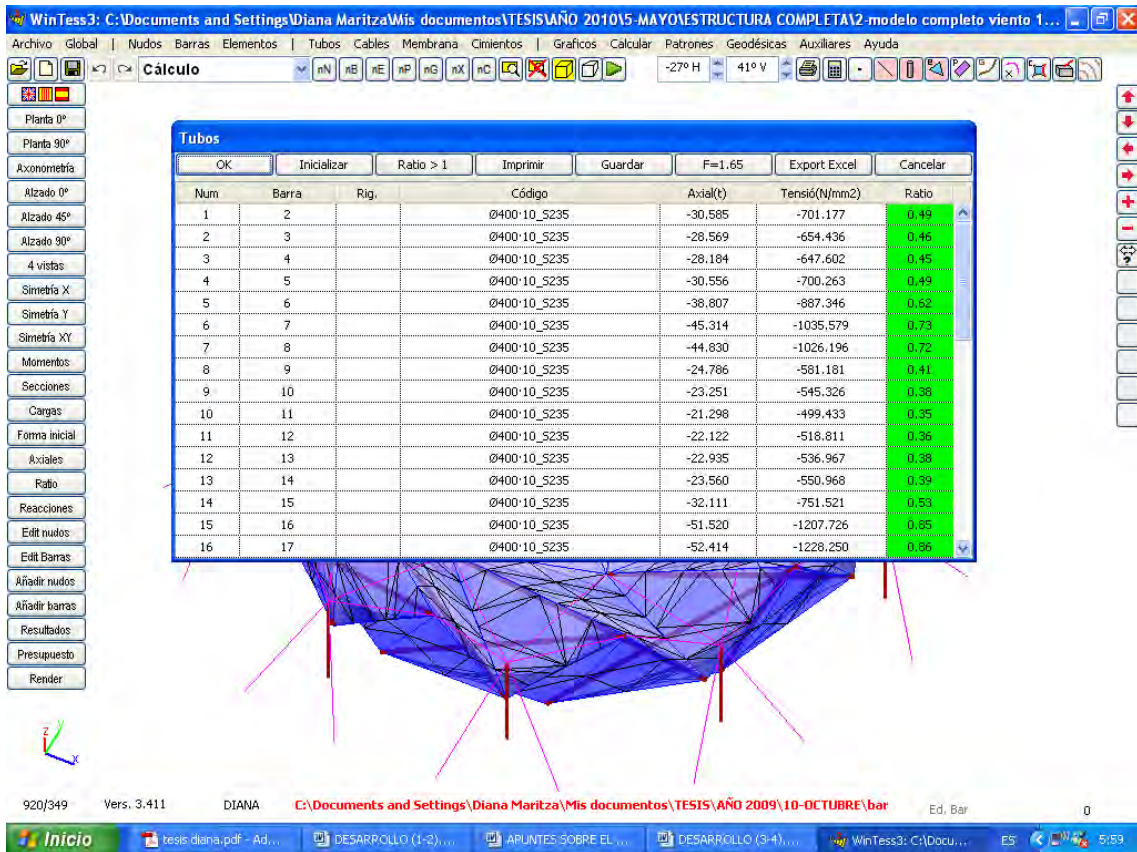


Figura A43. Menú TUBOS / Editor de tubos.

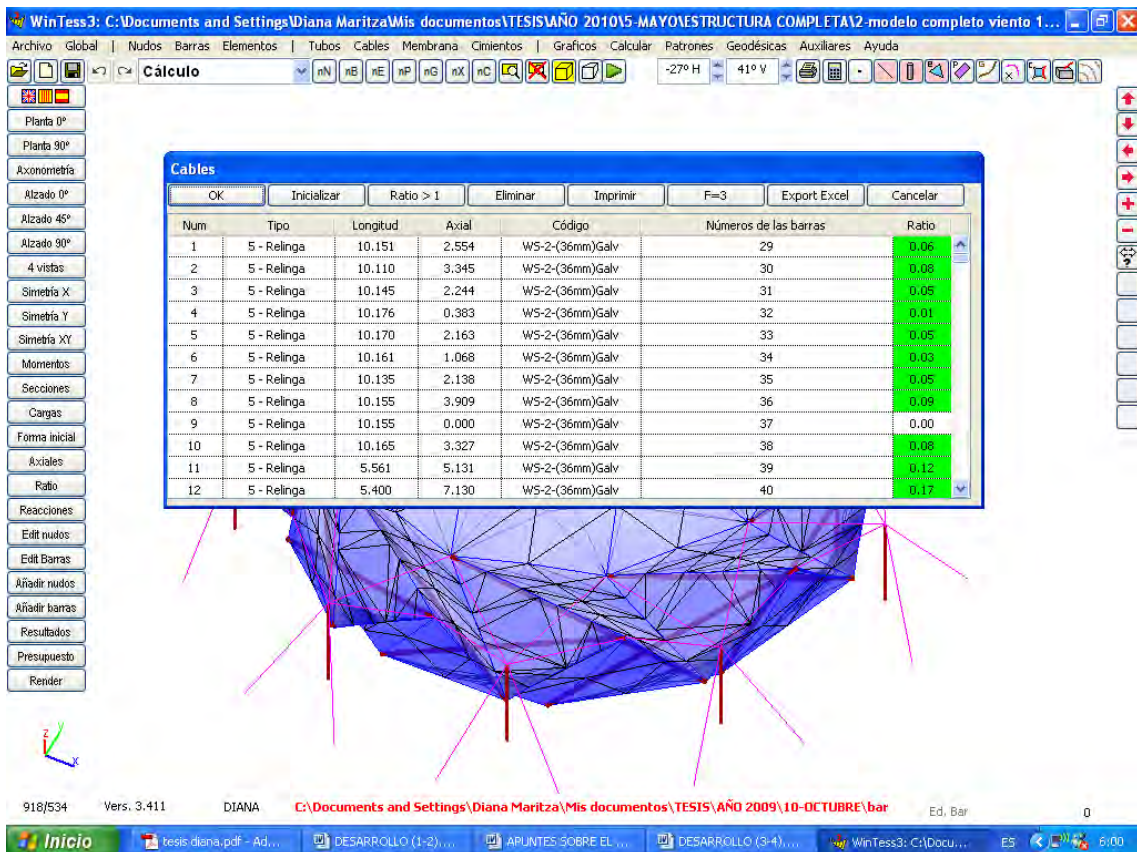


Figura A44. Menú CABLES / Editor de cables.

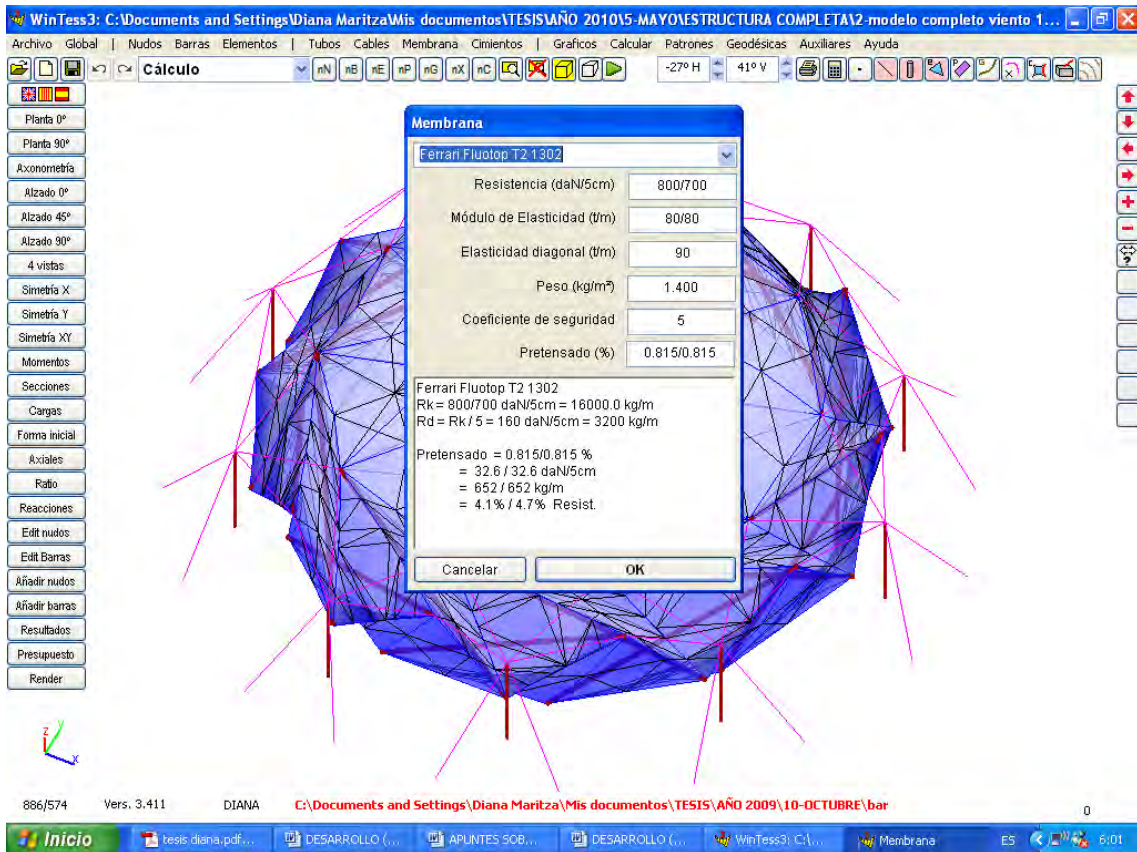


Figura A45. Menú MEMBRANA / Editor de membranas.

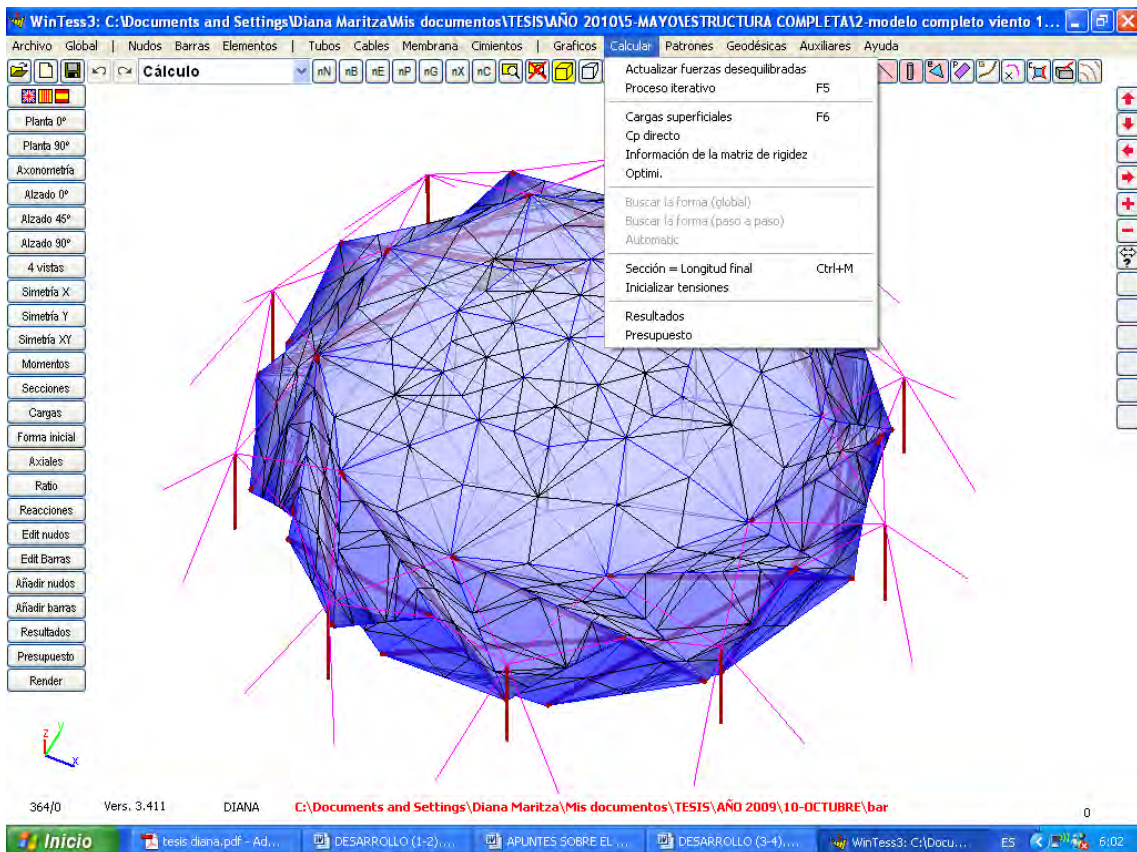


Figura A46. Menú CALCULAR.

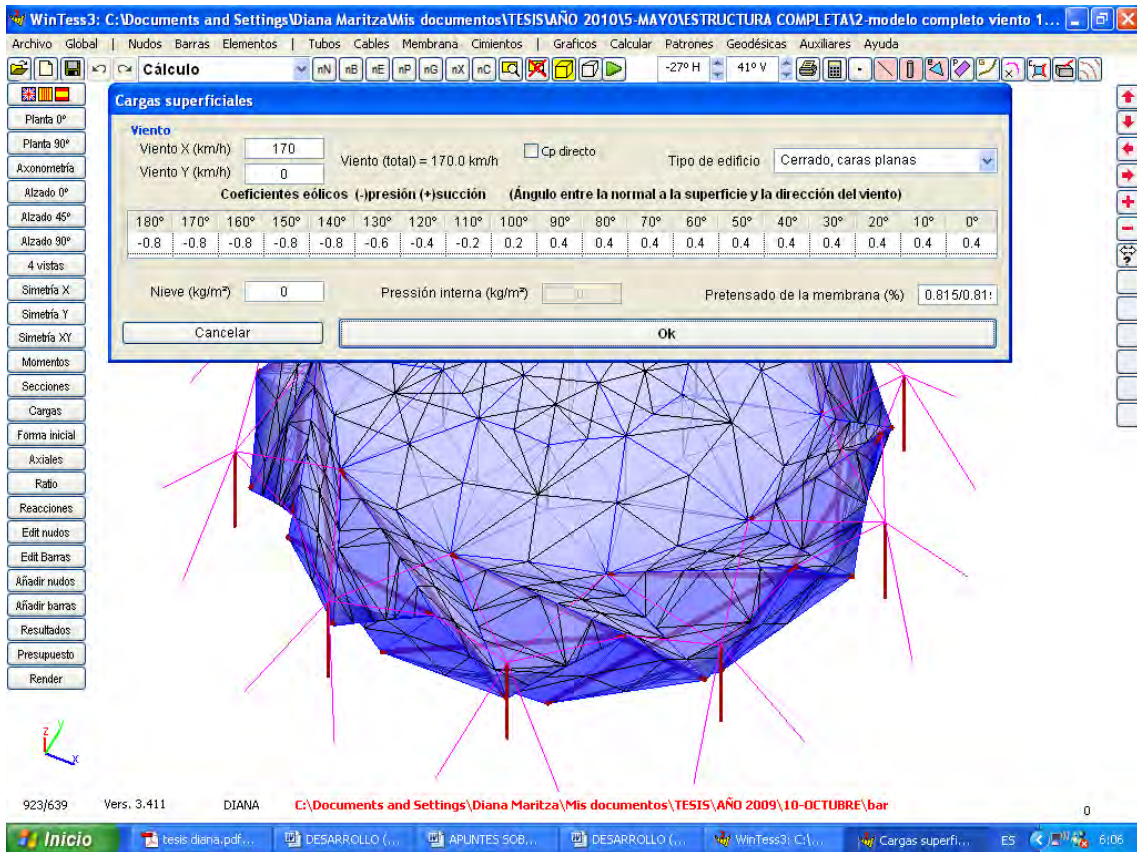


Figura A47. Menú CALCULAR / Editor de cargas superficiales (tecla F6).

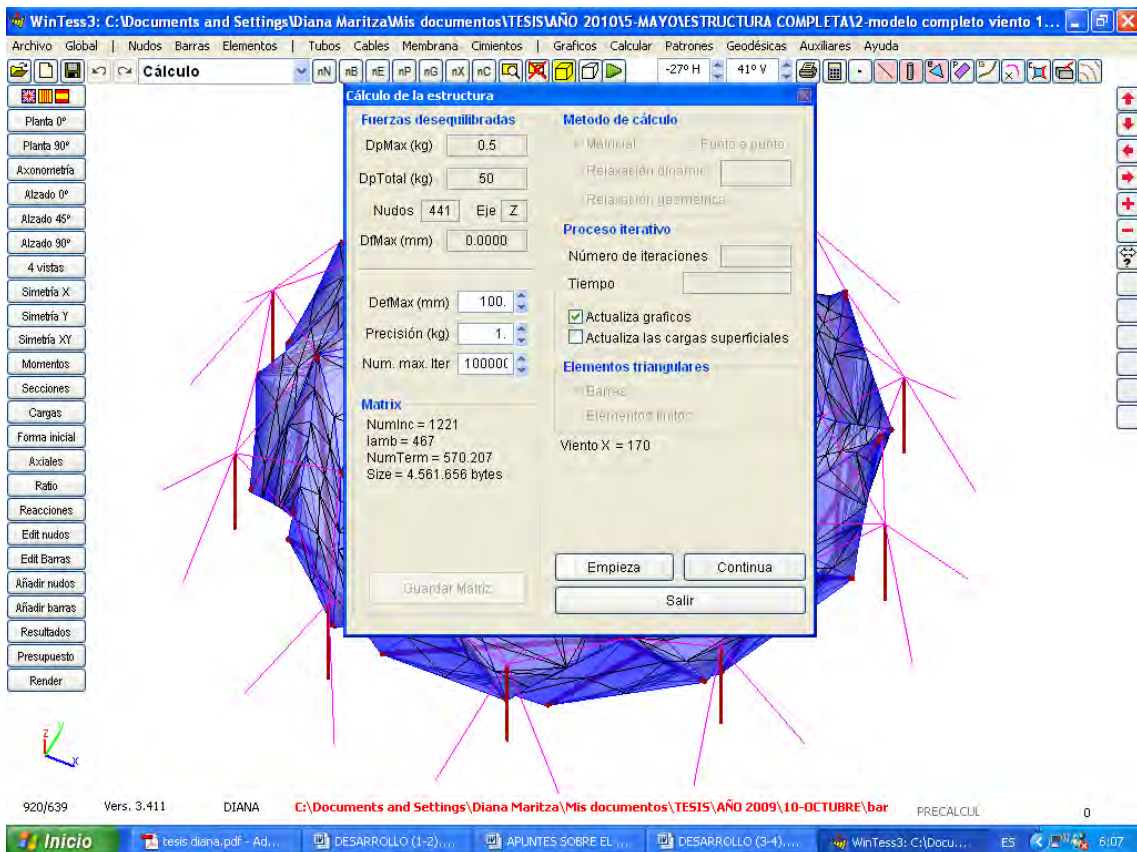


Figura A48. Menú CALCULAR / Editor cálculo de la estructura (tecla F5).

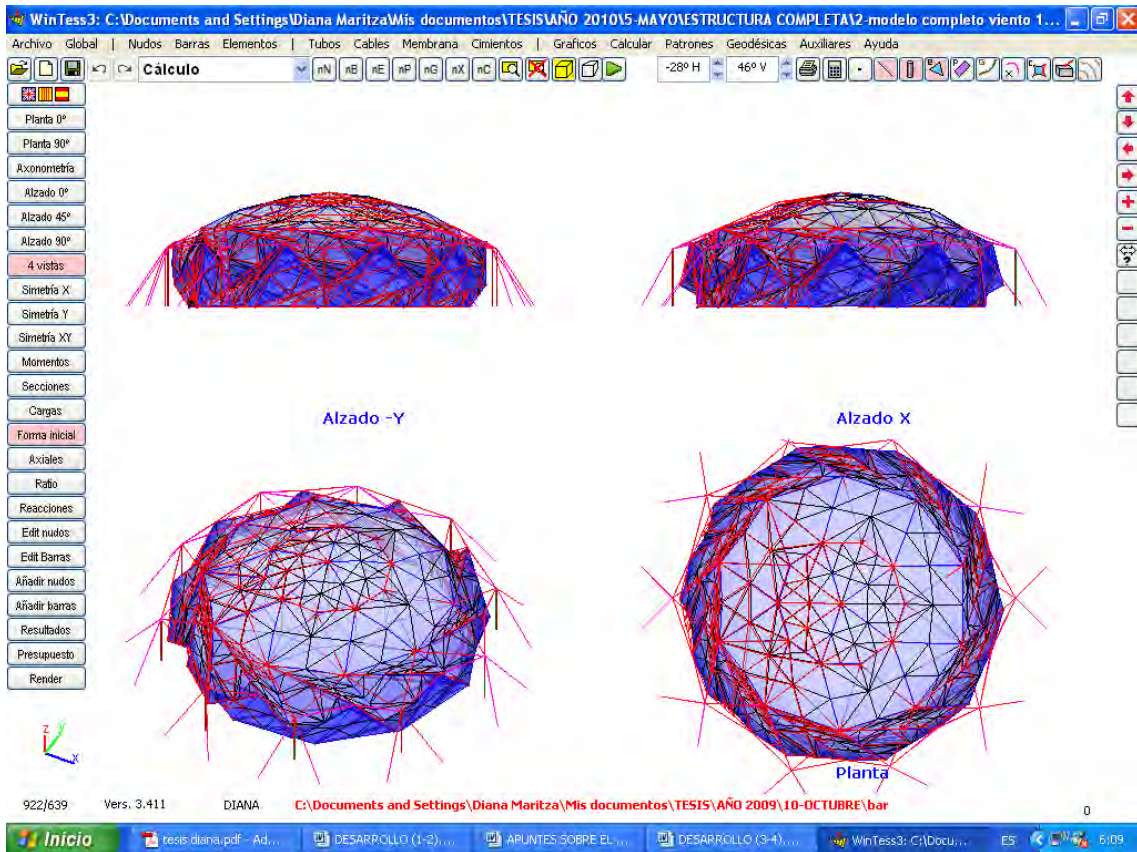


Figura A49. Menú auxiliar de dibujo / 4 VISTAS & FORMA INICIAL.

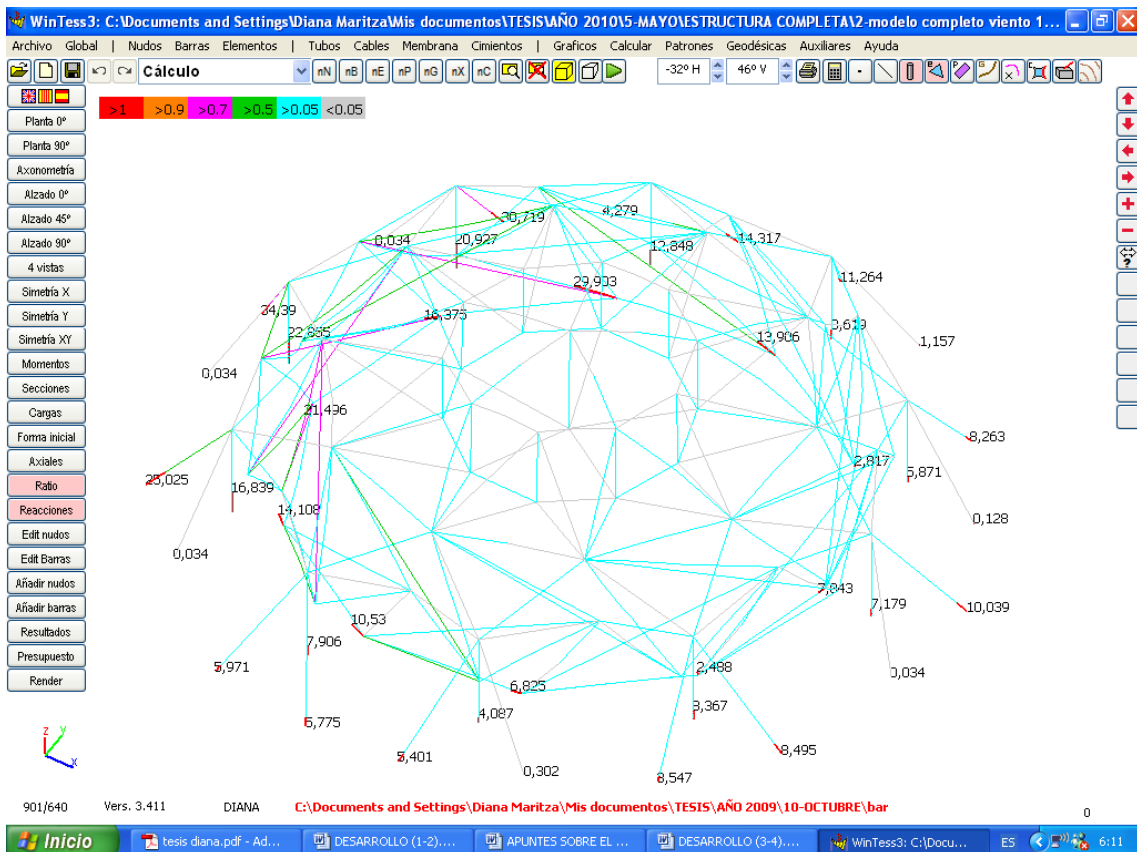


Figura A50. Menú auxiliar de fuerzas / REACCIONES & RATIO.

APUNTES SOBRE WINTESS 3

WinTess es un programa que calcula estructuras de barras en tres dimensiones, barras biarticuladas, barras que aguantan tracción y compresión (no hay flexión en las barras, no se pueden doblar).

Tracción

Esfuerzo al que está sometido un cuerpo o elemento por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto y tienden a estirarlo.

Compresión

Esfuerzo que es la resultante de la tensión o presión que existe dentro de un cuerpo o elemento deformable, continuo. Caracterizada porque tiende a una reducción de volumen o un acortamiento en determinada dirección.

En WinTess aparecen los elementos que simulan una superficie. Semeja una estructura de cables (líneas) muy tupida, lo cual imita una membrana; aunque si creamos un rombo de barras se puede alargar, si fuese una membrana no sería así.

Con el programa se generan unas diagonales para que los cuadrados no se deformen, en el modelo de estudio de la tesis, la estructura está formada por elementos triangulares.

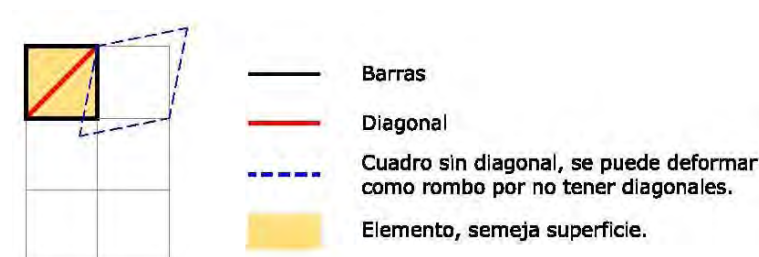


Figura A51. Representación de barras y elementos.

En todo caso una estructura formada por diagonales no necesariamente actúa igual que una estructura en membrana, puede haber diferencias.

Se calcula una estructura en membrana por un programa de barras que es nuestro caso, es una simulación que arroja resultados aceptables.

¿Por qué aparecen superficies?

Por dos razones:

1. Por aspecto formal: para ver las estructuras y entenderlas.
2. Para poder aplicar las cargas: se aplican sobre una superficie en el caso del WinTess en los elementos.

El programa WinTess está formado por:

- Nudos: dan la geometría.
- Barras: dan el cálculo.
- Elementos: dan las cargas.

Dentro de las barras hay las que se pueden comprimir, que dentro del programa son los tubos y las que no se pueden comprimir.

Tipos de barras

1. Membranas: barras que simulan la membrana.



Figura A52. Barra de tipo 1. Membrana.

2. Barra rígida.
3. Longitud fija.
4. Barras diagonales: se crean cuando hay elementos cuadrados, simulan direcciones diagonales de las mallas cuadradas.

El elemento aunque sea triangular no sirve para calcular. Sólo sirven las barras para calcular; los elementos son siempre triangulares pero las mallas son cuadradas y rectangulares.

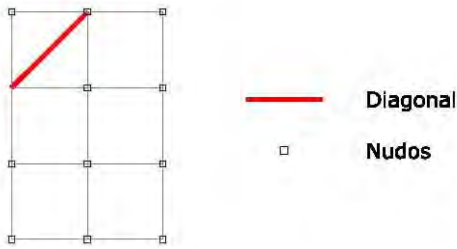


Figura A53.
Barra diagonal.

La barra diagonal sirve para evitar que una malla se deforme de manera rómbica, lo que quiere decir que la barra evita que la malla se deforme en la diagonal.

5. Relinga: son barras que están en el perímetro de las membranas y que aunque sean independientes y lineales las considera como un paquete, como un cable; pero para el cálculo las considera independientes.
6. Viento: es un cable suelto.

Elementos

Elementos son siempre triángulos, forman la superficie de la membrana, por tanto con la suma de los elementos sabemos que superficie hay.

Ejemplo:

- En el menú: global/datos generales/ superficie de la membrana = suma del área de todos los elementos, de todos los triángulos. Aunque no se usen para calcular tenemos información de ellos.
- Superficie de la cubierta: es la suma de la proyección sobre el plano (x,y) de todos los triángulos. Si hubiera patronaje la suma de estos tendría que coincidir con la superficie de la membrana.



El elemento o triángulo está formado por un material que se llama membrana, en la ventana membrana hay una base de datos que se puede ampliar.

Tenemos:

- La resistencia a tracción kN/cm^2 - $\text{daN} \times 5\text{cm}$ - medida de los catálogos).
- Módulo de elasticidad de un material se obtiene de la curva de tensión/deformación del material.

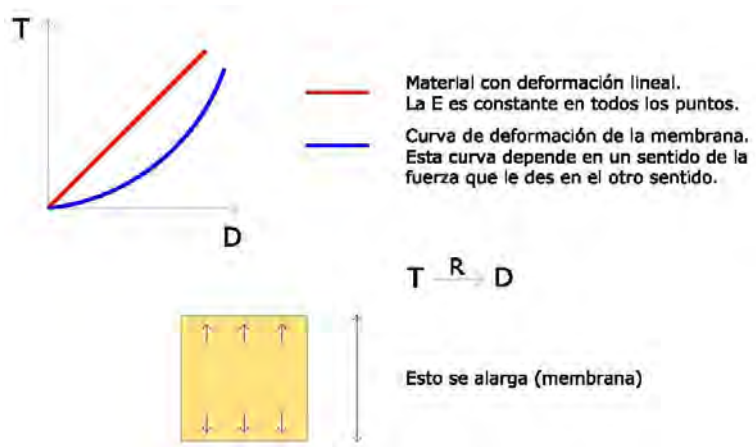


Figura A54. Curva de tensión y deformación del material.

$$E = T \xrightarrow{R} D \text{ (donde D es variable)}$$

Curvas de distinto tipo, distinto ensayo. Ejemplo:

Trama -	Urdimbre
1	- 1
2	- 1
1	- 1

El programa pone una E por defecto, es aproximada pero el usuario la puede cambiar, valores sacados de diferentes ensayos en su día, de diferentes membranas, ensayos de Ferrari.

Valor de E es muy variable.

En el acero si es recta y constante.

Si se le cambia la E, cambia la deformación.

Sabiendo la tensión yo puedo buscar la tangente de la curva y sabría la deformación.

E depende de la tensión



Valores estándares del programa que se pueden variar calculándolos.

Peso/m².

Coefficiente de seguridad: si aguanta o no aguanta.

Ejemplo:

La carga que trabaja se multiplica por el coeficiente 5 y si es menor de la resistencia, entonces quiere decir que aguanta, que no colapsa y al contrario, si tenemos la resistencia y lo dividimos por 5 al compararlo sabemos si aguanta o no a la carga aplicada.

Pretensado

Tensión de la membrana antes de la aplicación de cargas, este valor de pretensado lo usará la estructura. Las barras que son membranas asumen las características que le hemos asignado como membrana.



Figura A55. Barra tipo membrana.

Cargas

- Puntuales en los nudos: ejemplo colgar algo como un faro, cargas de objetos.
- Carga de nieve: se aplica en cada triangulo en función de su proyección, es decir, si un triángulo esta horizontal a 0°, toda la nieve cae en el triángulo, si está vertical a 90°, entonces cero nieve en el triángulo, en el elemento.

Menú elementos / datos iniciales / formado por estos tres nudos, tiene área total del triángulo, proyección en z, en alzados, inclinación del elemento, en función de esto se calcula la carga en el elemento (carga de nieve en el triángulo).

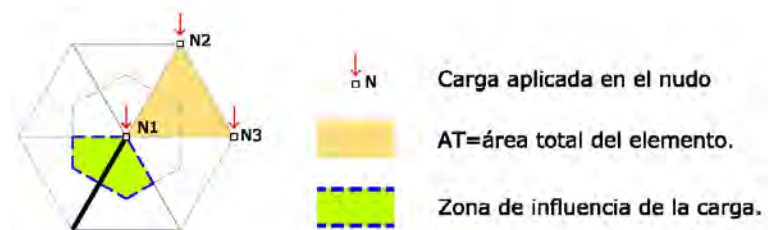


Figura A56. Esquema de cargas.

Cargas de nieve

Las cargas de la nieve están calculadas en la proyección de la superficie, cada triángulo tiene un área real y una en planta.

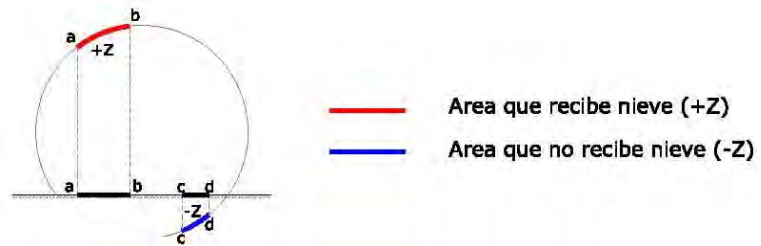


Figura A57. Esquema de carga de nieve.

Cargas de viento

El viento es la carga principal en nuestro caso de estudio de la tesis. La carga de viento es una fuerza perpendicular a la superficie (da una carga de presión o de succión) esto lo admiten todas las normas.

La succión y la presión dependen de la velocidad del viento y el ángulo de incidencia.

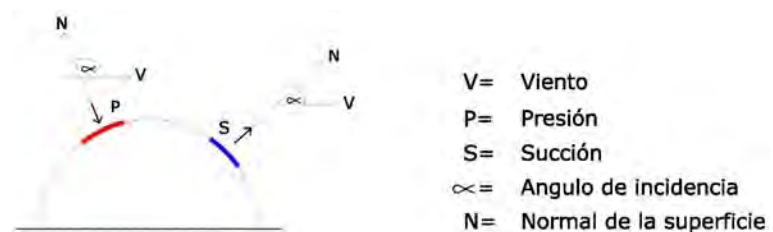


Figura A58. Esquema de carga de viento.

En el WinTess el viento siempre lo considera horizontal.

$$P = f(V, \alpha)$$

La dirección del viento depende de (V_x, V_y)

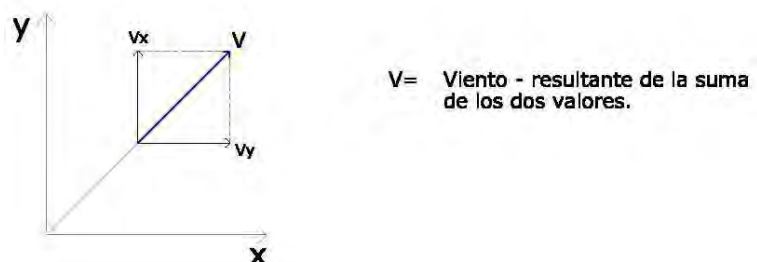


Figura A59. Esquema de resultante del viento.

Según la dirección que le pongas al viento puede ser un valor negativo dentro del programa. En mi caso de estudio como es un elemento circular será igual venga de donde venga, si fuera asimétrica si importaría la dirección de donde viene el viento.

Coeficiente eólico obtenido del ángulo alfa ($< \alpha$)
 (Gran discusión teórica, estos valores son los que se obtienen del túnel de viento).

El coeficiente eólico nos dice la fuerza que hay en una membrana en función del ángulo alfa ($< \alpha$).

Donde $F = \text{presión dinámica}^{*1} \times \text{coeficiente eólico}^{*2}$
 $F = \text{fuerza}$
 $*1 = \text{depende sólo de la velocidad del viento}$
 $*2 = \text{depende sólo del ángulo}$

$$W = \frac{V^2 \text{ (m/s)}}{16} \quad \text{fórmula de mecánica de fluidos.}$$

$$V \rightarrow \text{m/s}$$

$$\text{Presión dinámica (kg/m}^2\text{)}$$

$$W \rightarrow \text{kg/m}^2$$

En función de la forma del edificio este coeficiente tiene un valor u otro.

En el programa tenemos coeficientes eólicos hallados, coeficientes estándares. (Fig.A47)

Ejemplo= 0,4 (coeficiente eólico) x presión dinámica (depende de la velocidad del viento)

El programa calcula la dirección del viento, la normal, el ángulo alfa y en función de los valores aplica el coeficiente eólico. Hay una opción manual donde se puede cambiar el valor del coeficiente eólico.

Ejemplo. Edificio cerrado \rightarrow respectivos valores
 Edificio neumático

El autor del programa propone unos valores típicos y yo los acepto, sino se cambian manualmente.

En la pantalla del programa: sino hay elementos creados no se activa el cuadro.

Cargas superficiales

- Presión interna (hinchables): la carga va a los elementos y por tanto dividida en tres a los nudos.
- Viento: la carga va a los elementos y por tanto dividida en tres a los nudos.
- Nieve: la carga va a los elementos y por tanto dividida en tres a los nudos.
- Pretensado: la carga va a las barras y por tanto dividida en dos a los nudos.

Cargas puntuales en los nudos, cargas exteriores que serían por ejemplo objetos colgados, luminarias, señalización, etc.

Pantalla de cálculo de la estructura. (Fig.A48)

Tiene diferentes métodos de cálculo.

Método matricial: es el que usaremos, los otros son de investigación del autor del programa.

En el método matricial el programa genera un sistema de ecuaciones.

1. No. de incógnitas

Ejemplo. 1191 → No. de ecuaciones (son los desplazamientos de los nudos).

Los nudos se pueden desplazar en (x,y,z).

Este sistema de ecuaciones se resuelve a través de un cálculo matricial.

Se usan matrices lo que quiere decir que multiplica los números de forma matricial (calcula los números con ecuaciones lineales).

Todo el cálculo se hace con las barras, los elementos sirven para buscar las fuerzas, las sombras, los pesos, pero no para calcular.

2. **Proceso iterativo:** muestra el número de iteraciones (ecuaciones) y cuánto tiempo tarda en resolverlas.
3. **Defmax. (mm):** le permito a cada iteración cuánto se puede deformar y esto se hace porque se podría desplazar demasiado.
4. **La precisión:** es cuándo parará, cuando el valor de la Defmax. (deformación máxima) en un nudo sea menor o igual que un kg. ($n1 \leq 1 \text{ kg}$) entonces se parará.

5. **Num.max.iter:** número máximo de iteraciones. Ejemplo 100.000, cuando llegue a este número también se parará.
6. **DpMax:** carga máxima desequilibrada en un nudo.
7. **DpTotal:** suma de todas las cargas máximas desequilibradas.
8. **Nudos:** cual es el que está peor (mayor desequilibrio) y en que dirección (x,y,z).
9. **Dfmax (mm):** lo que se ha movido en la última iteración.

La estructura debe llegar al equilibrio.

En el cuadrado general del programa si activamos el icono cargas (tecla F6), podemos ver las cargas que están activadas en la estructura, van a los nudos, algunas cargas no las vemos porque están debajo de la membrana, estas cargas son de succión.

La succión que tiene un elemento depende de la velocidad del viento y del ángulo de incidencia. (Esto depende del código técnico, de las normativas que no nos sirven para las membranas) por eso en el programa, en el cuadro de cargas superficiales, en tipo de edificios se puede escoger las formas de un diedro, de una cubierta, planos exentos, etc.

La presión y la succión dependen de la velocidad del viento. (Fig.A58)

$$\begin{aligned}
 V &\rightarrow W \text{ (presión dinámica)} \\
 \alpha &\rightarrow \text{coeficiente eólico}
 \end{aligned}$$

Según lo que escoja da diferentes valores, diferentes coeficientes de succión y de presión, hay el formato manual donde puedo colocar directamente los valores. Por ejemplo los valores que resulten de la prueba del túnel de viento se pueden colocar directamente aquí, en este formato manual.

Cuando se tiene una cubierta de forma semicircular aunque sea cerrada, el viento va más deprisa, succiona más y da valores más grandes que en las cuadradas, tiene más rozamiento.

Un usuario más crítico pondrá sus propios valores, sus propios coeficientes eólicos, se sacan de un estudio de viento (túnel de viento).

Túnel de viento



Para la prueba del túnel de viento se debe hacer un modelo a escala, se hacen unos huecos para allí conectar los tubos o sondas que medirán el aire que pasa. Según su posición en la superficie de la cubierta se medirá la cantidad de aire que succionan o presionan. (Fig.A60)

Si estos tubos tuvieran agua se vería como el agua cambia de nivel y se obtiene la succión y presión en cada punto (Fig.A61). Los valores encontrados serían los que entraríamos manualmente en el programa, en el cuadro de coeficientes eólicos. (Fig.A47)

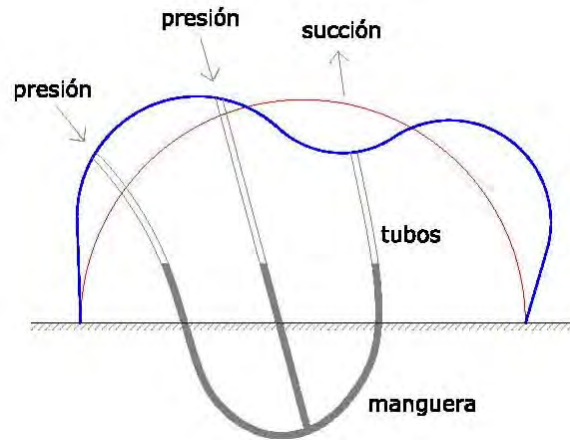


Figura A60.
Túnel de viento.

Figura A61. Representación de succiones y presiones en un modelo a prueba en túnel de viento.



Figura A62.
Representación de la nieve

En el caso de la nieve el programa supone que la nieve queda uniformemente puesta en todos los puntos, en cada punto le ponemos una cantidad de nieve, si es un tramo vertical es 0, pero no tiene en cuenta acumulaciones, hay que hacerlo a mano. (Fig.A62)

Se podría colocar la nieve en toda la cubierta y colocar manualmente cargas en los puntos que sean el doble de la nieve.

TÚNEL DE VIENTO - APÉNDICE C.



DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO



Figura A63.
Ventilador del túnel Ø 80cm.



Figura A64.
Frecuencia del motor 0 a 50 Hz.

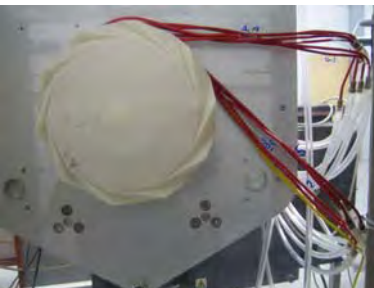


Figura A65.
Modelo Ø 17cm - Esc 1:250

El túnel de viento es abierto, está formado por un ventilador de un diámetro de 80cm (Fig.A63). Trabaja por aspiración (estilo Eiffel), es decir, el aire es acelerado a través de una boquilla o inyector y enviado al modelo, por lo que el perfil es de flujo laminar. La frecuencia del motor es de 0 Hertz a 50 Hertz que equivale a 70km/h de velocidad del viento (Fig.A64)

Nuestro modelo tiene un tamaño de 17cm de diámetro y una escala de 1:250 (Fig.A65) y la velocidad de flujo libre en la prueba varió entre 5 y 20m/s. Que corresponde al número de Reynolds de 5×10^4 y 2×10^5 , el cual es un régimen completamente turbulento, lo que corresponde a la simulación del modelo en tamaño real.

La maqueta que se sometió al túnel de viento fue creada en una impresora de modelos tridimensionales (Fig.A66), se construyó con un material plástico rígido (Fig.A67,A68) mientras que la estructura del mundo real tiene una cubierta de membrana flexible.

El modelo tiene unos puntos de toma de aire (Fig.A69) que corresponde en nuestro ejemplo a 13 sondas (S_1 a S_{13}), por donde se realiza la toma de muestras de aire de presiones y succiones

Después de las tomas de aire, a través de unas mangueras plásticas conectadas del modelo a un sensor electrónico y leído por un computador que por medio del Versatile Data Software, arroja los resultados que serán analizados para determinar los coeficientes de presión (Fig. A70,A71)

Las fuerzas medidas con el modelo han sido escaladas al mundo real vía fórmula, asumiendo que en el modelo actúan como un cuerpo rígido y en el mundo real actúan como un cuerpo flexible.

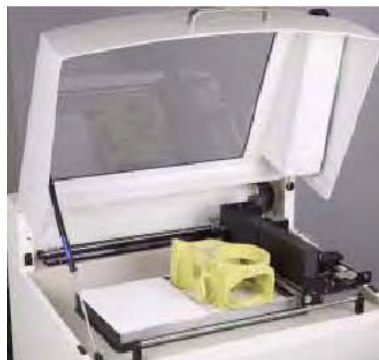


Figura A66. Impresora de modelos en tres dimensiones.



Figura A67. Modelo en material plástico.

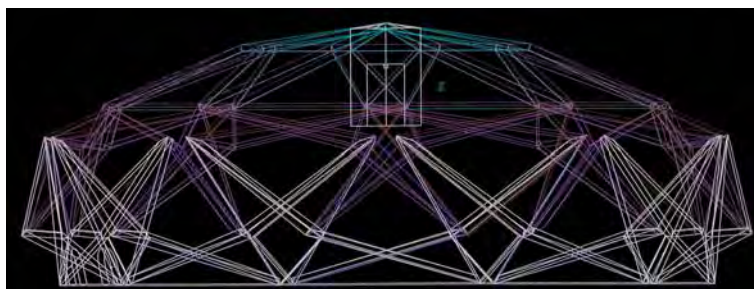
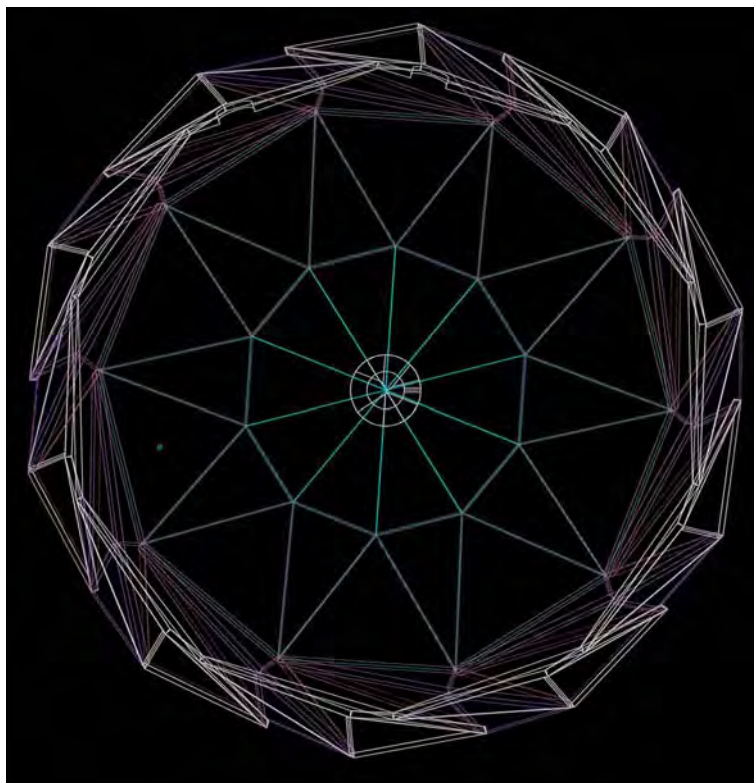


Figura A68. Modelo Ø 17cm - Esc 1:250
Planta y alzado.



Figura A69.
Tomas de aire sondas S₁ a S₁₃ .



Figura A70. Sensor electrónico del túnel de viento que se conecta al ordenador.



Figura A71. Detalle del sensor electrónico del túnel de viento que se conecta al ordenador.

SOFTWARE VERSATILE DATA USADO EN EL TÚNEL DE VIENTO

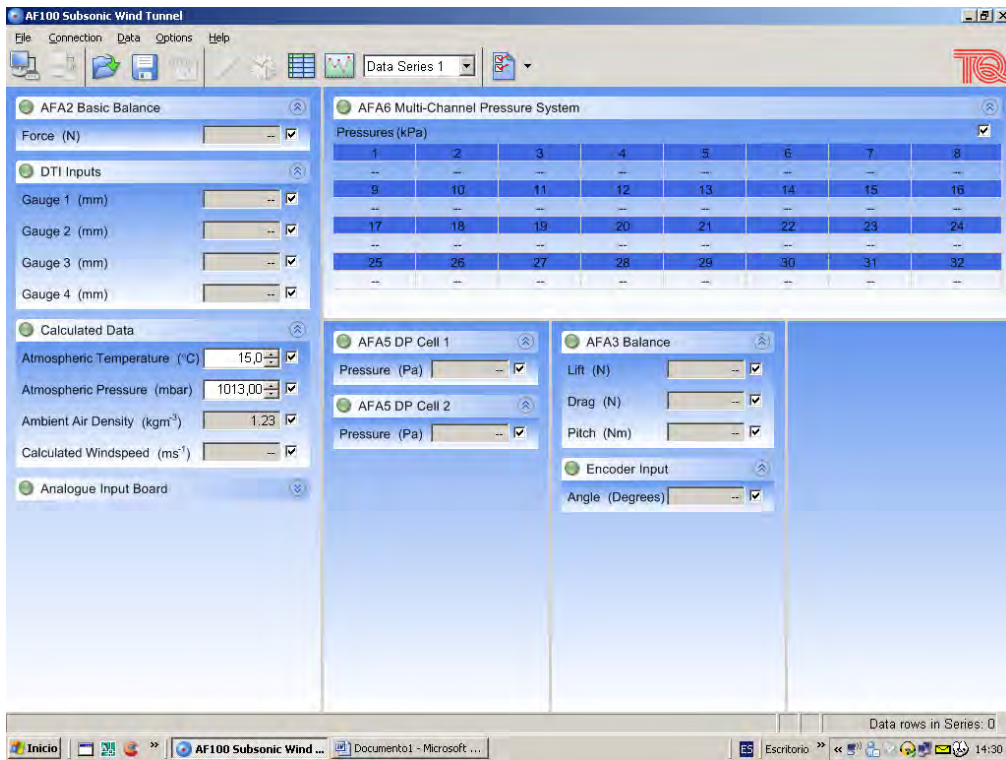


Figura A72. Pantalla General de Versatile Data Software con el que hacemos las mediciones del modelo. CONEXIÓN DEL SOFTWARE CON EL TÚNEL DE VIENTO.

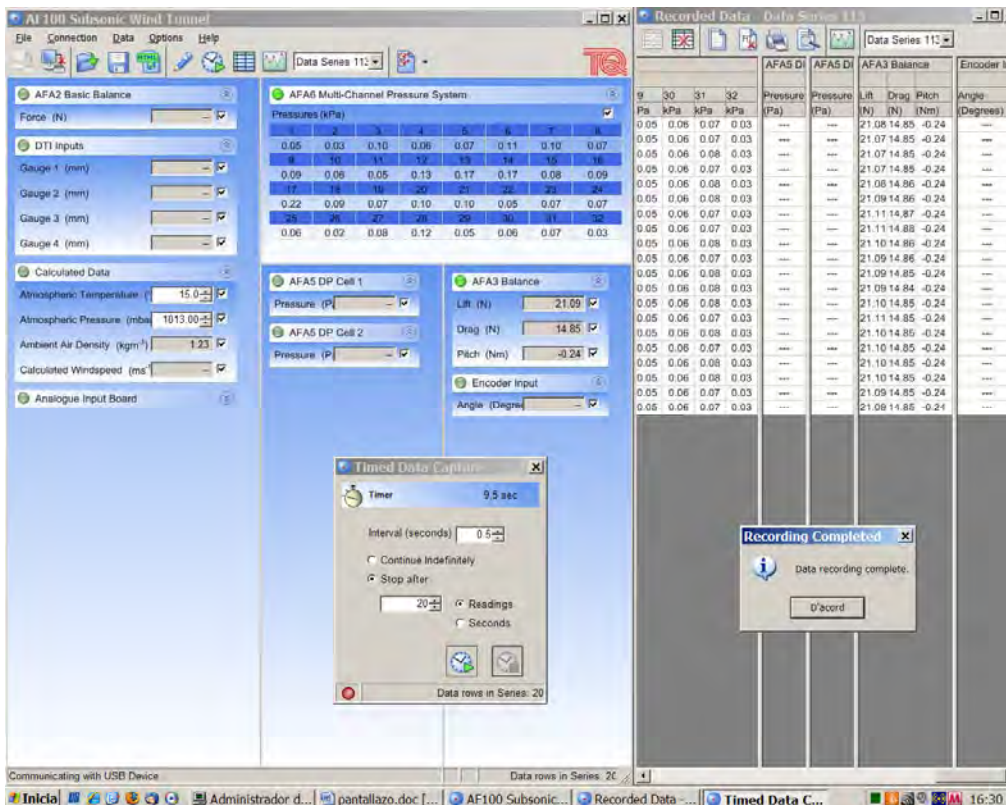


Figura A73. Toma de muestra de presiones y succiones - Captura usando el Time Data cada 5 segundos 20 tomas - Total de tiempo 9.5 segundos por toma de cada sonda.

COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN - TOMA DE MEDIDAS (Versatile Data Software)

Time										Data Series 1														
AFA2 Basic Balance					DTI Inputs					Calculated Data				AFA6 Multi-Channel Pressure System										
Time	Masa	Gauge 1	Gauge 2	Gauge 3	Gauge 4	Atmospheric Temperature	Atmospheric Pressure	Ambient Air Density	Calculated Windspeed	Pressures (kPa)														
(s)	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kgm ⁻³)	(ms ⁻¹)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
0	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
0.5	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
1	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
1.5	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
2	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
2.5	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
3	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
3.5	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
4	505.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
4.5	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
5.2	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
6	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
6.8	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
7	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
7.5	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
8	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
8.8	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
9	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	
9.5	506.4	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	

COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN - TOMA DE MEDIDAS (Versatile Data Software)

Time																																Data Series 1																
AFA2 Basic Balance															DTI Inputs																	Calculated Data	AFA5 DP Cell 1					AFA5 DP Cell 2					AFA3 Balance			Encoder Input		User Defined
Time	Masa	Gauge 1	Gauge 2	Gauge 3	Gauge 4	Atmospheric Temperature	Atmospheric Pressure	Ambient Air Density	Calculated Windspeed	Pressures (kPa)													Pressure	Pressure	Lift	Drag	Pitch	Angle	Velocity																			
(s)	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°C)	(mbar)	(kgm ⁻³)	(ms ⁻¹)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	(Pa)	(Pa)	(N)	(N)	(Nm)	(Degrees)	m/s																		
0	499.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.05	1.38	--	NaN																		
0.5	499.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.06	1.38	--	NaN																		
1	499.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.06	1.38	--	NaN																		
1.5	499.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.06	1.38	--	NaN																		
2	499.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.05	1.38	--	NaN																		
2.5	499.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.05	1.38	--	NaN																		
3	499.8	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.05	1.38	--	NaN																		
3.5	500.6	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9568	15.05	1.38	--	NaN																		
4	500.6	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9627	15.03	1.38	--	NaN																		
4.5	500.6	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9627	15.03	1.38	--	NaN																		
5	500.7	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9627	15.03	1.38	--	NaN																		
5.5	500.7	--	--	--	--	20	1013	1.2	--	0.08	0.07	0.13	0.1	0.08	0.14	0.12	0.1	0.1	0.07	0.08	0.14	0.18	0.17	--	--	4.9627	15.03	1.38	--	NaN																		
0.07	0.08	0.2	0.08	0.06	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.02	0.07	0.1	0.04	0.05	0.06	0.04	--	--	4.9627	15.03	1.38	--	NaN	0.08	4E-17	0.04	7.1E-18	4.9601	0.003																			

Figura A74. Ejemplo de toma de datos, muestras de presiones y succiones.

En la figura A74 vemos un ejemplo de la hoja que genera el software Versatile Data con las medidas originales de las sondas de 1 a 13 (columnas kPa 1 a kPa 13). Las columnas kPa 31 y kPa 32 son las medidas de presión del tubo de pitot que utilizamos para medir la velocidad del aire en el túnel. kPa 31 presenta la presión total y kPa 32 la presión estática.



FOTOS DE LA TOMA DE MUESTRAS DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN Y DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE.

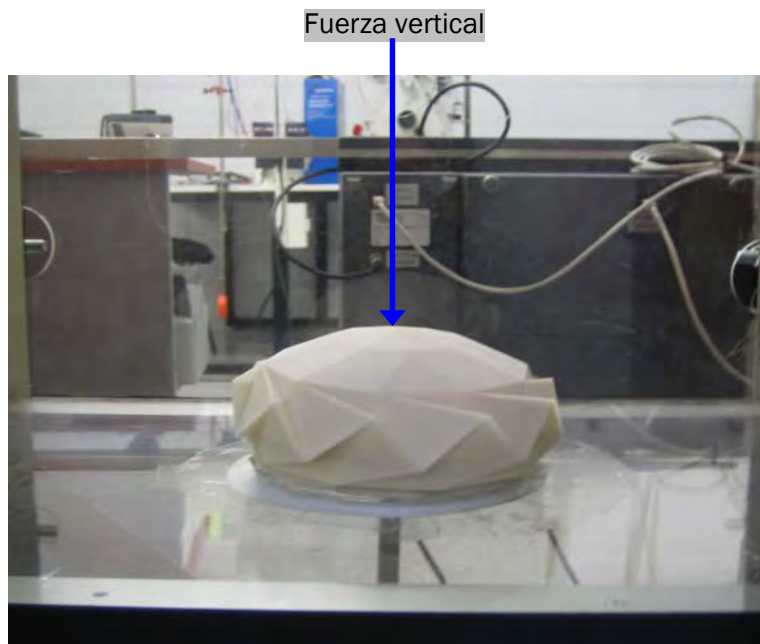


Figura A75. Coeficiente de sustentación – fuerza vertical.

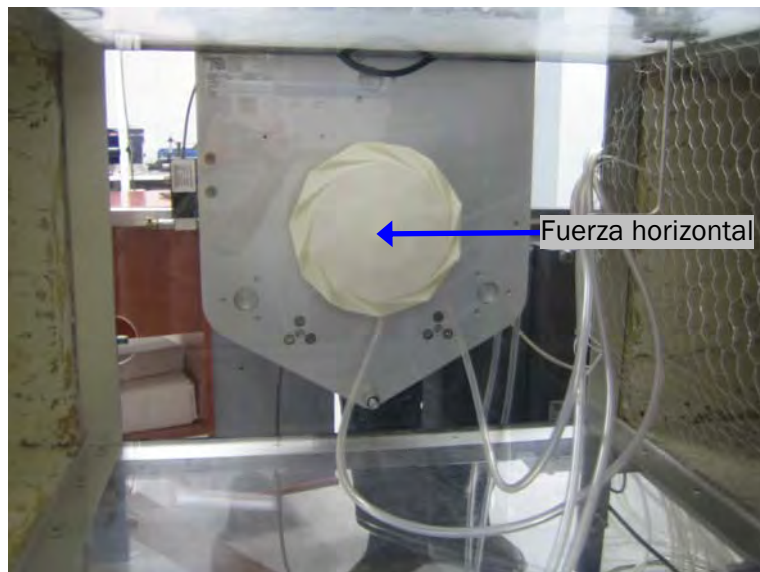
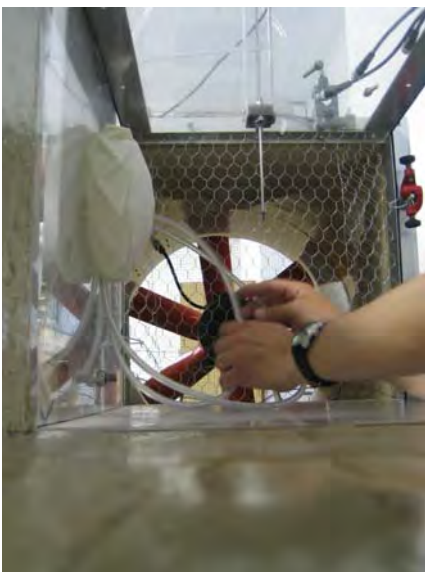


Figura A76. Coeficiente de arrastre – fuerza horizontal.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS VALORES COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN

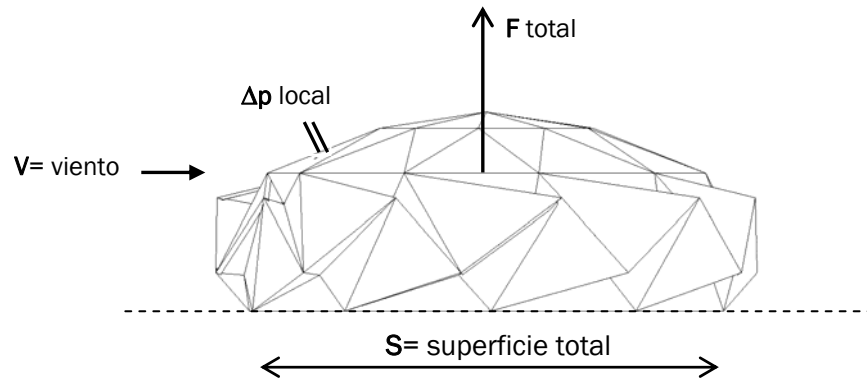


Figura A77. Esquema de fuerzas

¿Por qué medimos de dos maneras?

Medición global:

$$C_p \text{ global} = \frac{F \text{ total}}{S} \div \frac{1}{2} \delta \times V^2$$

δ = densidad del aire

V = velocidad

S = superficie

Medición local:

$$C_p \text{ local} = \frac{\Delta p \text{ local}}{\frac{1}{2} \delta \times V^2}$$

Entonces se puede calcular toda la fuerza **F** total integrando (que quiere decir sumando Δp local x Superficie total, sobre todo el techo). La fuerza total de un edificio es la suma total de todas las fuerzas que actúan en los diferentes puntos del edificio.

Al comparar la medición global con la medición local el valor que obtenemos no dará igual pero es similar.

Medición global: C_p global -0.36

Medición local: C_p local -0.20

Medición local:

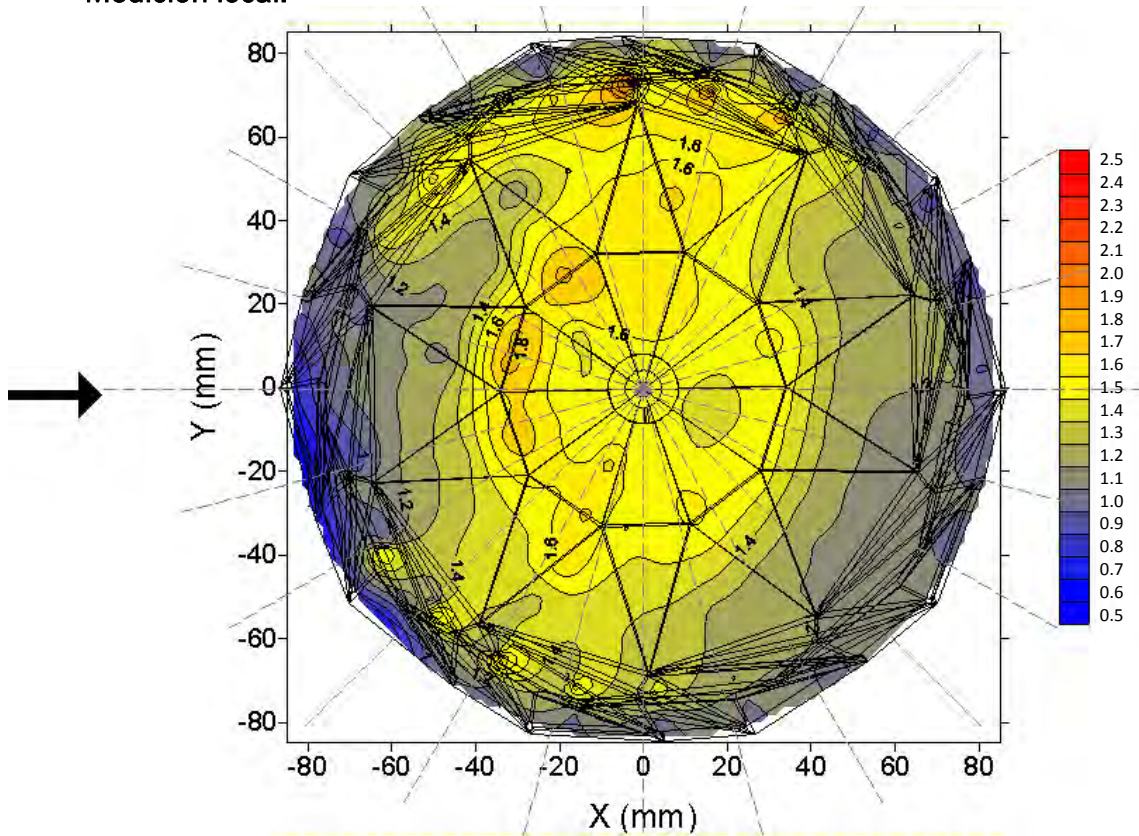
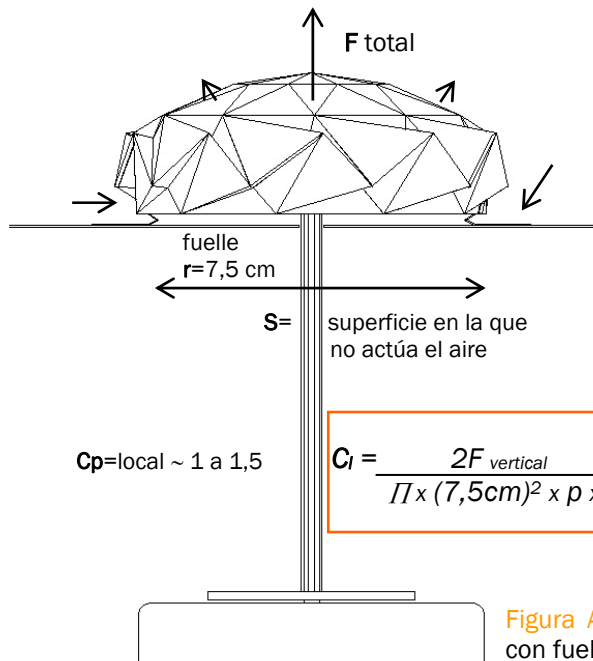


Figura A78. Coeficiente de sustentación - Vista en planta del modelo.

Valores de C_p locales entre 0.5 y 2.0

RESULTADOS PRELIMINARES



El valor global del coeficiente de sustentación - fuerza vertical (lift) obtenido de las mediciones experimentales fue de $C_l \sim 0.36$.

Las mediciones locales tomadas de pequeños agujeros del modelo alcanzan valores hasta de 1,5.

Considerando el tamaño del túnel de viento cuya sección es de 40cm x 40cm y el diámetro del modelo que es de 17cm, el error estadístico que se estima es del 15% aproximadamente.

Donde $F_{vertical}$ es la componente vertical actuando sobre el modelo, ρ es la densidad del aire y v es la velocidad del viento.

Figura A79. Esquema de medición del modelo con fuelle - Coeficiente de sustentación.

COEFICIENTE DE ARRASTRE

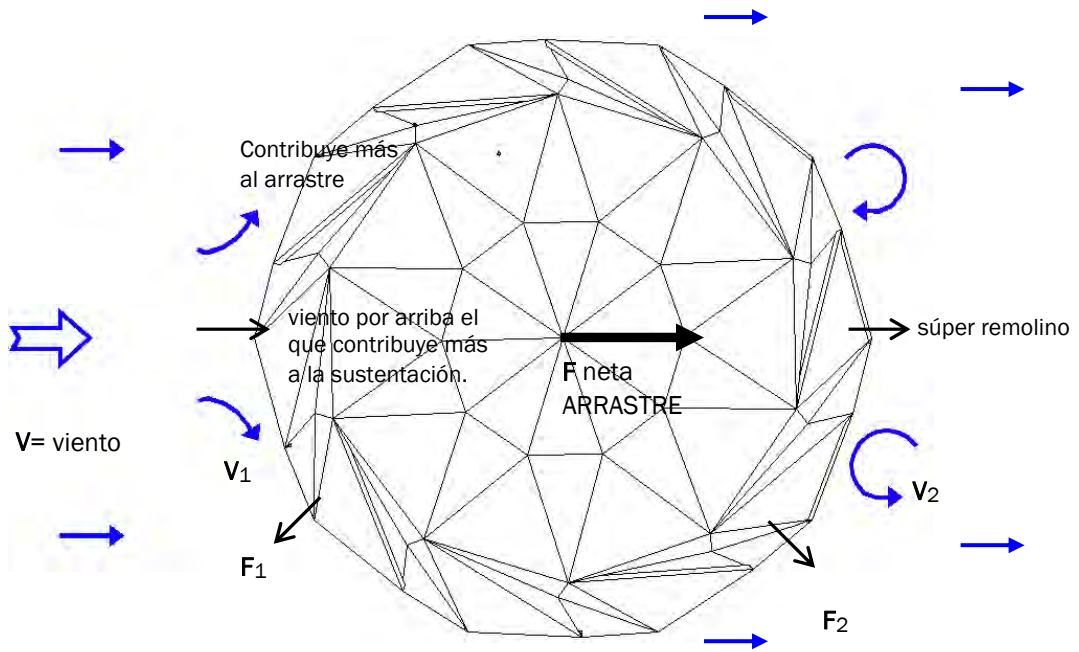
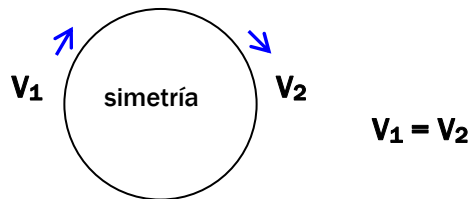


Figura A80. Esquema de fuerzas

Según este esquema podemos concluir lo siguiente:

$$V_1 < V \quad V_2 < V$$

Característica del flujo laminar



Si hay simetría en el objeto quiere decir que la V_1 y V_2 son iguales.

Característica del flujo turbulento $V_2 < V_1$

Por lo tanto:

CASO 1.
Coeficiente de arrastre global

$$Ca \text{ global} = \frac{F \text{ arrastre total}}{\text{Superficie frontal} \frac{1}{2} \delta \times V^2}$$

RESULTADOS PRELIMINARES

CASO 2.

Coeficiente de arrastre local = coeficiente de presión

$$C_p \text{ local} = \frac{\Delta p \text{ local}}{\frac{1}{2} \rho \times V^2}$$

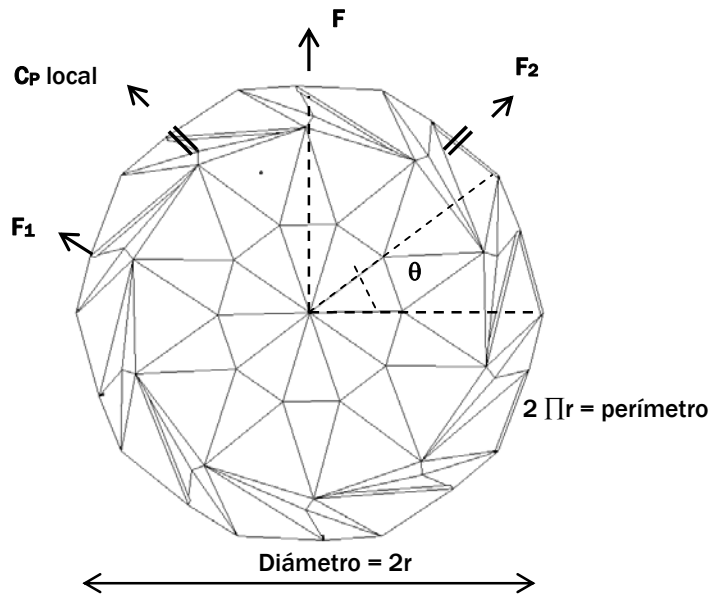


Figura A81. Esquema de fuerzas

Según esto esperamos que sumando las fuerzas locales por la superficie correspondiente nos de un valor similar al C_a global.

Las fuerzas perpendiculares no se tomarán para la medición.

$$F \text{ local} = C_p \times \cos \theta \quad F \text{ global} \simeq \int C_p \times \cos \theta \text{ integrando la superficie lateral}$$

$$C_a \text{ global} \simeq 0.301$$

Cálculo integrando los C_p locales

$$C_p \text{ local} \simeq 0.202$$

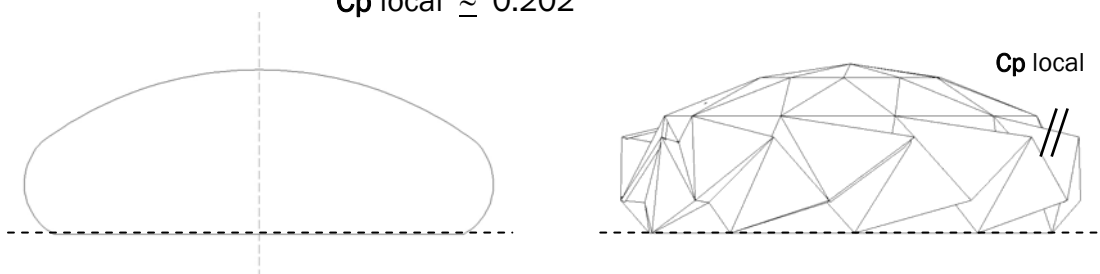


Figura A82. C_p locales

En el coeficiente de arrastre–fuerza horizontal (drag) el valor de succión o presión depende de la velocidad del viento y el ángulo de incidencia.

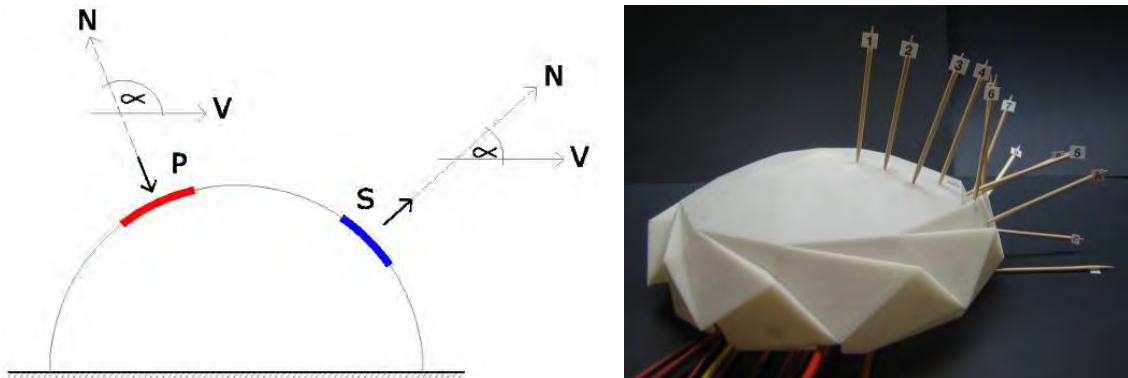


Figura A83. Ángulo entre la normal a la superficie y la dirección del viento.

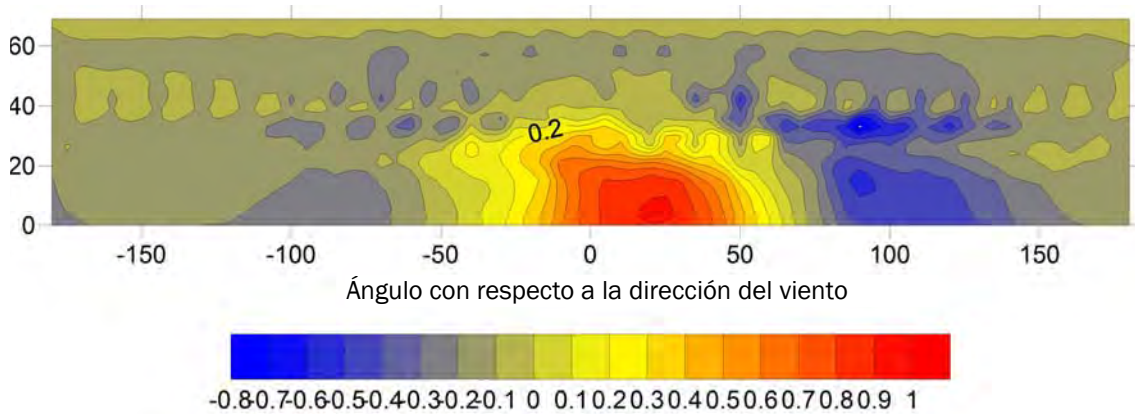


Figura A84. Coeficiente de presión sobre la pared lateral del edificio.

En la pared del modelo se determinaron algunos valores negativos del coeficiente de presión, esto quiere decir que el efecto del viento es de succión y valores positivos que son de presión. Los valores positivos con color rojo indican presión y son mayoritarios para ángulos alrededor de 0 a barlovento (donde incide el viento). Los valores en azul indican succión y son mayoritarios para ángulos menores que -90° y mayores que 90°, a sotavento (en el lado por donde se marcha el viento).

La maqueta tiene una estructura muy aerodinámica desvía el aire hacia al lado, esto es lo que explica porque algunos coeficientes locales son negativos. Las formas convexas expuestas a un flujo de viento entrante ofrecen paso fácil al viento.

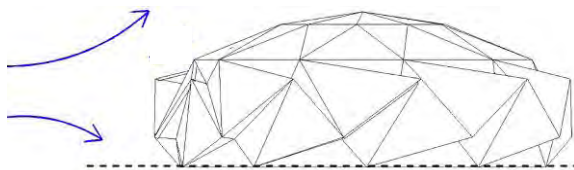


Figura A85. Esquema de paso del viento por el modelo.

Coefficiente de arraste: El coeficiente global de arraste obtenido experimentalmente fue de $C_d \approx 0.30$.

Donde S_e es la superficie de elevación (en el modelo $0,008718 \text{ m}^2$)

$$C_d = \frac{2F_{drag}}{\pi \cdot S_e \cdot \rho \cdot v^2}$$

RESULTADOS FINALES

Para el análisis del coeficiente de arrastre-fuerza horizontal (drag), igual que en el análisis del coeficiente de sustentación-fuerza vertical (lift) se tuvo en cuenta la lectura de presión referida a la presión estática dentro del túnel, que es lo que podemos comparar con datos de **C_p** de otras investigaciones y libros (*Ejemplo: Arquitectura Textil - Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas, Eurocódigo y Construcciones Neumáticas de Hertzog. [27][29][30]*) Los cuales nos sirven de referencia para ver si nuestros resultados se ajustan a la realidad.

Se promediaron los coeficientes locales del techo y paredes del modelo en 24 sectores: (Fig.A86)

Las flechas fuera del edificio indican la dirección de la presión en las paredes laterales. Los coeficientes positivos indican compresión (flecha entrante) y los coeficientes negativos indican succión (flecha saliente).

El coeficiente de arrastre calculado sumando todas las presiones es de 0.36 y el medido con la balanza de 0.3, por lo que el error del 18% entre ellos es razonable teniendo en cuenta los errores experimentales. Como conclusión podemos considerar que el coeficiente de arrastre experimental es de **0.30±0.1**.

Valores negativos = Succiones

Valores positivos = Presiones

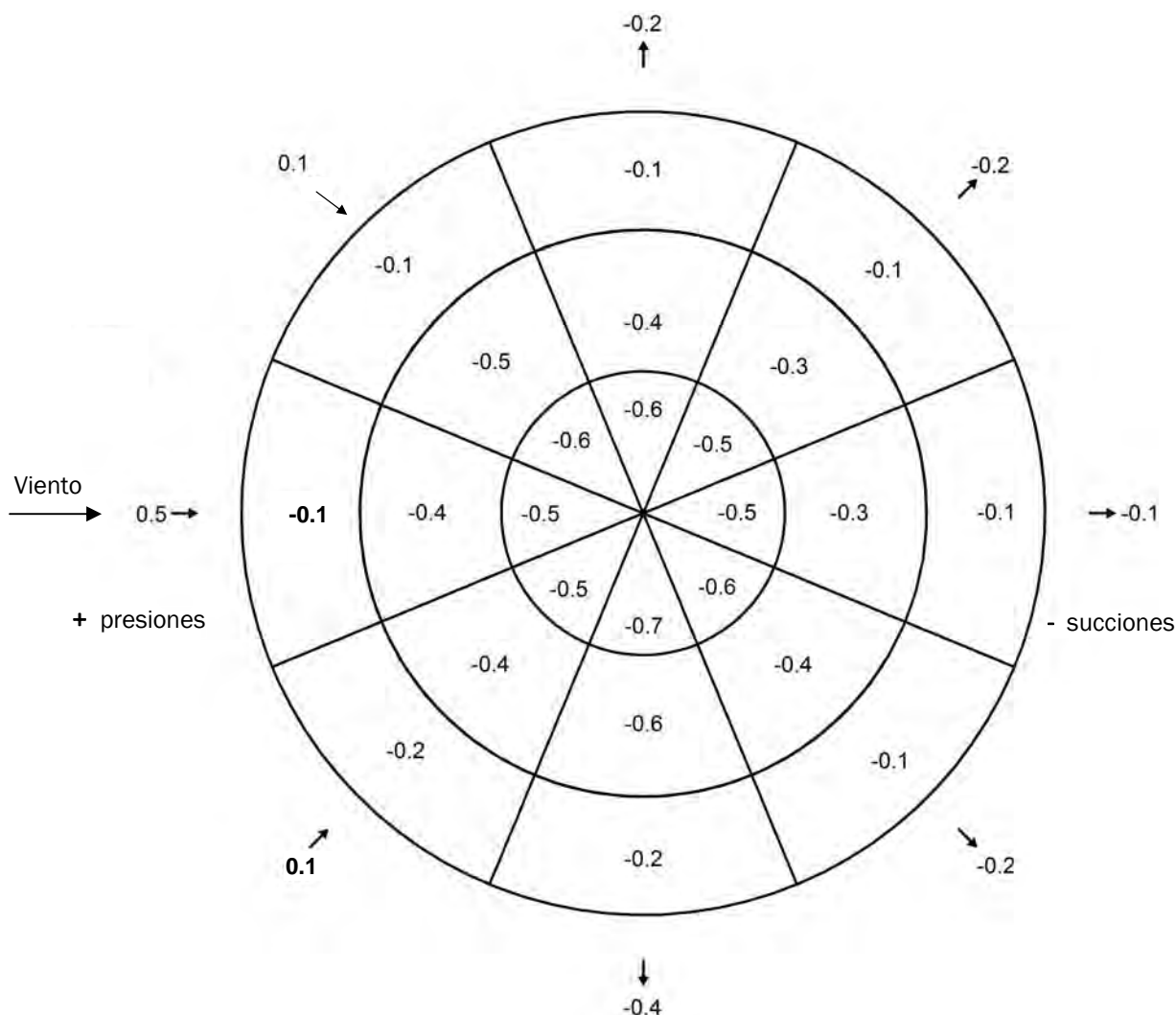


Figura A86. Esquema del modelo dividido en 24 sectores con sus respectivos coeficientes. Valores negativos (succiones) – valores positivos (presiones)

Después de obtener los coeficientes de arrastre-fuerza horizontal (drag) que corresponde al viento, nuestra principal fuerza de estudio. Estos serán aplicados en el software de cálculo (WinTess) de la estructura.

$$Cp \text{ local } 0.22 :: Ca \text{ global } 0.30$$

COMPARACIÓN DE NUESTRO MODELO

- Podemos afirmar que una forma cuadrada (C_p 1.05) y rectangular (C_p 0.82) causa mayores valores **Cp** en comparación con formas circulares (C_p 0.47/0.42) Fig.A87. En nuestro caso de estudio, nuestro modelo cumple esta condición (C_p 0.30), tiene una forma similar a un ovni que es una forma geométrica aerodinámica.
- Ejemplo de túnel de viento de un estadio del despacho de Schlaich Bergemann and Partners, se han obtenido cifras C_p netas (Fig.A88).
- Coeficientes de presión en comparación con el eurocódigo (Fig.A89,A90,A91).

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

Figura A87. Ejemplos de C_p de arrastre de diferentes figuras geométricas.

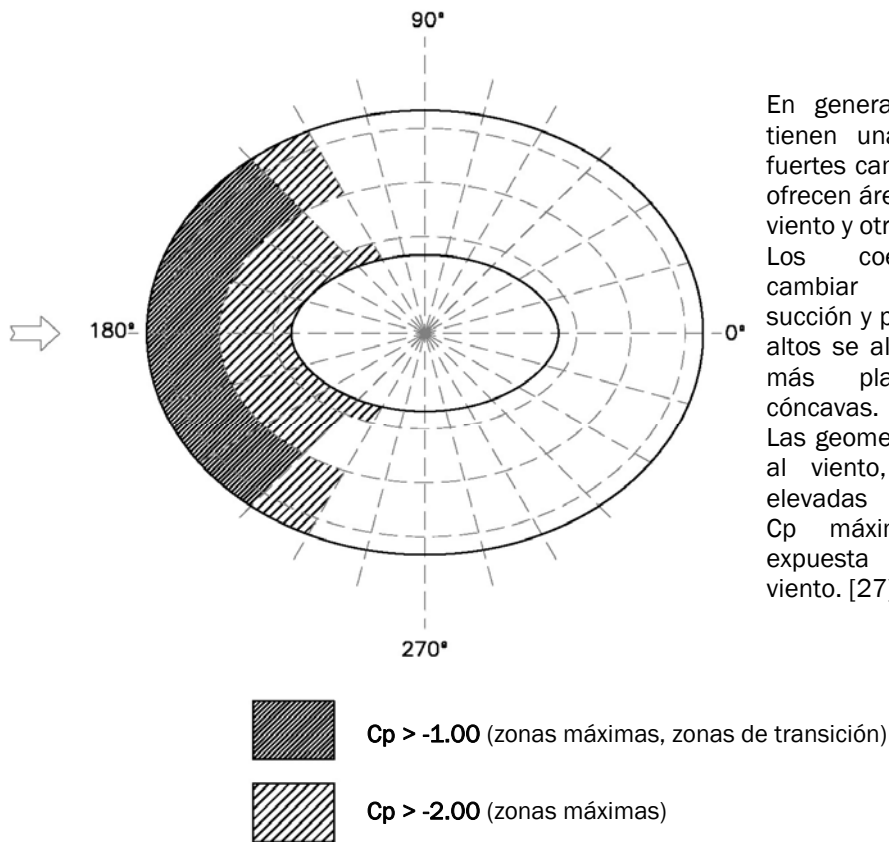
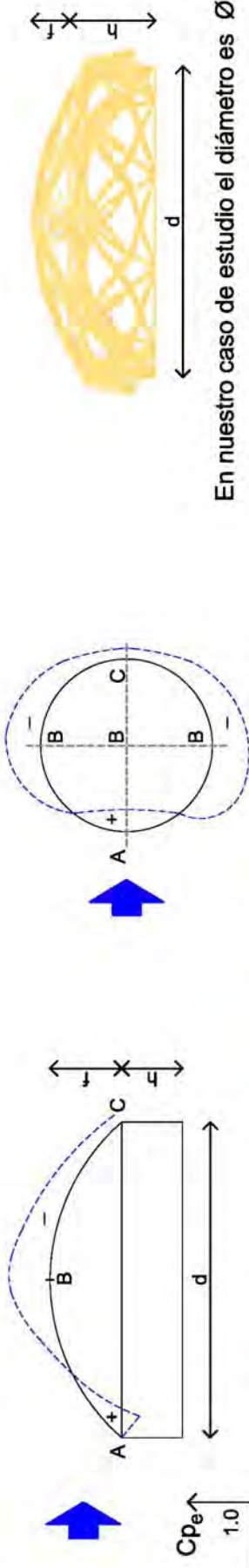


Figura A88. Ejemplo de C_p de arrastre en un estadio de Schlaich.

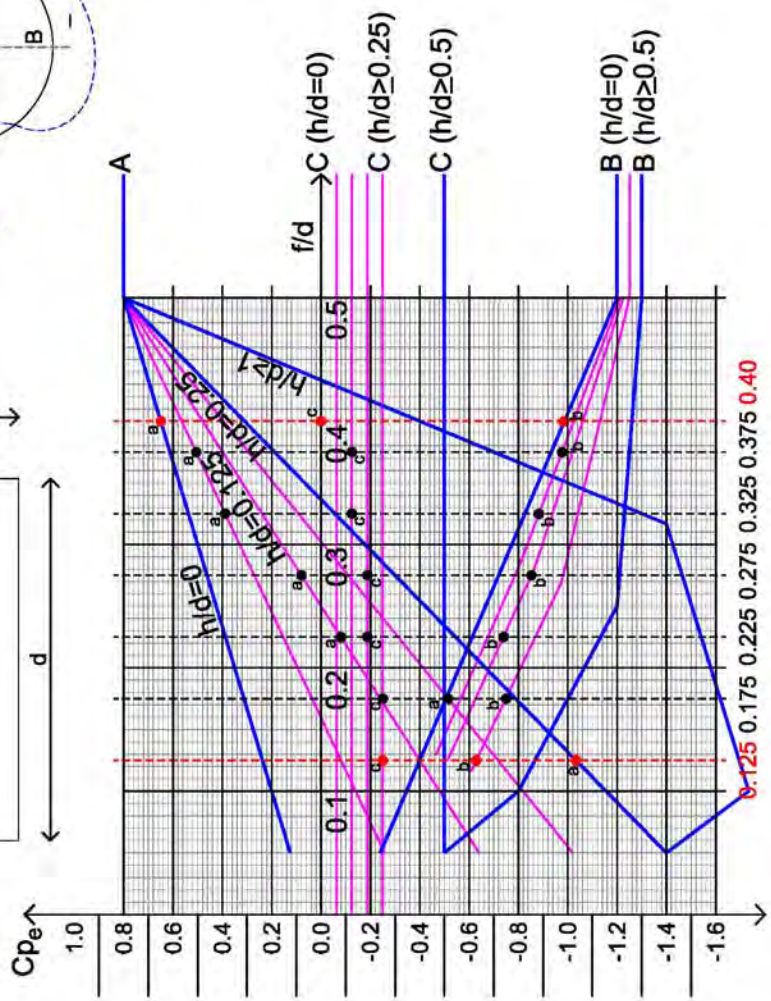
En general, los estadios que tienen una forma global con fuertes cambios en la curvatura ofrecen áreas fáciles al paso del viento y otras más difíciles. Los coeficientes pueden cambiar rápidamente entre succión y presión, los picos más altos se alcanzan en las zonas más planas, abiertas y cóncavas. Las geometrías más resistentes al viento, como las formas elevadas convexas, producen C_p máximos en la zona expuesta directamente al viento. [27]



En nuestro caso de estudio el diámetro es $\varnothing = 40$

f	h	f/d	h/d	a	b	c
5	11*	0.125	0.275	-1.02	-0.63	-0.25
6	10	0.15	0.25	-0.77	-0.69	-0.25
7	9	0.175	0.225	-0.52	-0.75	-0.25
8	8	0.20	0.20	-0.30	-0.74	-0.25
9	7	0.225	0.175	-0.09	-0.74	-0.19
10	6	0.25	0.15	-0.01	-0.79	-0.19
11	5	0.275	0.125	0.08	-0.85	-0.19
12	4	0.30	0.10	0.38	-0.86	-0.19
13	3	0.325	0.075	0.38	-0.88	-0.12
14	2	0.35	0.05	0.44	-0.93	-0.12
15	1	0.375	0.025	0.51	-0.98	-0.12
16	0*	0.40	0.00	0.65	-0.99	0.0

* En la tabla podemos observar si $h=0$ nuestro coeficiente de presión es 0.4 y en los puntos a,b,y c respectivamente los valores corresponden a presión en el punto a y succión en b y c, siendo la mayor succión en la zona b.
 * Si tenemos $h=11$ el coeficiente de presión es 0.125 y en los puntos a,b y c tenemos succión, siendo la mayor succión en el punto a.



ESQUEMA SEGÚN EUROCÓDIGO DE VIENTO

COEFICIENTES DE PRESIÓN SEGÚN EUROCÓDIGO

Figura A89. Coeficientes de presión según el Eurocódigo. [29]

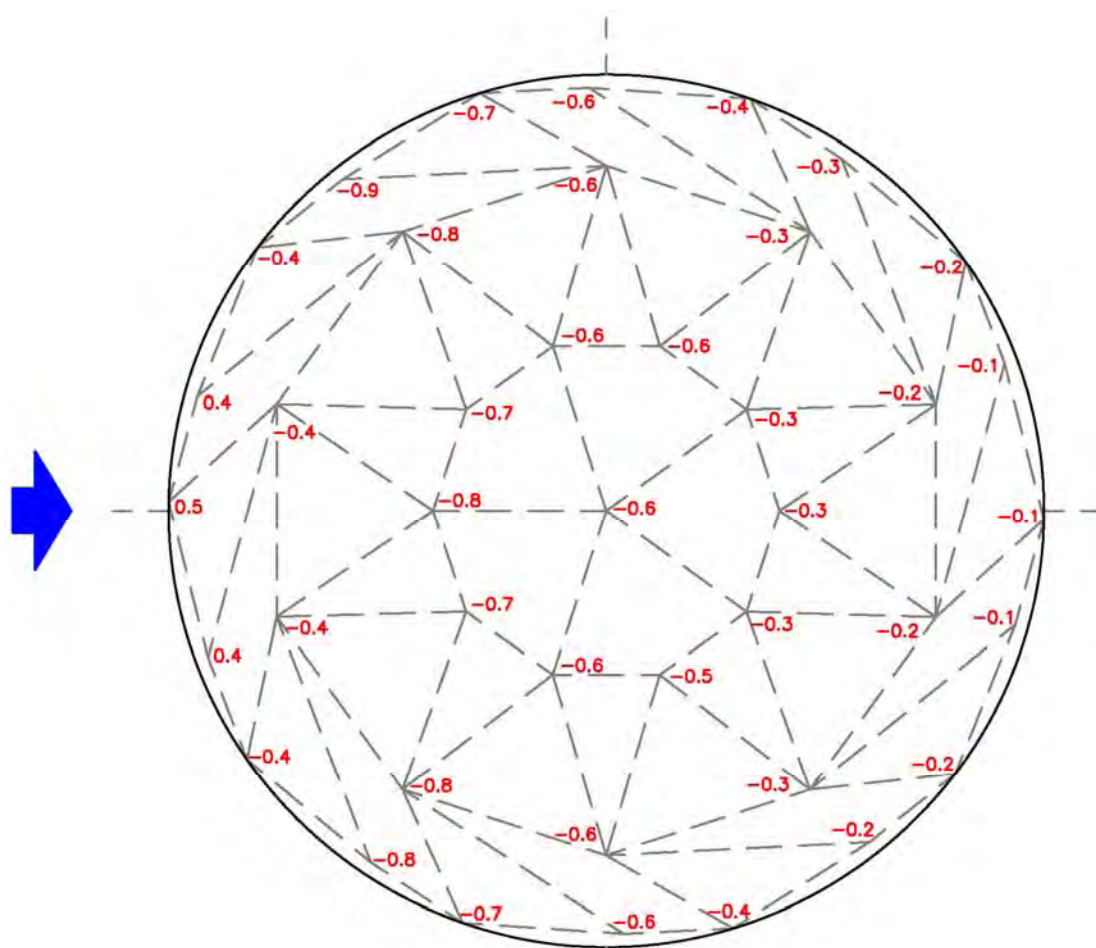


Figura A90.
Coeficientes según Eurocódigo.

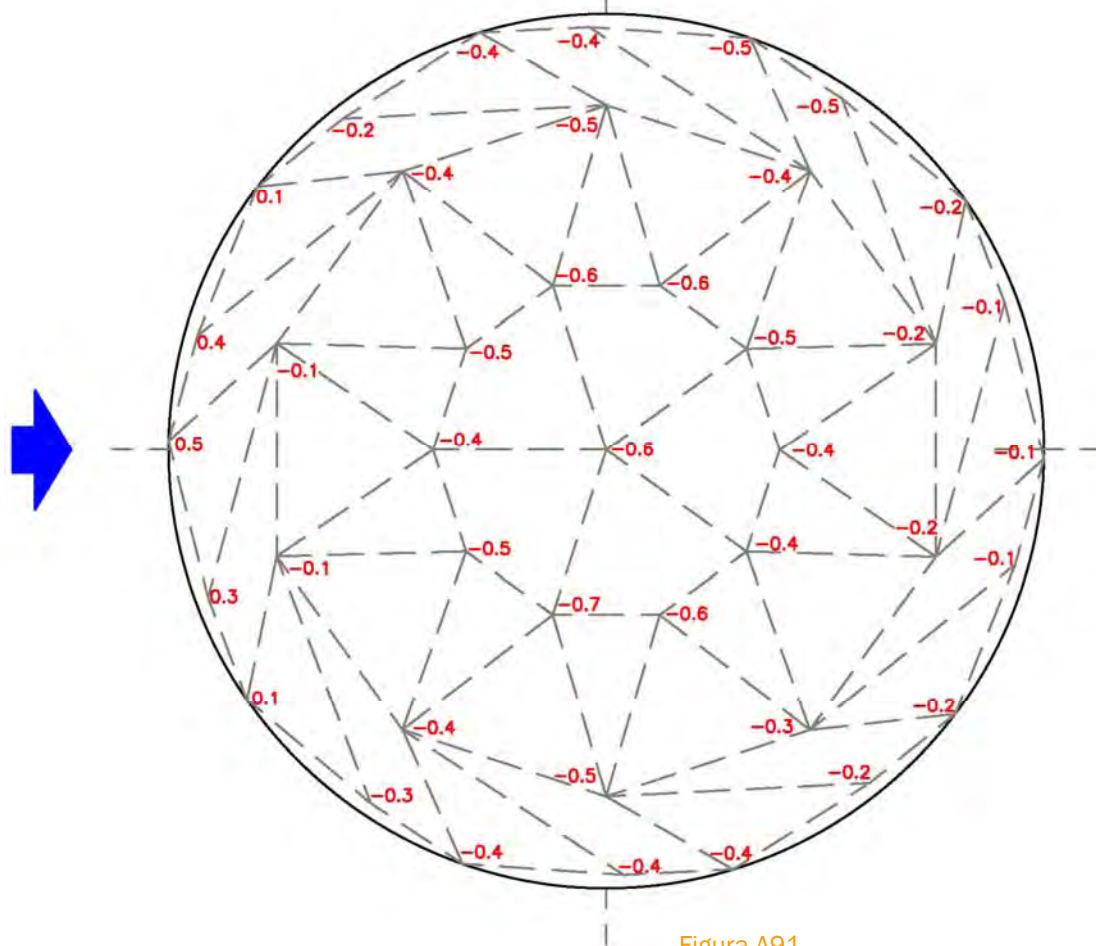


Figura A91.
Coeficientes de presión según túnel de viento.

VENTILADOR MECÁNICO APÉNDICE D.

Para continuar con nuestras pruebas físicas se realizó un **análisis cualitativo** del modelo propuesto, por medio del uso de un ventilador mecánico.

DESCRIPCIÓN

Para la prueba experimental utilizamos el modelo de la tipología No. 4 “Patrón en diamante con membrana y veinte barras en doble capa” con un diámetro de 100cm. Cuyas barras en el anillo tienen una longitud de 50cm y un diámetro de 6mm. El mástil central $L=22,5\text{cm}$ $\varnothing 4\text{mm}$ y los mástiles menores $L=16,25\text{cm}$ $\varnothing 4\text{mm}$. El peso total de la estructura incluida la membrana es de 490gr.

El ventilador mecánico tiene un diámetro de 80cm. El ejercicio consistió en utilizar el ventilador para simular una velocidad de viento de 70km/h y observar el comportamiento físico del modelo ante el viento.



Figura A92.
Velocidad de viento 71km/h.

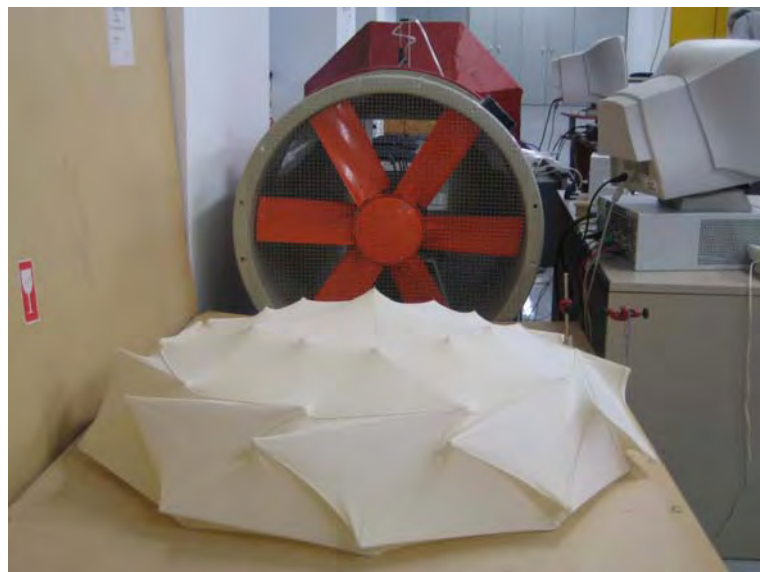


Figura A93. Ventilador mecánico $\varnothing 80\text{cm}$ - Modelo $\varnothing 100\text{cm}$.

ANÁLISIS CUALITATIVO



Figura A94. Efectos del viento en el modelo físico de \varnothing 100cm ante una velocidad de 70km/h.

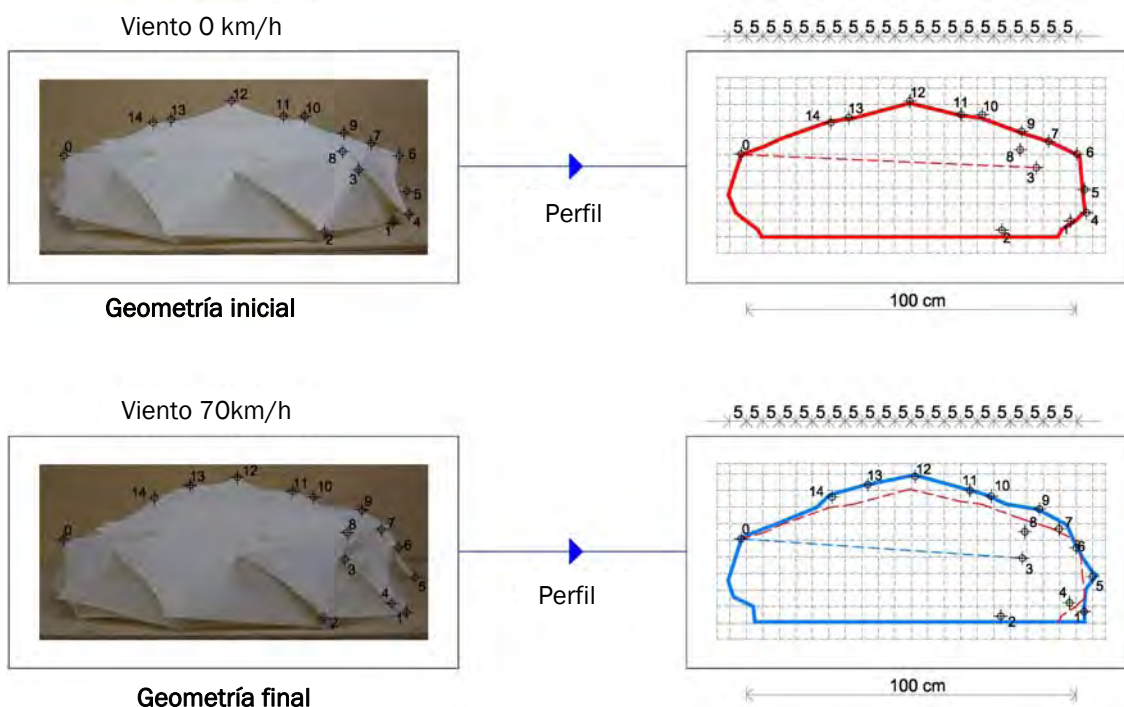


Figura A95. Esquema del comportamiento del modelo físico ante una fuerza horizontal de viento. Rojo forma inicial – Azul forma final.

En las figuras A94 y A95 podemos ver el comportamiento del modelo físico de 100cm de diámetro ante una fuerza horizontal de viento de 70km/h, simulada por el ventilador mecánico de 80cm de diámetro. En el esquema al comparar la forma inicial, representada en rojo y la forma final representada en azul, podemos ver los diferentes desplazamientos de los puntos.

No. Nudo	Localización del nudo	Desplazamiento horizontal mm.	Desplazamiento vertical mm.	Coefficiente de presión
0	Anillo tensegrity	-0.51	+3.28	succión
1	Anillo tensegrity	0	0	-
2	Anillo tensegrity	-3.00	0	presión
3	Anillo tensegrity	-42.2	-13.8	presión
4	Anillo tensegrity	-50.9	-12.6	presión
5	Anillo tensegrity	+24.4	-3.50	*succión
6	Anillo tensegrity	-2.49	-23.2	presión
7	Anillo tensegrity	+31.4	-3.69	*succión
8	Anillo tensegrity	+13.9	+12.0	*succión
9	Domo superior	+53.7	+25.3	succión
10	Domo superior	+13.2	+26.5	succión
11	Domo superior	+26.5	+30.9	succión
12	Domo superior	+32.6	+15.6	succión
13	Domo superior	+57.3	+57.5	succión
14	Domo superior	+34.0	+0.37	succión

Tabla A1. Análisis cualitativo del modelo físico ante una fuerza horizontal de viento 70 km/h.

En la tabla A1 hemos analizado el comportamiento de los nudos en el modelo físico, los desplazamientos, presiones y succiones. El signo positivo representa los movimientos en milímetros hacia arriba y hacia la derecha. El signo negativo representa los movimientos en milímetros hacia abajo y hacia la izquierda.

Es importante anotar que este modelo fue construido únicamente con membrana, la cual estabiliza las barras por medio de su tensión, (el modelo no tiene cables tensores).

También debemos recordar que en esta tesis sólo estamos haciendo el análisis estático, el análisis dinámico se plantea para investigación futura.

En el análisis de la tabla A1 podemos concluir lo siguiente:

- Si comparamos los resultados de la tabla A1 con los coeficientes de presión arrojados por el túnel de viento (Fig.A86) se observa que tienen un comportamiento similar. En general se producen presiones a barlovento y succiones a sotavento.
- Los valores de la tabla en 0 corresponden a un nudo fijo.
- En el domo superior se presentan succiones debido a la presión del viento a barlovento en el anillo tensegrity.
- En los nudos 5-7-8 del anillo tensegrity se observa succión, este comportamiento particular es debido a movimientos de vibración, la causa es que el modelo como anotamos anteriormente está construido solamente con membrana, no tiene cables tensores que ayudarían a evitar los desplazamientos y estabilizarían aún más el sistema.
- El mayor desplazamiento se observa en el nudo 13 el cual es de 57mm. El viento produce succión a sotavento, la zona opuesta a la dirección del viento, esta es la razón del desplazamiento.

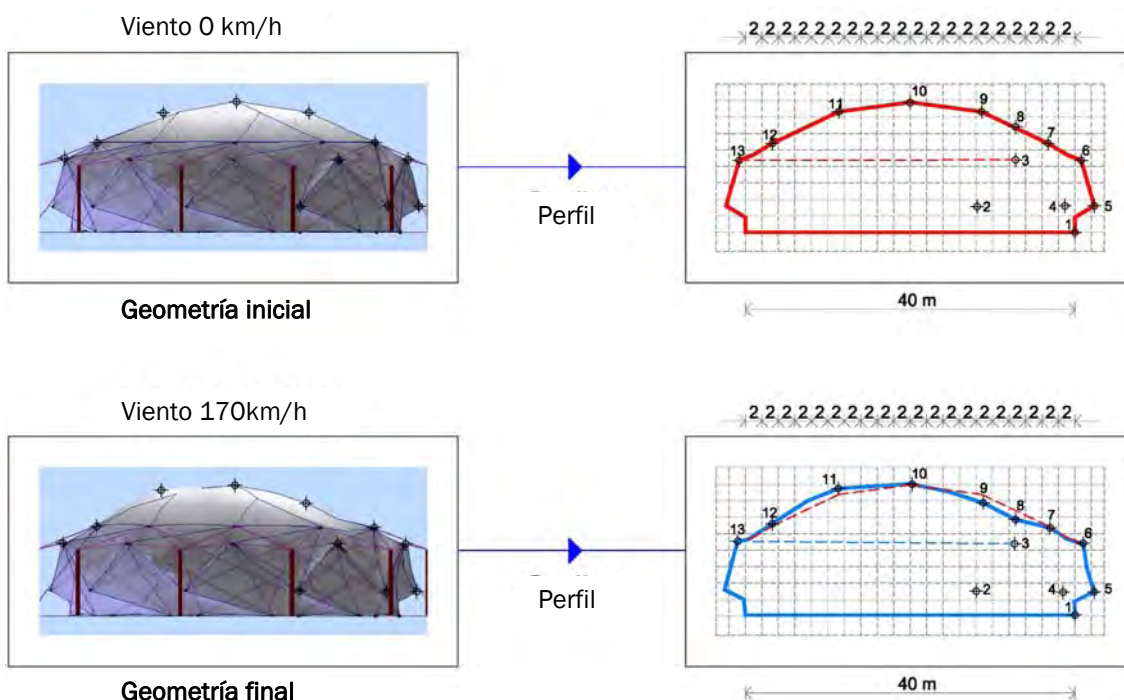


Figura A96. Esquema del comportamiento del modelo informático ante una fuerza horizontal de viento. Rojo forma inicial – Azul forma final.

En la figura A96 podemos ver el comportamiento del modelo informático de 40m de diámetro ante una fuerza horizontal de viento de 170km/h, simulada por el software WinTess. En el esquema al comparar la forma inicial, representada en rojo y la forma final representada en azul, podemos ver los diferentes desplazamientos de los puntos.

No. Nudo	Localización del nudo	Desplazamiento horizontal cm.	Desplazamiento vertical cm.	Coefficiente de presión
1	Anillo tensegrity	0	0	-
2	Anillo tensegrity	-1.02	-1.00	presión
3	Anillo tensegrity	-1.23	-0.32	presión
4	Anillo tensegrity	-2.30	-3.00	presión
5	Anillo tensegrity	-0.30	-2.68	presión
6	Anillo tensegrity	+2.45	+0.93	succión
7	Anillo tensegrity	+2.62	-0.87	*succión
8	Domo superior	0	-11.0	*presión
9	Domo superior	+1.87	-8.96	*presión
10	Domo superior	+2.26	+2.48	succión
11	Domo superior	-0.58	+8.32	succión
12	Anillo tensegrity	-0.24	+4.12	succión
13	Anillo tensegrity	-1.95	+3.42	succión

Tabla A2. Análisis del modelo informático ante una fuerza horizontal de 170km/h.

En la tabla A2 hemos analizado el comportamiento de los nudos en el modelo informático, los desplazamientos, presiones y succiones. Como en el caso anterior, el signo positivo representa los movimientos en milímetros hacia arriba y hacia la derecha. El signo negativo representa los movimientos en milímetros hacia abajo y hacia la izquierda.

En este caso el modelo fue construido además de la membrana con cables tensores que ayudan a prevenir los movimientos en el sistema, le dan mayor rigidez al comportamiento de la estructura y por tanto se presentan menores desplazamientos.

En el análisis de la tabla A2 podemos concluir lo siguiente:

- Si comparamos los resultados de la tabla A2 con los coeficientes de presión arrojados por el túnel de viento (Fig.A86) se observa que tienen un comportamiento similar. En general se producen presiones a barlovento y succiones a sotavento, como se analizó en el caso anterior.
- Los valores de la tabla en 0 corresponden a un nudo fijo.
- En el domo superior se presentan succiones debido a la presión del viento a barlovento en el anillo tensegrity.
- En el nudo 7 del anillo tensegrity se observa el mayor desplazamiento horizontal +2.62cm succión, este comportamiento particular es debido al empuje que ocasionan los puntos No.8-9 que corresponden a los mástiles menores, por el viento y su peso bajan un poco (presión).
- El mayor desplazamiento vertical se observa en el nudo 8 el cual es de -11.0 cm. presión en el domo. Como explicamos anteriormente, corresponde a un mástil menor, que por la acción del viento y su propio peso baja un poco.
- Los valores muestran que en el modelo informático hay menores desplazamientos que en el modelo físico, por los cables tensores que optimizan la estructura.

Al comparar los resultados de las tablas A1 y A2 con los coeficientes de presión arrojados por el túnel de viento y si comparamos también el modelo informático con el modelo físico, se observa en general que tienen un comportamiento similar. Lo que valida los métodos de análisis, teniendo en cuenta las respectivas escalas de los modelos.

Después de las pruebas de túnel de viento (coeficientes de presión) y el análisis cualitativo, se observa que hay sobrecarga de fuerzas en el modelo, por lo cual es necesario optimizar los elementos estructurales mediante el software WinTess (Ver Cap.3), para construir un modelo estructuralmente eficiente en el mundo real.

ANOTACIONES FINALES DEL TÚNEL DE VIENTO Y DEL VENTILADOR MECÁNICO.

1. Con la prueba del túnel de viento podemos concluir lo siguiente:
 - Después de hacer las comprobaciones pertinentes con el túnel de viento hallamos los valores de coeficientes de presión y succión. Los cuales fueron determinados experimentalmente, se tomaron en cuenta los márgenes de error. Los valores arrojados son los siguientes:
 - Coeficiente de **sustentación** (lift) fuerza vertical.

Coeficiente de presión local :: Coeficiente de sustentación global
C_p local -0.20 :: **C_s** global -0.36

- Coeficiente de **arrastre** (drag) fuerza horizontal.

Coeficiente de presión local :: Coeficiente de arrastre global
C_p local 0.20 :: **C_a** global 0.30

- Los valores hallados son coeficientes que al compararlos con otras investigaciones y el Eurocódigo se ajustan a la realidad.
 - Después de hallar los valores de coeficientes de presión estos fueron aplicados al programa de cálculo WinTess y se comprobó que el comportamiento de la estructura ante una fuerza horizontal de viento 170km/h muestra desplazamientos horizontales que no afectan el equilibrio del sistema. La estructura por su diseño y rigidez soporta la carga de viento.
 - El mayor desplazamiento horizontal fue de 269mm. (Ver Cap.3 - Tabla 9)
 - La estructura también fue probada ante una carga vertical de nieve 50kg/m, mostró desplazamientos verticales que no colapsan el sistema, la estructura mantiene su rigidez pero en general no se recomienda para zonas de alta nieve.
 - El mayor desplazamiento vertical fue de 600mm. (Ver Cap.3 - Tabla 10)
2. También se demostró con la prueba del ventilador mecánico y el análisis cualitativo:
 - Que los resultados hallados al compararlos con los coeficientes de presión del túnel de viento tienen un comportamiento similar. En general se producen presiones a barlovento y succiones a sotavento.
 - También se demostró que el uso de la membrana y cables tensores al mismo tiempo, genera mayor rigidez de la estructura, presentando menores desplazamientos.





APLICACION DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATIRATADAS



