





RESEARCH ARTICLE

Comportamiento estructural de cubiertas tipo tenso membranas empleando el método de elementos finitos

Katherine J. Chacón Zagal ¹  Dennis B. Villavicencio Bustamante ¹  David P. Guerrero Cuasapaz ¹  

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Departamento de Ingeniería Civil – Quito, Ecuador.

 Correspondencia: dguerrero@ups.edu.ec  + 593 99 576 1929

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj62061>

Resumen: La ingeniería estructural a través del tiempo se ha dedicado a la búsqueda de sistemas y materiales cada vez más ligeros, encontrando así las llamadas tensas membranas o estructuras ligeras basadas en estructuras que combinan membranas y cables de acero convirtiéndose en la solución óptima para cubrir espacios que la actividad humana requiere a diario. En el presente artículo se analizó el comportamiento de tres diferentes formas de tenso membranas con una misma luz de 17 m, aplicando el método de elementos finitos MEF con la ayuda de paquetes computacionales como SAP2000 y ANSYS Workbench, iniciando con un prediseño de elementos tomando como referencia las solicitaciones de carga de la normativa NEC-2015 y ASCE 7-16, dando como resultado concentraciones de esfuerzos en las regiones de apoyos principales en los modelos tipo arco, deformaciones y variaciones de resistencia con valores críticos en la membrana de forma tipo paraboloide hiperbólico en la región central con un valor de 216 MPa debido al diseño de las estructuras soportes tipo cable de la membrana, evidenciándose la deficiencia en la transferencia de esfuerzos en los apoyos existentes.

Palabras claves: ANSYS, deformaciones, discretización esfuerzos, MEF, tenso membranas.

Structural behavior of tensile membrane roofs using the finite element method

Abstract: Structural engineering over time has been dedicated to the search for increasingly lighter systems and materials, thus finding the so-called tensile membranes or lightweight structures based on structures that combine membranes and steel cables becoming the optimal solution to cover spaces that human activity requires on a daily basis. In this article is analyzed the behavior of three different forms of tensile membranes with the same span of 17 m, applying the FEM finite element method with the help of computational packages such as SAP2000 and ANSYS Workbench, starting with a pre-design of elements taking as a reference the



Citation: Chacón Zagal, K. J., Villavicencio Bustamante, D. B., & Guerrero Cuasapaz, D. P. (2023). Comportamiento estructural de cubiertas tipo tenso membranas empleando el método de elementos finitos. *Green World Journal*, 6(2), 61.
<https://doi.org/10.53313/gwj62061>

Received: 01/Mar/2023

Accepted: 03/May/2023

Published: 18/May/2023

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2023 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license.

Creative Commons Attribution (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

load stresses of the NEC–2015 and ASCE 7–16 standards, resulting in stress concentrations in the main support regions in the arch type models, deformations and resistance variations with critical values in the hyperbolic paraboloid type membrane in the central region with a value of 216 MPa due to the design of the cable-type support structures of the membrane, evidencing the deficiency in the transfer of stresses in the existing supports.

Keywords: ANSYS, deformations, stress discretization, FEM, tensile membranes.

1. Introducción

La implementación de estructuras tensadas en los últimos años ha abierto un nuevo camino en el diseño arquitectónico y estructural, presentando una amplia diversidad a las cubiertas tradicionales [1]. Destacando en este avance las tenso membranas consideradas estructuras textiles ligeras, flexibles e impactantes no solo visualmente sino amables con el medio ambiente [2], además de útiles en cubiertas por ser un sistema que obedece a las funciones de este elemento estructural [3], entre sus características principales está la de proporcionar resistencia y rigidez a la estructura orientado a lo que se busca en la actualidad, adaptabilidad y menor inversión económica [4], pues este tipo de estructuras requiere de poco material y menos tiempo de construcción en relación a los diseños estándares, garantizando la perdurabilidad en el tiempo. Entre los textiles comúnmente utilizados están los materiales plásticos como el PVC, fibra de vidrio con teflón, poliéster y en algunos casos fibra de carbono [5], responsables de brindar la fuerza a la estructura tensada capaz de resistir los actos extrínsecos no estructurales a la que la cubierta pueda estar sujeta principalmente a los cambios climáticos.

En el caso de las cubiertas de tenso membranas de acuerdo con el uso estructural que se le va a dar se aprecian las condiciones climáticas y las necesidades específicas del proyecto donde se busca que cumplan con una serie de propiedades idóneas para el óptimo funcionamiento de las mismas [6]. Las cuales dependen del diseño estructural, ya que deben vislumbrar la resistencia a los esfuerzos estructurales y la flexibilidad para adaptarse a la forma deseada [7], siendo las primordiales particularidades la fuerza a la tracción y la elasticidad [8], que en cuanto a las combinaciones de materiales se puede aumentar la resistencia o condiciones diversas a las que estén impuestos [9].

En el diseño de una cubierta tensada existe una diferencia notable entre una cubierta metálica por los requerimientos de diferentes métodos de análisis para lograr su funcionamiento [10], que parten de la combinación de formas geométricas generadas, las cuales se ajustan a las necesidades de cada espacio, encontrándose entre las formas básicas el paraboloides, hiperbólica, arco o conoide [11], como se muestra en las figuras 1, 2, 3.

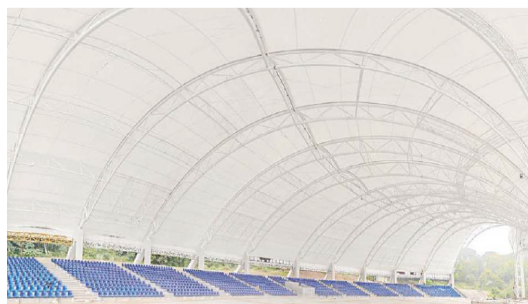


Figura 1. Cubierta tensada semiarco [12].



Figura 2. Cubierta tensada paraboloid hiperbólica [12].



Figura 3. Cubierta tensada forma de arco [12].

Estas formas particulares consideradas para el diseño estructural son estudiadas para conocer el comportamiento de la estructura, para lo cual se aplica el método de elementos finitos (MEF o FEA, siglas en inglés de Finite Element Analysis) [13] que es una técnica numérica implementada para solucionar problemas de ingeniería, mediante la resolución con métodos numéricos que permite la discretización de ecuaciones diferenciales para caracterizar fenómenos físicos del mundo real [13].

El método de elementos finitos en la modalidad computarizada posibilita predecir cómo reaccionará un elemento ante los diversos factores como fuerzas, vibración, calor, flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real [14]. En otras palabras, muestra si este elemento se romperá, desgastará o funcionará como se espera [15].

Con el aporte de paquetes computacionales los problemas de análisis estructural se pueden resolver mediante el método de elementos finitos (MEF) para obtener simulaciones en software como el SAP2000 y ANSYS Workbench que permiten analizar tensiones y deformaciones cuando se las somete a cargas [3], además de predecir posibles problemas con el diseño [11].

Debido a la escasa investigación respecto a las tenso membranas en el Ecuador surge el interés de conocer que forma tiene un óptimo comportamiento al estar sometido al mismo estado de carga, por esta razón se realizó una comparación para luces de 17 m con la finalidad de encontrar los parámetros que permitan mayor resistencia y menor deformación para cada una de las formas

Lograr un diseño apropiado es el objetivo principal de una simulación en elementos finitos, porque permite analizar las deformaciones y esfuerzos cuando un elemento está sometido a cargas. Los desplazamientos y deformaciones generalmente están relacionados con la funcionalidad de la estructura, mientras que el esfuerzo con la seguridad y confiabilidad [16].

Esta investigación permitió recopilar la información referente al comportamiento estructural de diferentes formas de cubiertas tipo tenso membranas, empleando el método de elementos finitos mediante herramientas como el SAP2000 y el Ansys Workbench, que permite visualizar de forma

simulada los esfuerzos y deformaciones que se presentan en dichas estructuras al estar sometidas a las mismas condiciones de carga.

2. Materiales y métodos

Para el análisis planteado fue preciso establecer dimensiones de un proyecto real, para este caso se presentaron 3 modelaciones de tenso membrana basándose en las diferentes formas existentes conformadas con una misma luz de 17 metros. Para los modelos de tenso membranas, se consideró que el diseño estructural cuente con apoyos en elementos rígidos como columnas, arcos o pórticos [17]. En el caso del modelo 1 este se apoya en 5 pórticos semiarcos con vigas de forma lineales donde reposa la membrana como se muestra en le figura 4, por otra parte, en la figura 5 el modelo 2 posee 4 columnas de apoyo en forma puntuales situados en bordes exteriores con un sistema de cables y tirantes. En el modelo 3 con un arcos y vigas tipo U como apoyos de forma lineales con sistemas de tensado como se presenta en la figura 6.

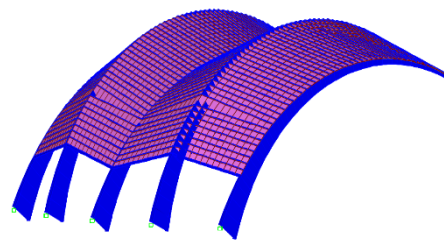


Figura 4. Tenso Estructura modelada en 3D (Modelo 1).

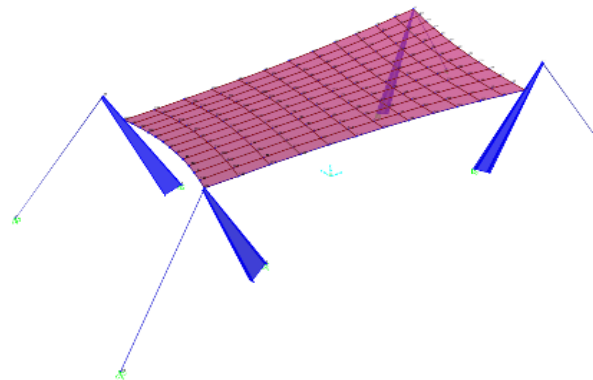


Figura 5. Tenso Estructura modelada en 3D (Modelo 2).

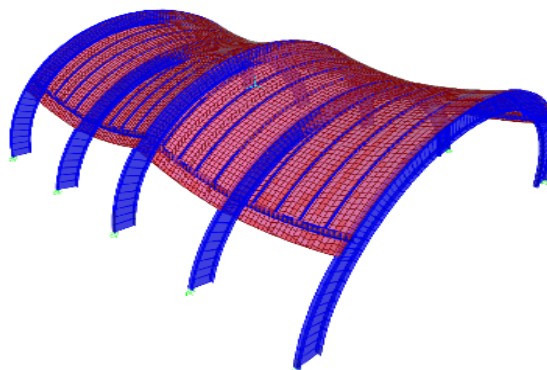


Figura 6. Tenso Estructura modelada en 3D (Modelo 3).

Para las cubiertas se consideró una membrana Fluomax constituida por tejido de poliéster recubierto de PVDF como se muestra en la figura 7 [12].

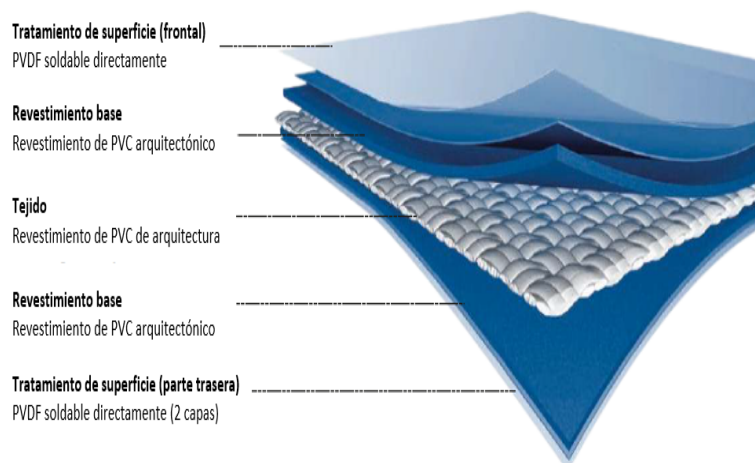


Figura 7. Vista de la Membrana. [12]

Las propiedades de la membrana PVDF contempladas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1:Ficha técnica membrana [12].

Descripción	Unidad	Tipo de membrana
Espesor	mm	0,55
Peso	g/m ²	650
Ancho estándar	cm	300
Resistencia a la tracción	MPa	330
Resistencia a la flexión	MPa	600
Módulo de elasticidad	MPa	21.500

Esta estructura está soportada con secciones conformadas en acero encontradas en el mercado cuyas propiedades se muestran en la tabla 2 y 3. Dichas secciones fueron modeladas como estructura metálica con la ayuda de paquete computacional CAD, iniciando con un prediseño para obtener el modelo final de la fase de simulación vía MEF tanto para el SAP2000 como para el Ansys Workbench.

Tabla 2:Ficha técnica acero [18].

Descripción	Unidad	Laminados en caliente
Densidad	kg/m ³	7.850
Módulo de Young	MPa	200.000
Coefficiente de Poisson	-	0,3
Esfuerzo de fluencia	MPa	250
Resistencia a la tracción	MPa	460

Tabla 3:Ficha técnica acero cables [18].

Descripción	Unidad	Laminados en caliente
Densidad	kg/m ³	7.850
Módulo de Young	MPa	200.000
Coefficiente de Poisson	-	0,3
Esfuerzo de fluencia	MPa	1.690
Resistencia a la tracción	MPa	1.860

2.1 Cargas

Las cubiertas son estructuras livianas a las que se le aplicaron cargas no sísmicas tanto permanentes como variables las cargas vivas, de viento y de granizo según la normativa vigente ecuatoriana de construcción NEC-2015 CPE INEN-NEC-SD-CG 26-1 [19] que dictan las directrices para las cargas mínimas a considerar en edificios y otras estructuras, las cuales se detallan a continuación.

2.1.1 Cargas No- Sísmicas

a. Carga muerta

La carga muerta considerada como el peso propio de la membrana PVDF Fluomax Tipo 0: con un peso total de 0,65 Kgf/m² y espesor de 0,55 mm [12].

b. Carga viva

El valor de la sobrecarga establecida la NEC-2015 del capítulo Cargas no sísmicas en la Tabla 1.2. Cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas seleccionada como cubierta tipo toldo o carpa [19] "Construcción en lona apoyada sobre estructura ligera" de 24,47 Kgf/m² para tenso estructura la carga viva es de 51 Kgf/m² [19].

c. Carga de viento

Para determinar las cargas de viento se consideraron los lineamientos de la sección 6.5 de la ASCE 7-10 [20]; con el fin de calcular la presión de barlovento y sotavento como se detalla en la tabla 4.

Tabla 4:Cargas de viento barlovento, sotavento y cubierta.

Descripción	Unidad	Parámetros
Velocidad instantánea máxima de viento	m/s	21
Velocidad de diseño	m/s	18,06
Coefficiente barlovento	s. u	+0,8
Coefficiente sotavento	s. u	-0,5
Presión barlovento	kg/m ²	19,46
Presión sotavento		-12,16
	kg/m ²	

2.1.1. Cargas Accidentales

a. Carga sísmica

La determinación del coeficiente de cortante basal se realizó basándose en la ubicación de Quito-Ecuador y la norma NEC-15 en su capítulo: Peligro Sísmico y diseño sismo resistente establecidos en el código CPE INEN-NEC-SE-DS 26-2 [19], con los siguientes parámetros que se pueden apreciar en la tabla 5.

Tabla 5: Parámetros para determinar el coeficiente de cortante basal.

Descripción	Parámetros
Relación amplificación espectral	2,48
Tipo de suelo	D
Zona sísmica	V
Factor de ubicación de proyecto	1
Factor de aceleración de zona sísmica	0,40
Factor de sitio Fa	1,2
Factor de sitio Fd	1,4
Factor de sitio Fs	1,5
Factor de importancia	1,0
Factor de reducción de respuesta	2,00
Factor de regularidad en elevación y planta	1
Coeficiente de cortante basal	0,595

2.2 Combinaciones de carga NEC-2015

En el diseño de la estructura se plantearon todas las combinaciones expuestas en la sección 6.4.3 de la NEC-15 [19] para estudiar el estado límite de resistencia, que se plantean en la tabla 6.

Tabla 6: Combinaciones de carga utilizadas.

Descripción	Combinación
Combinación 1	1,4D
Combinación 2	1,2D+1,6L+0,5max [Lr; S; R]
Combinación 3	1,2D+1,6 max [Lr; S; R] +max [L;0,5W]
Combinación 4	1,2D+1,0W+L+0,5max [Lr; S; R]
Combinación 5	1,2D+1,0E+L+0,2S
Combinación 6	0,9D+1,0W
Combinación 7	0,9D+1,0E

D: Carga Muerta, L: Carga Viva, Lr: Sobrecarga de Cubierta,
S: Granizo, R: Lluvia, W: Viento, E: Sismo

NOTA: (*) Para las combinaciones 3, 4 y 5: $L=0,5 \text{ kN/m}^2$ si $L_0 \leq 4.8 \text{ kN/m}^2$ (excepto para estacionamientos y espacios de reuniones públicas) [19].

En las cubiertas tipo tenso membrana, las cargas sísmicas no son representativas debido a la pequeña masa [21], por lo que el efecto sísmico no se cuantificó en las combinaciones.

2.3 Soportes de Fijación

Las tenso estructuras adquieren estabilidad al ser sometidas a tracción, por lo tanto, las uniones desempeñan un rol protagónico ya que, se deberá garantizar la correcta transferencia de dichos esfuerzos de un elemento a otro [22].

Los apoyos podrán ser rígidos o flexibles, puntuales o lineales, y situarse en el interior o en los bordes exteriores.

Para el análisis de los modelos 1 y 3 los apoyos se representaron de manera lineal como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Apoyo de fijación tipo lineal [17].

En la figura 9 se presenta el tipo de apoyo modelado como soporte fijo donde restringe las deformaciones en los ejes principales X, Y y Z.

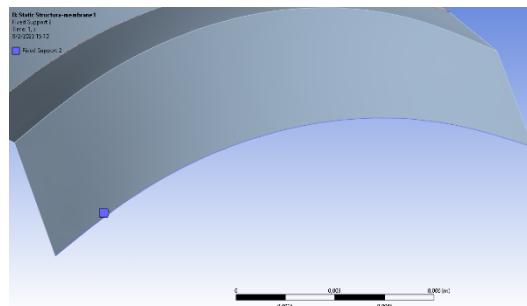


Figura 9. Representación de apoyo lineal Ansys Workbench.

En la figura 10 se observa el apoyo existente en el modelo 2.

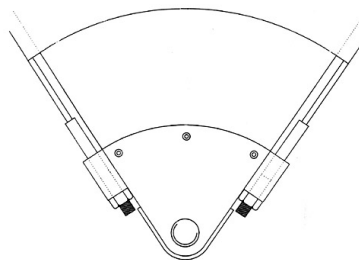


Figura 10. Apoyo donde los cables de borde están articulados y se pueden ajustar [17].

En donde se representó como se muestra en la figura 11 generando así un apoyo puntual que restringe los grados de libertad en todas sus direcciones para el análisis de la tenso membrana.

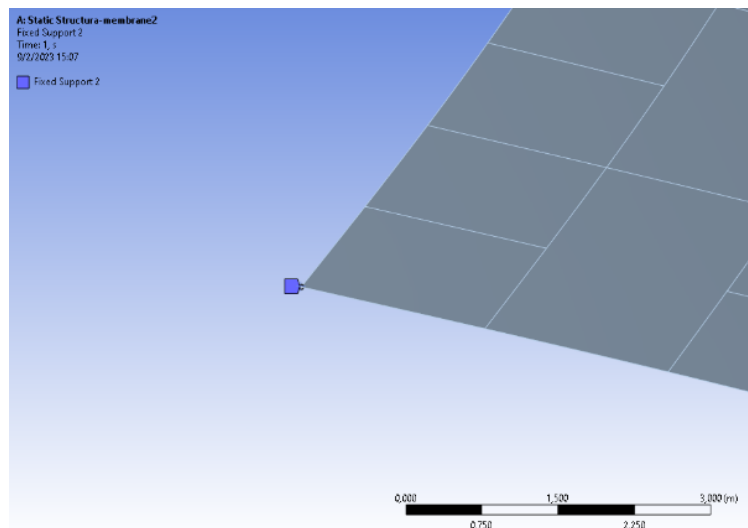


Figura 11. Apoyo donde los cables de borde están articulados y se pueden ajustar

2.4 Calidad del Mallado

La calidad de la malla tiene un papel fundamental en la precisión de los resultados, esta depende de la cantidad, el tamaño de los nodos y el tipo de elementos de malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño de malla y más elementos, más precisos serán los resultados del análisis. Debe considerarse que los resultados de la simulación no se ven afectados significativamente en términos del tamaño de elementos óptimos [23].

El dominio espacial discreto se conoce como la cuadrícula o malla compuesta de elementos y nodos.

Por malla estructurada se entiende toda discretización cuya conectividad sigue un patrón reticular. Por esta razón, en este tipo de mallas se utilizan fundamentalmente elementos cuadriláteros (2D) o hexaédricos (3D) [18]

El Ansys utiliza distintas verificaciones para medir la calidad de los elementos del mallado y discretización tales como:

- *Relación de Aspecto (Aspect Ratio)*

La relación de aspecto de un elemento se define como la relación entre la arista más larga y la normal más corta desde un vértice hasta la cara opuesta normalizada a un tetraedro perfecto. Por definición, un elemento tetraédrico perfecto tiene una relación de aspecto de 1,0 [23].

- *Relación del Jacobiano (Jacobian Ratio)*

Una de las mejores medidas de la calidad de la malla es la relación de Jacobi, el número que define qué tan buena o mala es una celda. El Jacobiano es una medida de la normal de la cara de un elemento en relación con otras caras. Un valor de 1 indica muy buena calidad de malla, mientras que valores negativos o superiores indican una calidad ineficiente [23].

En la tabla 7 se presentan los valores óptimos para una buena calidad de mallado:

Tabla 7: Parámetros de control de mallado [24].

Parámetros de Control	Malla	Valores Aceptados
Oblicuidad	máx: 0.96 prom: 4.95×10^{-3}	< 0.98
Ortogonalidad	mín.: 0.31 máx: 1	> 0.15
Jacobian Ratio	máx: 1	< 1
Maximum Aspect	19.65	< 50

A continuación, en las tablas 8,9,10 se muestran los parámetros de control obtenidos para un mallado ideal.

Tabla 8: Parámetros de control (Modelo 1).

Parámetros	Unidad	Factor
Dimensión del elemento	m	0,22
Jacobian Ratio	-	0,955
Nodos	u	9.961
Cantidad de elementos	u	9.843

Tabla 9: Parámetros de control (Modelo 2)

Parámetros	Unidad	Factor
Dimensión del elemento	m	0,10
Jacobian Ratio	-	0,976
Nodos	u	26.877
Cantidad de elementos	u	26.571

Tabla 10: Parámetros de control (Modelo 3)

Parámetros	Unidad	Factor
Dimensión del elemento	m	0,22
Jacobian Ratio	-	0,968
Nodos	u	7.702
Cantidad de elementos	u	7.549

Entre los parámetros encontrados se destaca el valor del ratio Jacobiano en la membrana del modelo 2 por estar aproximado a 1 lo que indica que la calidad del mallado es óptima con una dimensión de elementos de 0,10 m con la forma parabólica hiperbólica presentada en la figura 13.

Por otra parte, las cantidades de nodos en el modelo 2 son representativas en relación con el modelo 1 y 3 las cuales se pueden observar en el mallado correspondiente para cada uno de los modelos en las figuras 12,13,14.

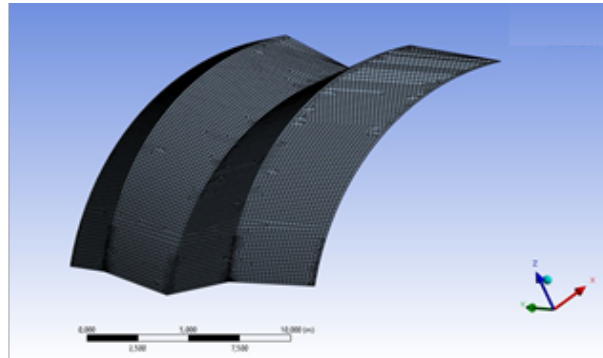


Figura 12. Mallado ideal Modelo 1 (Ansys Workbench)

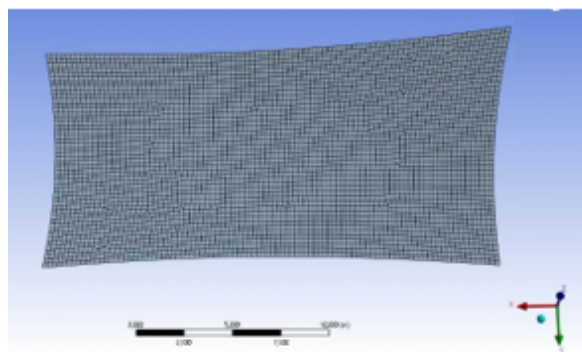


Figura 13. Mallado ideal Modelo 2 (Ansys Workbench).

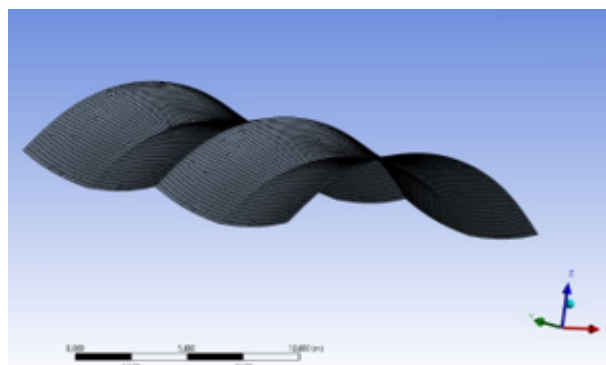


Figura 14. Mallado ideal Modelo 3 (Ansys Workbench)

2.5 Esfuerzos y deformaciones

La solución de un sistema continuo sigue las reglas de los problemas discretos, donde los conjuntos se ensamblan a partir de elementos, de tal manera obtener una respuesta a nivel de

desplazamientos, deformaciones y esfuerzos parámetros que se pueden resumir mediante las siguientes ecuaciones 1, 2 y 3 [3].

$$\{u\} = \{ux \ uy \ uz\} \quad (1)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}\} \quad (2)$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}\} \quad (3)$$

Donde $\{u\}$ es el vector de desplazamiento, $\{\sigma\}$ la tensión normal, $\{\tau\}$ la tensión tangencial, $\{\varepsilon\}$ la deformación unitaria y $\{\gamma\}$ la rotación [3].

Richard Von Mises propuso una teoría para predecir las propiedades de los materiales dúctiles utilizando las Ecuaciones 4 y 5 para determinar la tensión y la deformación [3].

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]} \quad (4)$$

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu} \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2]} \quad (5)$$

Esta suposición es esencial en el análisis para asegurar que la tensión máxima no exceda la tensión de flexión, evitando así la deformación permanente a lo largo de la superficie de la membrana [24].

Dentro de este marco de ideas, el método de los elementos finitos se basa en transformar un objeto de naturaleza continua en un modelo aproximadamente discreto, esta transformación se denomina discretización del modelo, y cuando se acerca a la geometría se denomina discretización física [21].

3. Resultados

El estudio del comportamiento estructural de las tres cubiertas de tenso membrana contempló las solicitaciones de cargas a las que están sometidas, así como el modelado de estas, las cuales fueron importadas al SAP2000 y ANSYS Workbench que mediante el método de elementos finitos (MEF) se le realizaron las simulaciones.

A continuación, se explican cada una de ellas:

3.1 3.1 Simulación Modelo 1

La resistencia en el punto de fluencia o el esfuerzo de cedencia se considera generalmente como el esfuerzo máximo que puede tolerarse [25].

Con la simulación del prediseño realizado en SAP2000 se analizó el comportamiento estructural de la cubierta con la combinación número 2 que se visualiza en la tabla 6 siendo esta la más crítica, dando como resultado un esfuerzo máximo de 88,98 MPa la cual está dentro del parámetro que se especifica en la tabla 1. Asimismo existe una deformación con un valor de 0,0150 m, dichos resultados se visualizan en la figura 15 y 16.

El catálogo de Fluomax indica las propiedades de la membrana dando una resistencia a la tensión de 330 MPa, el cual se puede observar que cumple [12].

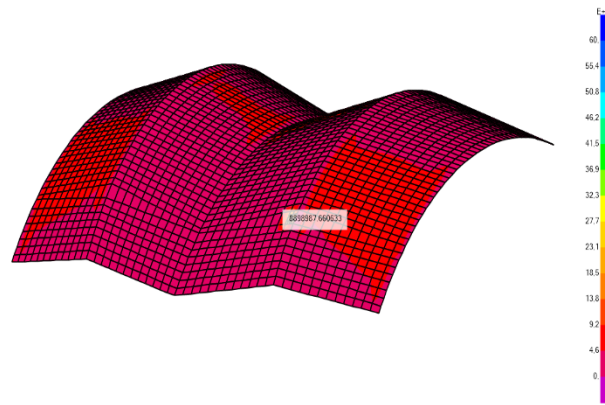


Figura 15. Análisis de esfuerzos de la cubierta en la 1 (Shell Stresses en el SAP 2000)

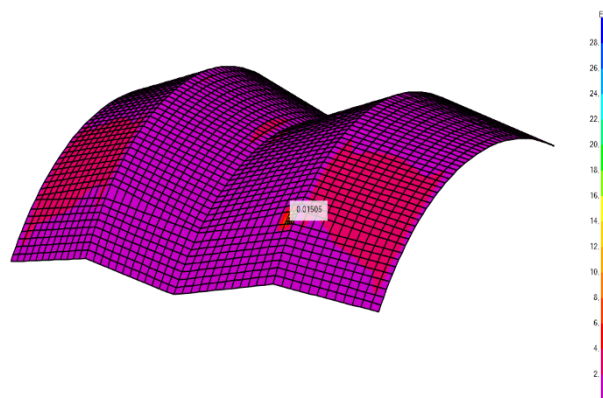


Figura 16. Análisis de deformación de la cubierta (Shell Strains en el SAP 2000)

En la simulación Ansys Workbench la calidad del mallado cuenta con un ratio Jacobian 0,955 lo cual se puede constatar que está dentro de los rangos descritos en la tabla 7, teniendo en consideración que un valor de 1 significa que la calidad de mallado es excelente [23], con estos parámetros de control se obtuvieron resultados mayores que en la etapa de prediseño, por lo que se describe que el esfuerzo para el modelo 1 alcanza un valor de 92,18 MPa y una deformación de 0,0393 m; es decir, estos resultados son aproximados en la simulación de Ansys con el comportamiento real de la estructura. Se verifica también que estos se encuentran dentro de los límites de resistencia descritos en la tabla 1.

En la figura 17 y 18 se puede visualizar que los esfuerzos y deformaciones se generan en el primer tercio de la membrana donde se encuentran los apoyos principales, estos valores se pueden constatar cuantitativamente en la tabla 10.

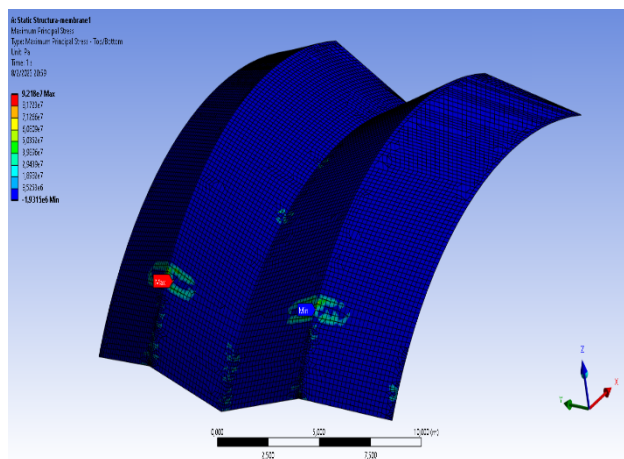


Figura 17. Esfuerzo total máximo (Ansys Workbench).

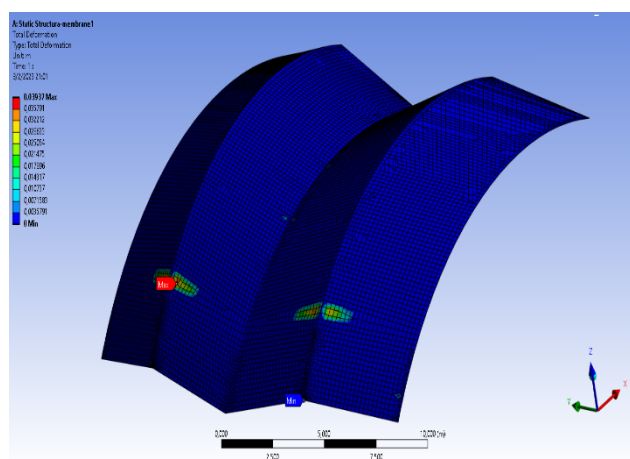


Figura 18. Deformación total máxima (Ansys Workbench).

Tomando en comparación los resultados obtenidos en esta simulación de Ansys, una vez que se optimizó el mallado y se empleó las ecuaciones correspondientes para el método de elementos finitos, se observa que estos se ven afectados considerablemente con los parámetros obtenidos en la etapa de prediseño como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 11: Tabla resultados Modelo 1.

Parámetros	Unidad	SAP2000	ANSYS
Esfuerzo máx.	MPa	88,98	92,18
Deformación	m	0,0150	0,0393

3.1 Simulación Modelo 2

En la simulación número 2 se encontró un comportamiento irregular de acuerdo al diseño estructural seleccionado con base en los resultados de esfuerzos y deformaciones. En las figuras 19 y 20 se puede visualizar que la estructura posee un resultado de esfuerzo de 9.933 MPa superando la resistencia máxima permitida descrita en la tabla 6 y una deformación de 0,51 m.

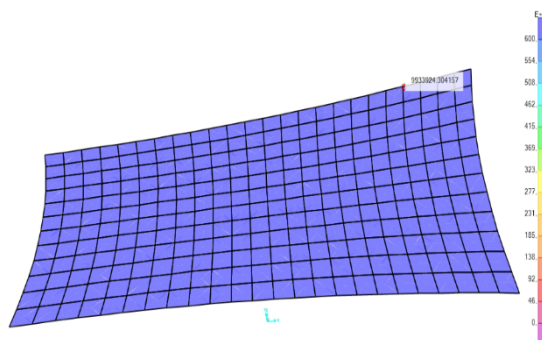


Figura 19. Análisis de esfuerzos de la cubierta en (Shell stresses en el SAP 2000).

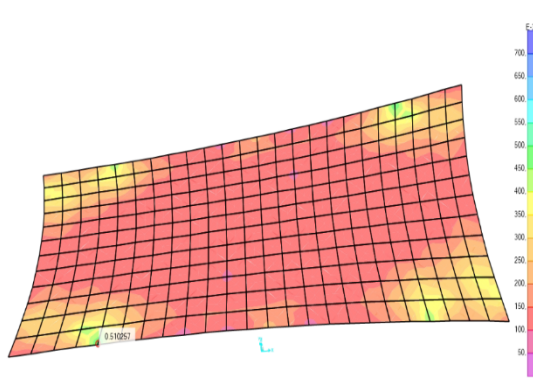


Figura 20. Análisis de deformación de la cubierta (Shell strains en el SAP 2000).

Para dar solución al diseño estructural con la finalidad de mejorar el comportamiento de la membrana, se contempló una nueva modelación aumentando el espesor inicial de 0,55 mm a un espesor de 1,39 mm.

Además, se adicionó elementos tipo tirantes las cuales son elementos constructivo, generalmente cables de acero, o barras que soportan esfuerzos de tracción, sirven para aumentar la resistencia y la estabilidad de una estructura. [26], en el cual se pudo constatar que la membrana mejora el contraste de colores teniendo valores de esfuerzos de 207 MPa como se puede apreciar en la figura 19; sin embargo en la figura 20 podemos observar la deformación en un valor de 0,11 m con la solución planteada.

Estos nuevos parámetros de esfuerzo y deformación varían en un promedio de 87 %; es decir, el comportamiento estructural de la membrana con forma de paraboloides hiperbólicos mejoró considerablemente.

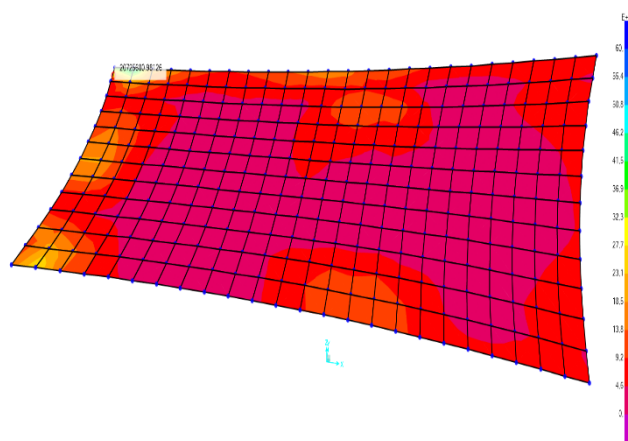


Figura 21. Análisis de esfuerzos de la cubierta (Shell Stresses en el SAP2000).

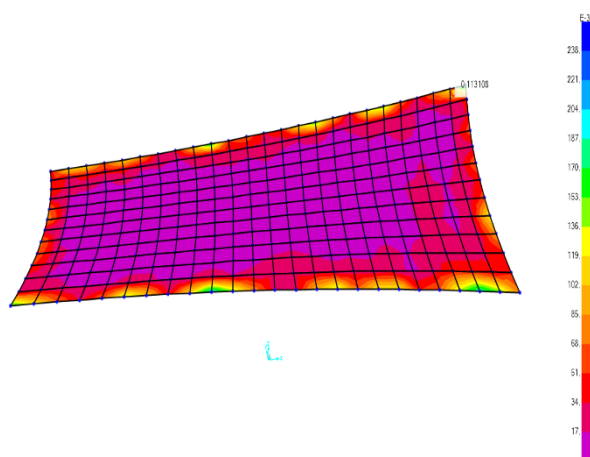


Figura 22. Análisis de deformación de la cubierta (Shell stresses en el SAP 2000).

En la figura 21 y 22 se pueden apreciar que las simulaciones en Ansys se evidencia que los esfuerzos y las deformaciones máximas se encuentran establecidas en las regiones de apoyos, generando de tal manera un desgarre de la membrana a largo plazo. A pesar de haber contado con un índice Jacobiano de 0,976 que se presentó en la tabla 9, siendo este mayor al obtenido en el modelo 1 y modelo 3, el comportamiento de la membrana fue deficiente en comparación a los modelos tipo semiarcos y arcos.

Cuantificando los parámetros de esfuerzo y deformación una vez aplicado el método de elementos finitos, en la simulación de Ansys, se puede destacar que el valor de esfuerzo es de 216 MPa y la deformación en un valor de 0,127 m como se visualiza en la figura 21 y 22.

Teniendo así un 57 % de aumento en términos de esfuerzos en comparación con el modelo 1 y un 67 % de incremento en caso de deformaciones tomando como referencia el modelo 1.

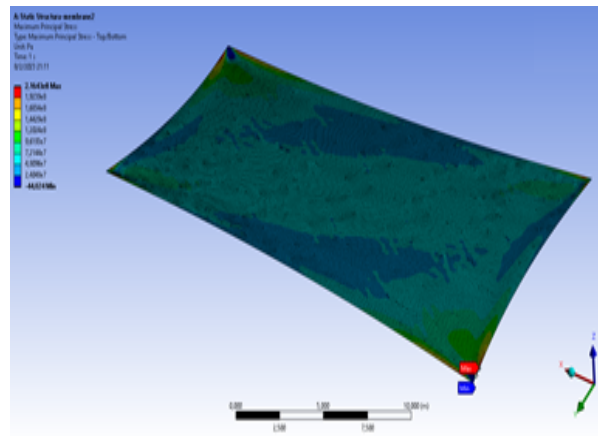


Figura 23. Esfuerzo total máximo (Ansys Workbench).

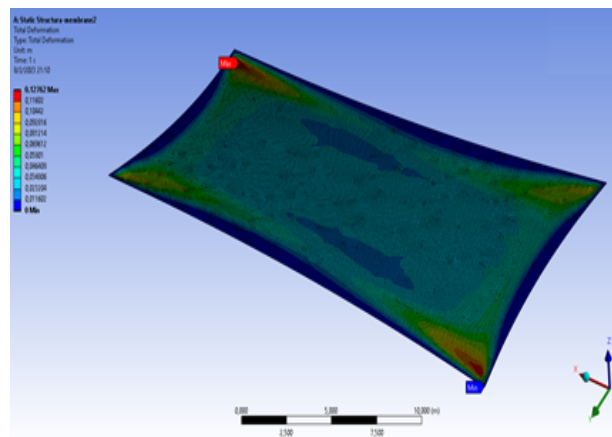


Figura 24. Deformación total máxima (Ansys Workbench).

En la tabla 11 se puede observar que los valores producidos en la etapa de prediseño simulados en SAP2000 se aproximan a los resultados obtenidos en el paquete computacional Ansys, aplicado para el análisis de elementos finitos, contando en esta etapa con un mallado optimizado.

Tabla 11: Tabla resultados Modelo 2 solución.

Parámetros	Unidad	SAP2000	ANSYS
Esfuerzo máx.	MPa	204	216
Deformación	m	0,103	0,127

3.2 Simulación Modelo 3

Al generar la solución del análisis estructural en esta última modelación en SAP2000 se presentaron valores en cuanto deformación total y principales esfuerzos, donde se tiene un valor máximo de la deflexión de 0,022 m y de esfuerzo máximo equivalente a 147,89 MPa como se muestran en la figura 23 y 24.

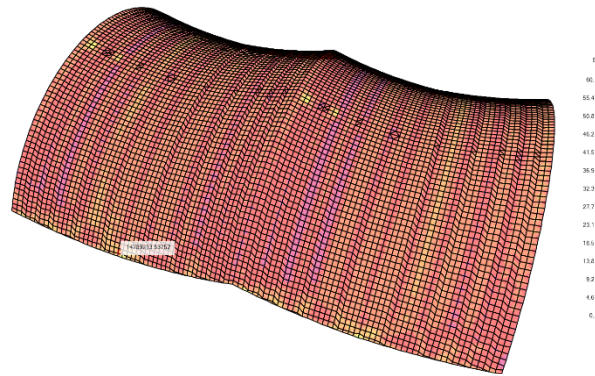


Figura 25. Análisis de esfuerzos de la cubierta en la (Shell stresses en el SAP 2000).

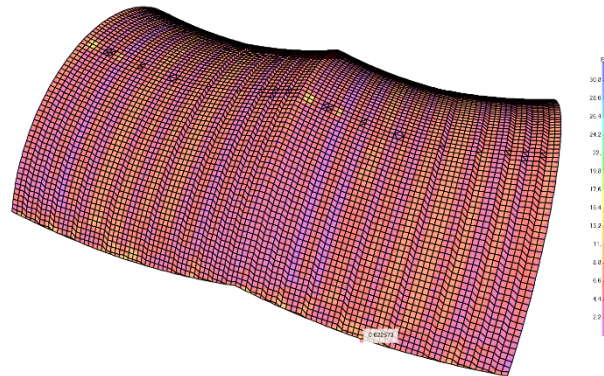


Figura 26. Análisis de deformación de la cubierta (Shell stresses en el SAP 2000).

Los resultados obtenidos en la etapa de SAP2000 como prediseño, son valores aproximados en comparación con los resultados obtenidos una vez empleado el método de elementos finitos y los respectivos parámetros de control para un mallado optimizado, en la simulación de Ansys, estos valores se los presenta en la tabla 13.

Se observa que los parámetros principales que se analizan en esta investigación se producen en las regiones de apoyos, es decir, en este modelo número 3 la presencia tanto de esfuerzo como deformación se las obtuvieron en la región lateral de la membrana, en el arco de apoyo como se visualiza en las figuras 25 y 26.

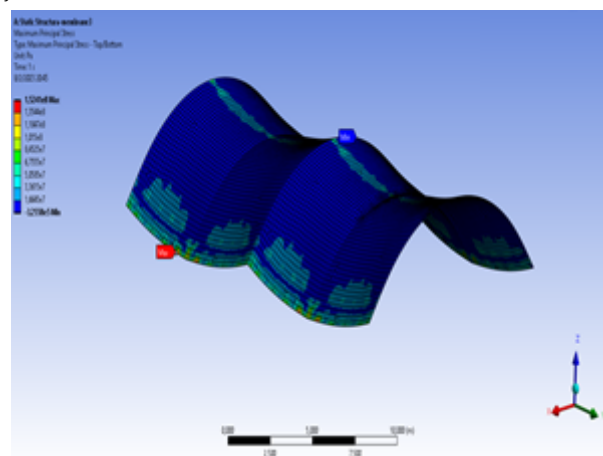


Figura 27. Esfuerzo total máximo (Ansys Workbench).

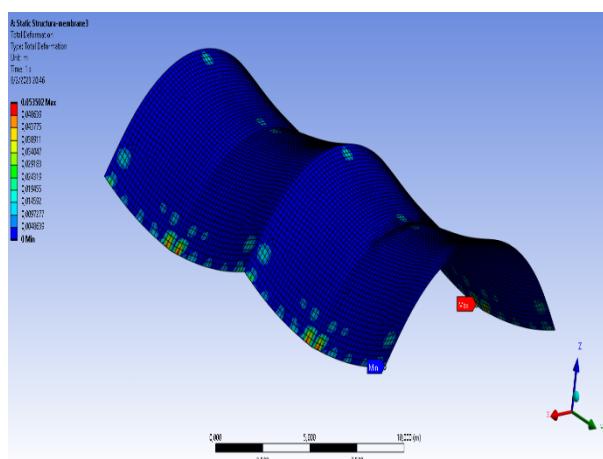


Figura 28. Deformación Total máxima (Ansys Workbench).

En cuanto al análisis estructural, el principal esfuerzo hallado se encuentra dentro de los parámetros de resistencia límite que nos indica la tabla 1, con un valor de 152,41 MPa y una deformación a flexión de 0,0535 m como se presentan en la tabla 13. Comparando estos resultados con el análisis de la primera modelación se visualiza que estructuralmente difieren en un 40 % para un parámetro de esfuerzo y un 25 % para deformación por encima de los resultados obtenidos.

Tabla 13: Tabla resultados modelo 3.

Parámetros	Unidad	SAP2000	ANSYS
Esfuerzo máx.	MPa	147,89	152,41
Deformación	m	0,0225	0,0535

4. Conclusión

En el análisis estructural del comportamiento de las cubiertas de tenso membranas mediante el método de elementos finitos en el paquete computacional SAP2000 se destaca que los diseños en los modelos apoyados en semiarcos y arcos cumplen con los parámetros establecidos de resistencia a tracción y flexión, ya que cuentan con un diseño estructural óptimo porque la membrana se apoya continuamente sobre los pórticos en arco lo que le proporciona un soporte continuo que permite la transferencia de las fuerzas o cargas a lo largo de la longitud de apoyo.

Conforme a los valores presentados en el modelo 2 con la forma de paraboloides hiperbólicos apoyados en columnas y cables los cuales fueron representados como apoyos puntuales se pudo constatar que, en el diseño estructural planteado, existen irregularidades constatando que la forma de paraboloides hiperbólicos cubre espacios con luces menores a los 17 m planteados. Para la cual se generó opción de solución aumentando el espesor de la membrana y adicionando elementos tipo cables concluyendo así que la membrana logró tener la resistencia necesaria para su óptimo funcionamiento. Es una de las principales limitaciones, que la distancia entre mástiles aumenta

proporcionalmente con la cantidad de acero a utilizar; por ende, aumentan los costos para este tipo de cubiertas livianas.

Por lo tanto, las cubiertas de tenso membrana analizadas pueden ser usadas en estructuras con pórticos tipo arco como en canchas deportivas, plazas comerciales y espacios con grandes luces a cubrir, que además estas cuenten con vigas de soporte donde repose la membrana empleando los apoyos respectivos tal que transmitan los esfuerzos generados por las distintas solicitaciones de carga presentes en la normativa NEC-15 a los elementos principales. Es por ello que, la profundidad en este tipo de investigación deja varios caminos que se pueden cubrir, un ejemplo claro es evaluar el comportamiento de una forma de estructura con la finalidad de encontrar la luz máxima que está puede llegar a resistir antes las diferentes solicitaciones de carga y propiedades mecánicas de materiales estándar.

Contribución de autores: Contribución de autores: idea y conceptualización, P.G., K.C. y D.V.; metodología, P.G., K.C. y D.V.; software, D.V., K.C. y P.G.; validación, D.V., K.C. y P.G.; investigación, D.V., K.C. y P.G.; redacción, D.V., K.C.; Revisión, P.G.; supervisión, P.G.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- [1] Pedroza, E., et al. "Tenso-estructuras de cubierta." *CULCyT: Cultura Científica y Tecnológica* 12.56: 69-78. 2015
- [2] Pinto Campos, B.C. *Arquitectura y diseño flexible: una revisión para una construcción más sostenible*. Tesis doctoral, UPC, Departament de Representació Arquitectònica, 2019.
- [3] Páez Redrován, C. D., & Guerrero Cuasapaz, D. P. Cubiertas autoportantes circulares aplicando el método de elementos finitos. *Gaceta Técnica*, 23(1), 72-91. 2022.
- [4] Vidal Ruiz, E. *La relación entre forma y estructura en la arquitectura y en la ingeniería civil: Frei Otto y Emilio Pérez Piñero*, 2017.
- [5] Hernández Palacios, J. C. "Evaluación técnico-económica de una cubierta anticlástica ligera para un área deportiva en instalaciones de una escuela de educación básica." *Instituto de Ingeniería y Tecnología* (2018).
- [6] Taboada Matute, C. F. *Análisis y diseño para el mejoramiento del complejo polideportivo del distrito de Oyotún, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque utilizando estructuras especiales*, 2020. 2021.
- [7] Morales Guzmán, C. C. *Desarrollo de un sistema transformable en las cubiertas plegables tensadas para espacios multifuncionales*. Doctoral Dissertation, Arquitectura. 2019
- [8] Rivas Reyero, Carolina. "Matices tensados: evolución y nuevas aplicaciones de las estructuras tensadas." (2018).
- [9] Sarrión Sos, H. *Propiedades y aplicaciones de los polímeros sintéticos en la construcción*. Diss. Universitat Politècnica de València, 2019.
- [10] Morales Guzmán, C. C. "Diseño de cubiertas plegables experimentales bajo factores de cargas de viento y sismo." *Procesos Urbanos* 7.1: 1-14. 2020
- [11] López Navarro, A. *Tipologías estructurales para grandes luces*. Diss. Universitat Politècnica de València, 2018.
- [12] *Construex*. *Catalogo Sioen Tensile Architecture: Architectural membranes. Overview Fluomax qualities*, 2022.
- [13] Woge, O. G., Morán, C. O. G., & Chau, A. L. (2020). Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab. *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*, 1(1), 27-47.

- [14] Montero, L. Á. G., García, J. C. F., & Roche, S. B. E. Enfoque procedimental en el diseño curricular de la asignatura Autodesk Robot para Ingenieros Civiles. *MUNDO RECURSIVO*, 5(2), 166-185. 2022
- [15] Bolaños Ponce, F. G. Análisis y diseño estructural comparativo entre techo de estructura portante de celosía y techo de membrana autoportante para el Coliseo Municipal Miguel Grau en el distrito de Paucarpata–Arequipa, 2018.
- [16] Proyecto básico estructural de cubierta ligera mediante membrana tensada para el recinto de pelota valenciana" Regidor Vicent Mascarell". Real de Gandía (Valencia). 2022.
- [17] Llorens Duran, Josep Ignasi de. "Los detalles constructivos de las tenso estructuras" España Escuela de Arquitectura de Barcelona Palma, 2011
- [18] ASTM A36. Clasificación: Aceros al carbono estructurales. 2022
- [19] NEC-SE-CG, "Norma ecuatoriana de la construcción. Cargas no sísmicas" Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), Ecuador, 2015
- [20] ASCE 7-16, "Minimum design loads and associated criterio for buildings and other structures" American Society of Civil Engineers (ASCE), E.E.U.U., 2016
- [21] Cancino Yáñez, R. I. "Estructuras de grandes luces con uso de cables y cubierta flexible." (2018).
- [22] Fernández Satz M.C, Mansilla J. (2016). Membranas Textiles (Bachelor's thesis, PUCE). Fabregat Barberán, F. (2022).
- [23] Molina Baño, I. R., & Vilaña Peña, D. A.. Simulación numérica de contacto entre superficies con movimiento relativo para predicción de desgaste en cojinetes de fricción de aleación de aluminio (Bachelor's thesis, Quito, 2018.).
- [24] Lee HH. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2022: Theory, Applications, Case Studies.: SDC publications; 2022.
- [25] Enrique Cortés González Mecánica de sólidos. Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán publications; 2022.
- [26] Luisa Vásquez , Cargas y Esfuerzos, Elementos de una Estructura Educación tecnológica 2021.



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>