



Nota Técnica

## Simulación del comportamiento de cargas diversas en conexiones de cubierta plana autoportante con vigas laterales mediante elementos finitos

### Simulation of the behavior of various loads in self-supporting flat roof connections with lateral beams using finite elements

José Luis Pilamunga Guallpa<sup>a</sup>, David Patricio Guerrero Cuasapaz<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6613718>

Recibido: 03-03-2022

Aceptado: 04-06-2022

#### Resumen

Las diversas alternativas utilizadas dentro de la industria de la construcción hacen que en el análisis y diseño estructural se emplee varias herramientas para conocer el correcto comportamiento de las estructuras ante estados de carga de diferente índole. Como consecuencia de ello se presenta un estudio del comportamiento de las cubiertas planas autoportantes y su conexión con las vigas laterales, mediante la aplicación del método de elementos finitos dentro de un análisis lineal con la ayuda del software ANSYS Workbench. Para ello se utilizó una sección IMA-800 conformando cubiertas con luces de 10, 20, 30 y 40 m, complementado el análisis con vigas y columnas tipo celosía, para el soporte de fijación se empleó una pletina con espesores de 4 a 12 mm, con la finalidad de comparar con las guías de diseño nacionales e internacionales, como son espesor, pendiente, luz máxima y la geometría del soporte de fijación. Observando esfuerzos máximos cerca de los soportes de fijación, mientras que las deformaciones máximas tuvieron lugar en los extremos de la cubierta. Al establecer nuevos parámetros para salvar las luces correspondientes, demostró un aumento en el peso de la cubierta alrededor del 5 % con relación a las guías de diseño empleadas.

**Palabras clave:** software de simulación, soporte de fijación, cubierta autoportante plana, elementos finitos.

**Código UNESCO:** 330506 – Tecnología de la construcción - Ingeniería civil.

**Código CAPE:** 30102030 – Ingeniería civil – Estructuras metálicas.

#### Abstract

The different alternatives used in the construction industry make that in the structural analysis and design several tools are used to know the correct behavior of the structures under different load states. Therefore, a study of the behavior of self-supporting flat roofs and their connection with lateral beams is presented by applying the finite element method within a linear analysis with the help of ANSYS Workbench software. For this purpose, an IMA-800 section was used, forming roofs with spans of 10, 20, 30 and 40 m, complementing the analysis with lattice-type beams and columns. For the fastening support, a plate with thicknesses from 4 to 12 mm was used, to compare with national and international design guidelines, such as thickness, slope, maximum span and the geometry of the fastening support. Maximum stresses were observed near the fixing brackets, while maximum deformations took place at the ends of the roof. By setting new parameters to save the corresponding spans, it showed an increase in the roof weight of about 5% in relation to the design guidelines used.

**Keywords:** simulation software, fixing bracket, flat self-supporting roof, finite elements.

**UNESCO Code:** 330506 - Construction technology - Civil engineering.

**CAPE Code:** 33102030 - Civil engineering – Metallic structures.

\* Autor de correspondencias.

**PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA** es editada por la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Venezuela. ISSN 1856-8890 EISSN 2477-9660. Dep. Legal pp200702LA2730, ppi201402LA4590. CC BY-NC-SA. Email addresses: [luis-24-1996@hotmail.com](mailto:luis-24-1996@hotmail.com) (José Luis Pilamunga Guallpa), [dguerrero@ups.edu.ec](mailto:dguerrero@ups.edu.ec) (David Patricio Guerrero Cuasapaz)

## 1. Introducción

En la década de los setenta, el mercado brasileño se transforma en uno de los pioneros en aportar al mercado de la construcción un nuevo proceso constructivo, con el objetivo de conducir ahorros considerables en tiempo, materiales y mano de obra. Conocido como cubiertas planas autoportantes, el cual emplea una sección transversal de lámina tipo IMA-800 con una luz máxima de 20 m. El mercado ecuatoriano implementa este tipo de cubierta, en el que no existe una estructura transversal de carga, apoyándose la misma sobre vigas laterales. En él se destaca la total ausencia de correas u otro elemento transversal resistente [1].

Uno de los puntos principales dentro del comportamiento de una cubierta plana autoportante, son los soportes de fijación que constituyen un elemento estructural importante, con una forma igual a la onda presente en la geometría de la lámina. Cada uno de estos soportes de fijación sirve como nexo entre la cubierta plana autoportante y las vigas laterales, mediante la utilización de pernos galvanizados [1]. Adicionalmente, los soportes de fijación son los responsables de transmitir las cargas que recibe de la cubierta al resto de la estructura, a través de una conexión soldada en el patín superior de la viga lateral perimetral.

Una simulación correcta de las cubiertas planas autoportantes requiere de una selección cuidadosa de las propiedades mecánicas del metal base y de su recubrimiento. Por lo que fue necesario el uso de información a nivel nacional como internacional, con la finalidad de generar una ficha técnica del producto. Así, documentos como la NTE INEN 2492 [4], ASTM A653 [5], NBR 7008 [6] y guías de diseño, establecen las propiedades del material empleado en las cubiertas planas autoportantes.

Con la llegada de los ordenadores, los problemas discretos pueden resolverse generalmente sin dificultad, aun cuando el número de elementos sea elevado [7]. La aplicación del software de simulación basado en elementos finitos *ANSYS Workbench* 19.0 [8], permitió dividir las láminas autoportantes en un número finito de elementos, convirtiéndolo en un problema discreto con el cual se puede analizar la respuesta de la estructura. Esta herramienta es útil para poder predecir el rendimiento y posibles problemas en su diseño, como son deflexiones mayores a los permisibles o esfuerzos que superen la resistencia del material.

Debido a la escasa investigación respecto a las cubiertas planas autoportantes dentro del Ecuador, surge esta investigación con el interés de conocer cuál es su comportamiento real al estar sometido a diferentes estados de carga. Por esta razón, se realizó una comparación de cada una de las variables presentadas en las guías de diseño para las luces de 10 y 20 m. Posteriormente se planteó luces de 30 y 40 m, con la finalidad de encontrar nuevos parámetros de diseño que permitan salvar luces mayores a las expuestas en las guías de diseño.

Al presentar una sección poco convencional el método de elementos finitos permite observar la respuesta de la estructura, como son sus esfuerzos y deformaciones, ayudando a encontrar un espesor adecuado para salvar las luces planteadas. De igual manera el soporte de fijación es un elemento importante dentro del comportamiento de la estructura en su conjunto, por lo que un análisis con elementos finitos permitió predecir su rendimiento ante los esfuerzos que recibe de la cubierta y posteriormente transmite a las vigas laterales, llegando a determinar un espesor adecuado de la pletina para un correcto comportamiento. Evitando de esta manera un sub-dimensionado en los elementos estructurales que puedan llevar al colapso de la estructura.

Lograr un diseño apropiado es el objetivo principal de una simulación en elementos finitos. Los desplazamientos [1] y deformaciones [2] generalmente están relacionados con la funcionalidad de la estructura, mientras que el esfuerzo [3] con la seguridad y confiabilidad. Estos parámetros se pueden resumir mediante las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\{u\} = \{u_x \quad u_y \quad u_z\} \quad (1)$$

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

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

Siendo,  $\{u\}$  el vector de desplazamientos,  $\{\sigma\}$  los esfuerzos normales,  $\{\tau\}$  esfuerzos tangenciales,  $\{\varepsilon\}$  deformaciones unitarias,  $\{\gamma\}$  rotaciones [9].

Richard Von Mises propuso una teoría para predecir el rendimiento de los materiales dúctiles, llegando a determinar las ecuaciones 4 y 5 para los esfuerzos y las deformaciones [9].

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

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

Donde  $\nu'$ , es el coeficiente de Poisson efectivo. Esta hipótesis es esencial en el análisis, procurando que los esfuerzos máximos no superen el esfuerzo de fluencia, evitando de esta manera deformaciones permanentes en la cubierta plana autoportante.

Es preciso mencionar, que las láminas se combinan entre sí mediante pernos de acero galvanizado aplicados a cada metro a lo largo de todo el vano, lo que permite solidificar el conjunto autoportante y evitar la apertura en los traslapes de cada lámina, por lo que establecer un contacto se puede volver un problema lineal o no lineal, siendo importante entender cuál sería el contacto que se asemeje al problema en la realidad, esto dependerá de las cargas aplicadas, el material y las condiciones del contorno [10].

## 2. Desarrollo

### 2.1 Modelo lineal de la estructura

Con el fin de lograr valores adecuados dentro de esta investigación, fue importante conocer la configuración, resistencia y rigidez de los materiales que conformarán el sistema estructural estudiado. De manera que fue necesario establecer una nave industrial con dimensiones empleadas dentro de un proyecto real, pero con la diferencia de que los elementos transversales son sustituidos por la cubierta plana autoportante.

En consecuencia, se idealizó 4 naves industriales con luces de 10, 20, 30 y 40 m, por medio de un sistema de pórticos laterales formados por vigas y columnas tipo celosía, con una profundidad de 12 m en sus pórticos laterales, una altura mínima de columna de 6 m y una pendiente del 5% en su cubierta tal como se presenta en la Figura 1.

Se dispone de manuales actualizados de perfiles nacionales para el diseño de las secciones armadas [11]. Empleando angulares L laminados en caliente de lados iguales y canales con sección tipo U conformados en frío. Con el objetivo de conocer las características de los perfiles que se comercializan localmente como se muestra en el Cuadro 1 y si éstos satisfacen la relación demanda/capacidad de cada elemento estructural sometido a compresión como para tracción mediante el programa computacional SAP2000 [12].

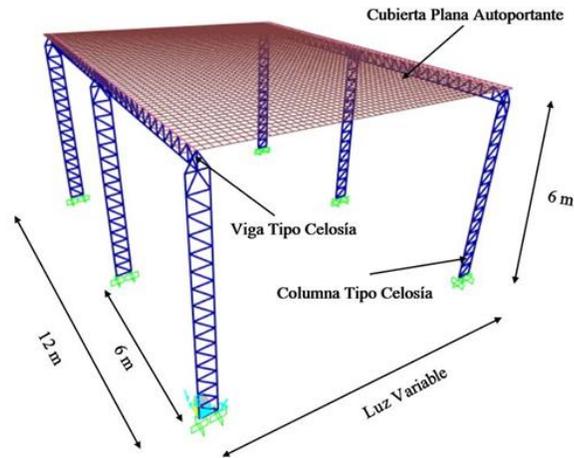


Fig. 1. Dimensiones del modelo de nave industrial formado por vigas y columnas tipo celosía.

Cuadro 1. Propiedades adoptadas de aceros estructurales.

Descripción	Laminados	Conformados
	en caliente	en frío
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	7.850	7.850
Módulo de young [MPa]	200.000	203.000
Coefficiente de poisson	0,3	0,3
Esfuerzo de fluencia [MPa]	250	275
Resistencia a la tracción [MPa]	460	360

#### a. Lámina autoportante

El modelo de lámina empleado en esta investigación es una IMAP-800 como se muestra en la Figura 2, cuya característica principal es su forma de omega, la cual es realizada mediante embuticiones, lo que genera que su tipo de junta entre láminas sea una unión traslapada [13].

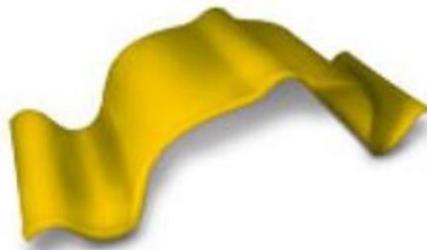


Fig. 2. Lámina autoportante I IMAP-800.

Fuente: Acoport [14].

El material empleado son láminas de acero recubiertas con zinc (galvanizadas) por inmersión en caliente, el cual deja una gruesa capa gris en sus dos caras. En el Cuadro 2 se presenta un resumen de sus principales propiedades, aunque dichos productos son clasificados como calidad comercial, sus

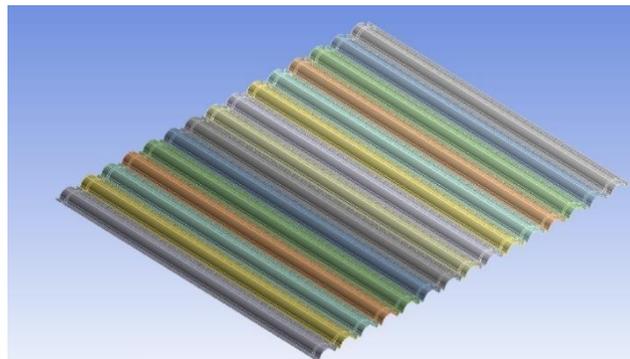
propiedades mecánicas se encuentran clasificados como calidad estructural. La norma NTE INEN 2492 [4] indica, que no es obligatorio cumplir con los valores de las propiedades mecánicas establecidas para un acero de calidad comercial, de esta manera el comprador puede exigir un rango específico o más restringido para la aplicación.

**Cuadro 2.** Ficha técnica acero recubierto con zinc.

Descripción	IMAP-800
Designación recubrimiento	Z275 - G90
Recubrimiento ambas caras [g/m <sup>2</sup> ]	275
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	7.850
Módulo de young [MPa]	200.000
Coefficiente de poisson	0,3
Módulo de compresibilidad [MPa]	167.000
Módulo de corte [MPa]	76.900
Esfuerzo de fluencia [MPa]	380
Resistencia a la tracción [MPa]	480

**Fuente:** Guerrero et al. [15].

Para cubrir la profundidad de 12 m de cada uno de los modelos, se toma en consideración el ancho útil de la lámina que es igual a 80 cm. De modo que la cantidad de láminas necesarias para cubrir dicha profundidad es igual a 15 unidades (Figura 3).



**Fig 3.** Cubierta autoportante compuesta por 15 láminas para cubrir 12 metros de profundidad.

Las guías de diseño consideran diferentes espesores en función de las luces que se quieran salvar, la cual está en función de las características de una bobina de acero galvanizada como se muestra en el Cuadro 3. Al no existir un espesor recomendado para luces de 30 y 40 m, se hace uso de proveedores que comercialicen espesores de mayor tamaño, llegando a obtener un espesor máximo de 5 mm [16].

**Cuadro 3.** Espesores recomendados por guías de diseño para cubiertas planas autoportantes.

Luz [m]	Espesor recomendado [mm]
10	0,95
20	1,55
30	-
40	-

### b. Soporte de fijación

El soporte de fijación es un punto clave en el funcionamiento correcto de la estructura, cuyo elemento es conocido como caballete, que no es más que una platina de acero al carbono con designación ASTM A36, como se puede observar en la Figura 4, cuyas sus características de fluencia y resistencia a la tracción se encuentran en los 250 MPa y 460 MPa respectivamente.



**Fig.4.** Soporte de fijación.

**Fuente:** Acoport [17].

Los pernos utilizados para la conexión de la cubierta con los soportes de fijación son principalmente de calidad ASTM A325 con un diámetro mínimo de 5/16 pulg [18]. Al momento de idealizar las perforaciones se tomó en cuenta la práctica usual que es añadir 1/16 pulg al diámetro de los pernos, de la misma manera según la norma ANSI/AISC 360-16 [19], se estableció una distancia mínima entre centros de perforaciones igual a 2.67 veces el diámetro de la perforación, una distancia mínima al borde no menor a 22 mm y una distancia máxima que no excedió los 150 mm.

La conexión con la viga lateral se lo realiza mediante el proceso de soldadura de arco metálico con gas (GMAW), el arco se produce con la ayuda de un alambre sólido de acero al carbono con manganeso y silicio con protección superficial de cobre. Las propiedades mecánicas de la soldadura se encuentran dentro de la norma AWS A5.18 [20], con un esfuerzo de fluencia de 400MPa y una resistencia a la tracción igual a 480 MPa.

## 2.2 Cargas estructurales

### a. Carga muerta

La carga muerta representa el peso propio de la cubierta y de cada uno de los perfiles empleados para la conformación de las vigas y columnas.

### b. Sobrecarga de cubierta

La sobrecarga de cubierta establecida para este caso es de 0,70 kN/m<sup>2</sup>, la cual es una carga producida durante la instalación y el mantenimiento a lo largo de su vida útil [21].

### c. Carga de viento

La cubierta plana autoportante se caracteriza por tener un solo plano de inclinación, y la acción del viento se presenta perpendicular a la superficie, por lo que las cargas determinadas son aplicadas en dos direcciones, generando presión y succión en la cubierta como se muestra en la Figura 5. Las

solicitaciones de presión como de succión fueron considerados dentro de las combinaciones de carga de acuerdo con la Normativa Ecuatoriana de la Construcción [21].

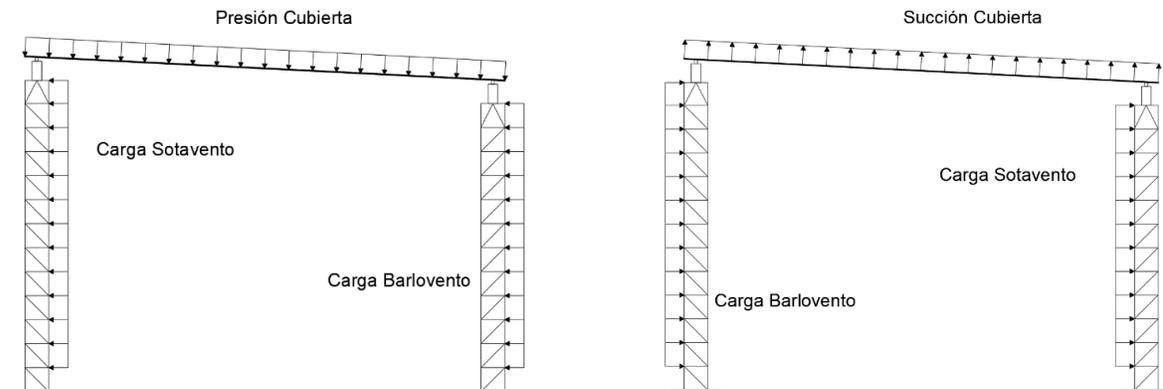


Fig. 5. Presión y succión de carga de viento cubierta.

Los parámetros necesarios para determinar la presión en cada uno de los pórticos se encuentran en función de la velocidad instantánea máxima de viento, factor de variación con la altura, rugosidad del terreno y un coeficiente de topografía del sitio tal como se indica en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Cargas de viento barlovento, sotavento y cubierta.

Descripción	Parámetros
Velocidad instantánea máxima de viento [m/s]	28
Velocidad de diseño [m/s]	22,12
Coefficiente barlovento	0,8
Coefficiente sotavento	-0,4
Coefficiente cubierta	-0,8
Presión barlovento [kg/m <sup>2</sup> ]	18,79
Presión sotavento [kg/m <sup>2</sup> ]	-9,39
Presión cubierta [kg/m <sup>2</sup> ]	±18,79

#### d. Carga de granizo

Al establecer una pendiente igual al 5%, se considera una acumulación de granizo de 5 cm de espesor, con un valor de carga igual a 0,50 kN/m<sup>2</sup> [21].

#### e. Carga sísmica

Se determinó un coeficiente de cortante basal como se muestra en el Cuadro 5 mediante el método estático equivalente, que se encuentra en función de parámetros como la zona sísmica, el tipo de suelo y sus características geométricas de la estructura [22] [23].

**Cuadro 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 proyecto	1
Factor de aceleración de zona sísmica	0,4
Factor de sitio Fa	1,2
Factor de sitio Fd	1,19
Factor de sitio Fs	1,28
Factor de importancia	1
Factor de reducción de respuesta	2,5
Factor de regularidad en elevación y planta	1
Coeficiente de cortante basal	0,476

## 2.3 Metodología de diseño

### a. Estados límites últimos

Durante la investigación se hizo uso del método de diseño plástico LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) como se muestra en el Cuadro 6, el cual considera diversas combinaciones de carga actuando separadamente con el máximo valor esperado en la vida útil de la construcción [24].

**Cuadro 6.** Combinaciones de diseño por última resistencia.

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

**Fuente:** Norma Ecuatoriana de la Construcción [21].

### b. Condiciones de servicio

El estado límite de servicio en el diseño de la cubierta plana autoportante es asegurar un normal funcionamiento durante la instalación y el confort de sus ocupantes durante la vida útil de la estructura. Para ello, se hizo uso de una combinación donde se encuentra involucrada la carga muerta de la estructura (D) y una sobrecarga de cubierta (Lr) [24].

Dentro del reglamento ASCE/SEI 7-16 [25] menciona, el uso de una deflexión máxima en miembros horizontales para vigas de entrepiso de  $L/360$ , y para vigas o correas de cubierta  $L/200$ . En el caso de la

cubierta plana autoportante, su función es de un elemento estructural principal, por tal motivo se consideró conveniente emplear una deflexión máxima de  $L/200$ .

### c. Factores de resistencia

Tomar en cuenta las incertidumbres en la resistencia de los materiales, las dimensiones de los elementos, la mano de obra y en la aproximación de las teorías de análisis, se lo realiza mediante la aplicación de un factor de resistencia.

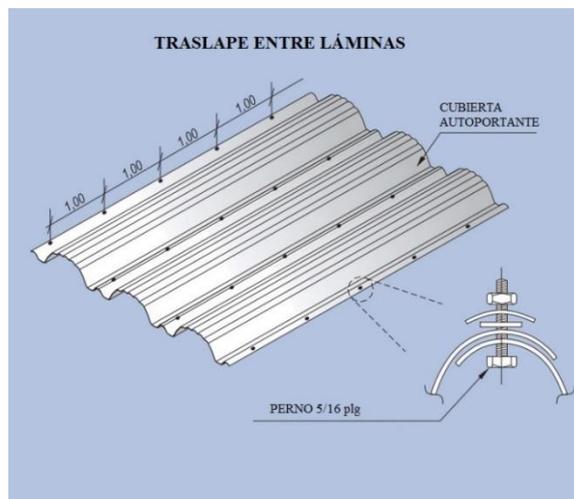
El comportamiento de una cubierta plana autoportante es de un miembro sometido a flexión, por lo que su estado límite se encuentra al llegar a la fluencia. Por tal motivo su factor de resistencia fue de 0,90 [24].

El soporte de fijación se va a encontrar empernado a la cubierta y de igual forma soldada al patín superior de la viga, su comportamiento principalmente se encuentra a corte, compresión y tracción, con un factor de resistencia igual a 0,75 [24].

## 2.4 Planteamiento en elementos finitos

### a. Contacto entre láminas

El proceso de instalación de la cubierta plana autoportante, se lo realiza mediante un traslape entre láminas a lo largo de todo el vano colocando pernos cada metro como se muestra en la Figura 6.



**Fig. 6.** Traslape de láminas autoportantes mediante pernos [14].

Considerando las características del traslape, se adoptó un contacto adherido (*bonded*) como se muestra en la Figura 7, con la finalidad de tener un análisis lineal dado que la región de contacto tendrá un cambio mínimo durante la aplicación de la carga con respecto a los esfuerzos producidos en toda la cubierta [9], lo que significa que se encuentra restringido en el sentido normal a la cubierta mientras que se permite un pequeño desplazamiento en el sentido tangencial y radial [10]. Al existir una junta traslapada entre láminas, fue necesario dejar una separación entre ellas igual al espesor adoptado, de tal manera que se genere un tipo de contacto sin penetración.

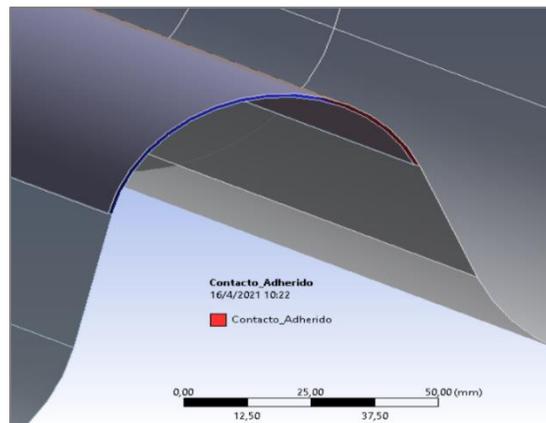


Fig. 7. Contacto tipo bonded ANSYS Workbench.

### b. Condiciones de borde

Conociendo que la conexión entre el soporte de fijación y la cubierta plana autoportante es empernada, y como regla general si un soporte previene la traslación de un cuerpo ya sea en sus coordenadas globales o locales, entonces una fuerza es desarrollada sobre el cuerpo. Igualmente, si una rotación en el apoyo es restringida, sobre el elemento se genera un momento, bajo esta premisa, se impuso las siguientes condiciones de borde:

- En el contacto entre la cubierta y el soporte de fijación se estableció un apoyo simple, esto quiere decir una restricción en el sentido normal al contacto y un desplazamiento impedido en el eje Z, pero una libre rotación en sus extremos. Esto se logró con la ayuda de las condiciones de borde que presenta el programa ANSYS Workbench 19.0 [8], siendo un soporte sin fricción (*frictionless support*), el cual previene que exista un movimiento en la dirección normal, pero permite el movimiento en su dirección tangencial, Figura 8 [9].
- En el caso de las perforaciones, se empleó una restricción en los ejes X, Y y Z, con el objetivo de idealizar la presencia de los pernos. La condición de borde establecida en este caso fue un soporte tipo desplazamiento (*displacement*) [9].

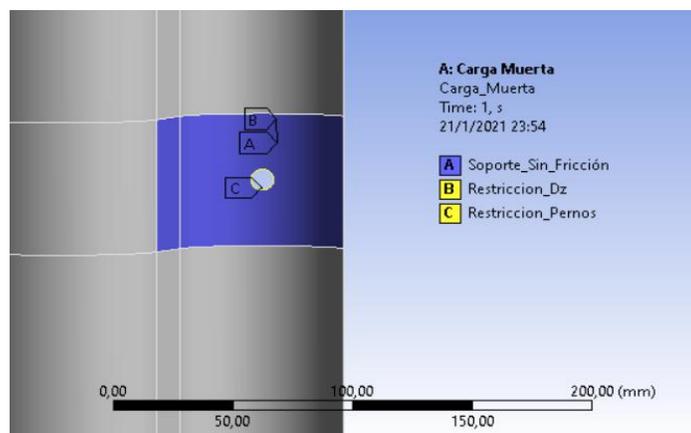


Fig. 8. Condiciones de borde, programa ANSYS Workbench.

c. *Medidas de calidad de mallado*

Las diferentes estadísticas de calidad de malla que presenta el programa *ANSYS Workbench* es una buena manera de conocer el estado de una malla, a simple vista se puede obtener un cuerpo discretizado con elementos simétricos pero las métricas no alcanzan los parámetros mínimos. Una manera rápida y fácil de comprobar es mirar la calidad ortogonal que sea mayor a 0,15 y su asimetría menor a 0,97.

## 2.5 Simulación cubierta autoportante

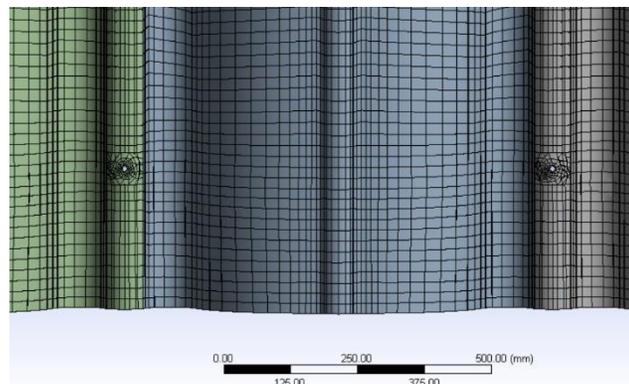
a. *Métricas de calidad de malla*

Para la cubierta plana autoportante se consideró cuerpos superficiales, siendo los elementos cuadriláteros y triangulares los que predominaron el mallado. En todos los modelos analizados se verificaron los parámetros estadísticos y los histogramas presentados por el programa *ANSYS Workbench*, obteniendo valores en su asimetría menores a 0,97 y valores mayores a 0,15 en su calidad ortogonal, no obstante, un mallado cuadrilátero se generó en el menor tiempo posible, como se observa en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.** Parámetros estadísticos mallado cubierta autoportante.

Descripción	Cuadriláteros	Triangulares
Tiempo [min]	0:11	1:10
Número de nodos	83.617	108.779
Número de elementos	82.618	215.520
Asimetría		
Máximo	0,585	0,575
Mínimo	1,33E-01	1,15E+00
Promedio	0,0887	0,263
Calidad ortogonal		
Máximo	1	0,999
Mínimo	0,699	0,607
Promedio	0,982	0,819

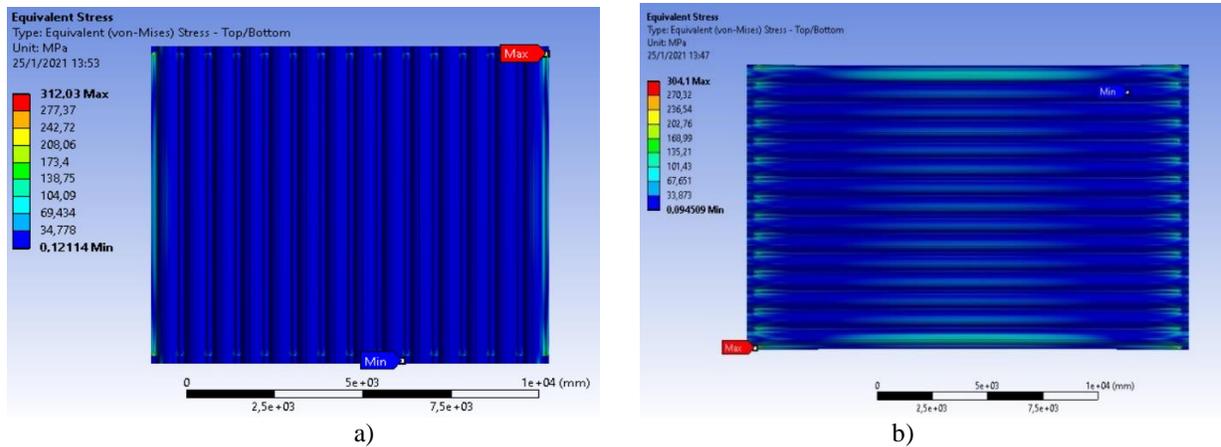
Un ejemplo del mallado con elementos cuadriláteros utilizado en cada uno de los modelos se presenta en la Figura 9, donde se contrasta de manera visual la cara ideal de los elementos cuadriláteros.



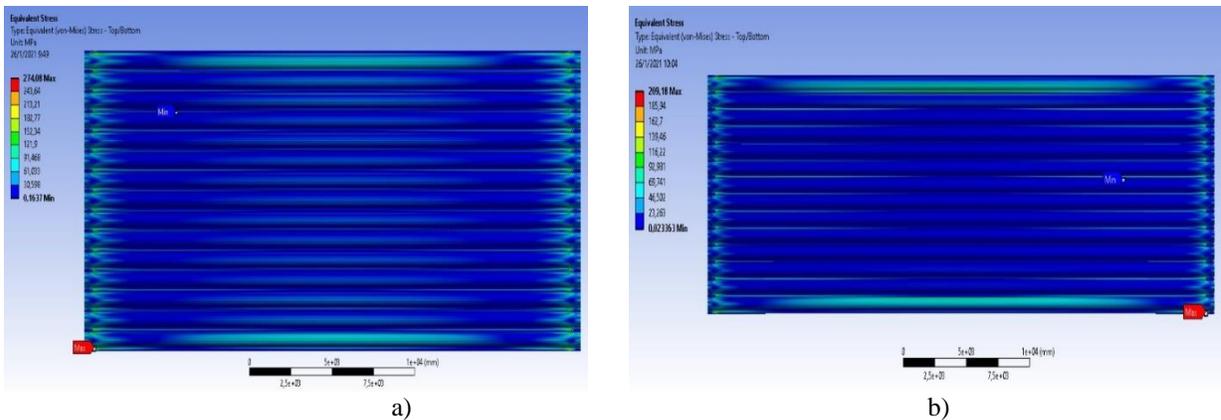
**Fig. 9.** Mallado con elementos cuadriláteros, programa *ANSYS Workbench*.

**b. Esfuerzos y desplazamientos máximos**

La generación de los mayores esfuerzos como era de esperarse se presentó cerca de los soportes de fijación, viéndose afectada principalmente las perforaciones de la lámina (véase las Figuras 10 y 11). Se conoce que el esfuerzo límite en la lámina es el de fluencia, el cual es de 380 MPa, por lo que se consideró un factor de resistencia de 0,90. Por tanto, ningún valor de esfuerzo superó los 342 MPa como se muestra en el Cuadro 8. Cabe mencionar que se planteó el número de perforaciones en la conexión emperrada, en función de la normativa ANSI/AISC 360-16 [19].



**Fig. 10.** Esfuerzos máximos cubierta plana autoportante de: a) 10 m, b) 20 m.



**Fig. 11.** Esfuerzos máximos cubierta plana autoportante de: a) 30 m, b) 40 m.

**Cuadro 8.** Resumen espesores, perforaciones, esfuerzos y desplazamientos.

Luz [m]	Espesor catálogo [mm]	Espesor final [mm]	Número de perforaciones	Esfuerzo máximo [MPa]	Desplazamiento máximo [mm]
10	0,95	0,95	1	313,43	29,01
20	1,55	1,95	3	330,19	89,27
30	- <sup>a</sup>	3,00	4	313,43	139,14
40	- <sup>a</sup>	3,50	5	283,41	123,31

a: Valores de espesores no se encuentran dentro de los catálogos de diseño para cubiertas planas.

Mientras que los desplazamientos se produjeron en el centro de la luz, exactamente en los extremos de la cubierta, donde no existe un traslape entre láminas o elemento transversal que evite el aumento de las deformaciones verticales (véase las Figuras 12 y 13). Según el diseño por servicio, las flechas permisibles son 50, 100, 150 y 200 mm, para las luces de 10, 20, 30 y 40 m, respectivamente.

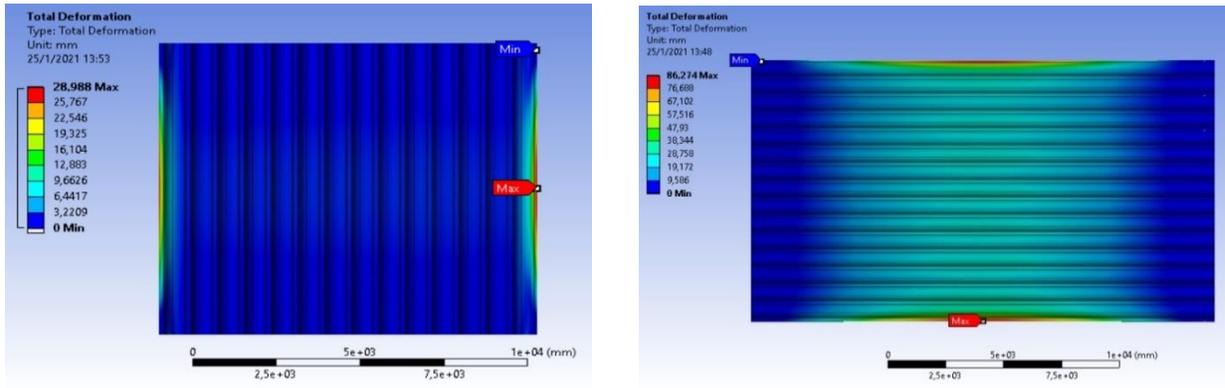


Fig. 12. Desplazamientos máximos cubierta plana autoportante de: a) 10 m, b) 20 m.

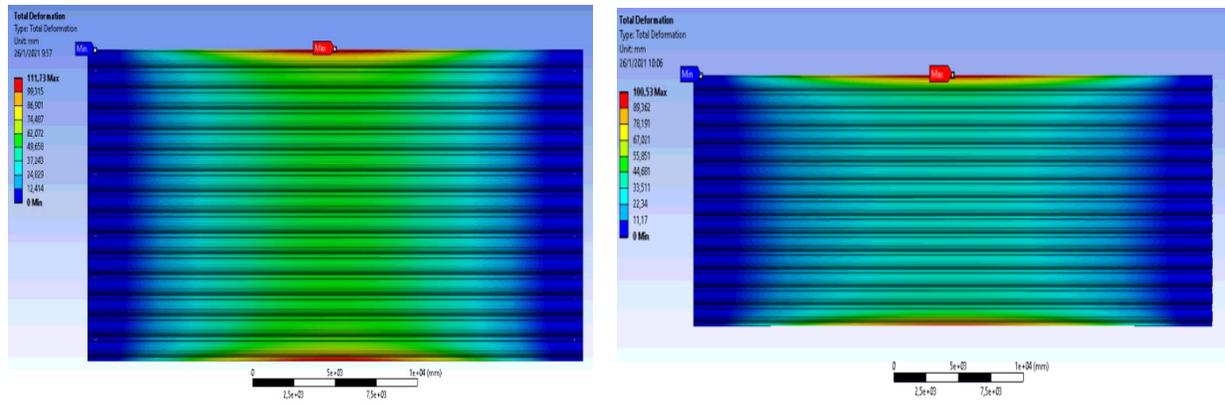


Fig. 13. Desplazamientos máximos cubierta plana autoportante de: a) 30 m, b) 40 m.

Se aumentó progresivamente el número de láminas hasta completar los 12 m de profundidad de cada modelo, donde se presentó una tendencia lateral en sus esfuerzos y desplazamientos, como se muestra en la Figura 14.

## 2.6 Simulación soporte de fijación

### a. Métricas de calidad de malla

Al contrario de la cubierta plana autoportante donde se utilizó cuerpos superficiales para cada lámina, la platina de acero tiene espesores más grandes que llegan hasta 20 mm, por lo cual el uso de un cuerpo sólido fue ideal para esta simulación. Dentro del mallado de un cuerpo sólido los principales elementos son tridimensionales. Observando el Cuadro 9 el mallado MultiZone cumple con los parámetros estadísticos de asimetría y calidad ortogonal.

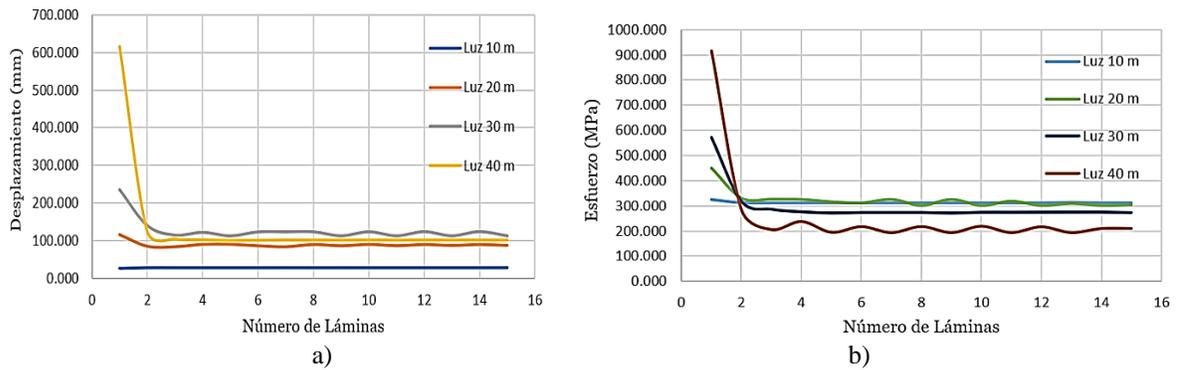


Fig. 14. a) Desplazamientos máximos, b) Esfuerzos máximos con respecto al número de láminas.

Cuadro 9. Parámetros estadísticos mallado soporte de fijación.

Descripción	Tetraedro	Hexaedro	MultiZone
Número de nodos	2.253	32.198	4.289
Número de elementos	1.031	9.597	710
Asimetría			
Máximo	0,998	1,000	0,516
Mínimo	0,104	0,120	1,37E-04
Promedio	0,703	0,699	0,145
Calidad ortogonal			
Máximo	0,859	0,993	1,000
Mínimo	1,68E+00	2,01E-06	0,853
Promedio	0,294	0,359	0,975

En la Figura 15 se muestra un mallado con polígonos regulares en la platina de acero, como también en el patín superior de la viga lateral. En la soldadura se planteó un mallado más fino, dado que fue un punto crítico donde existió la presencia de los esfuerzos máximos debido a las fuerzas laterales tanto de tracción como de compresión.

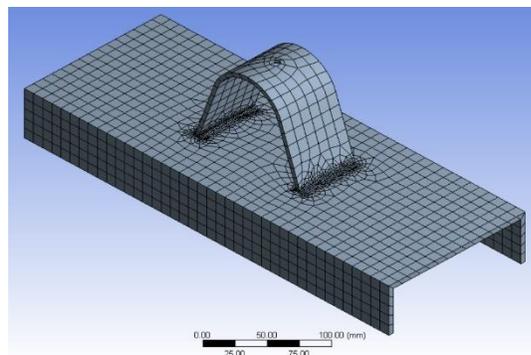
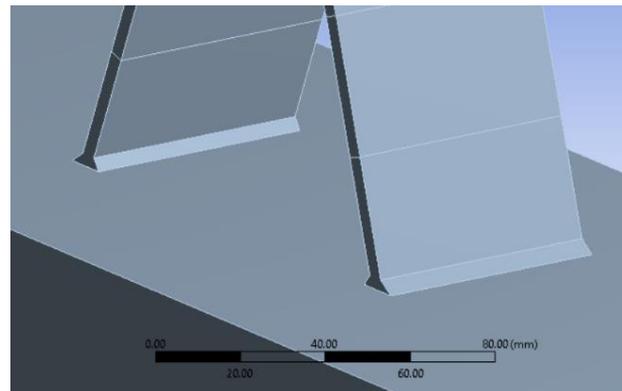


Fig. 15. Mallado MultiZone, programa ANSYS Workbench.

**b. Esfuerzos máximos**

Se sabe que la resistencia a la tracción que puede resistir la pletina de acero es la que rige en estos casos, por lo que su valor es igual a 460 MPa, de igual forma se adoptó un factor de resistencia igual a 0.75, obteniendo un esfuerzo máximo que puede resistir la platina de acero de 345 MPa. De la misma manera se conoce que la resistencia última en la soldadura es de 360 MPa aplicado el factor de resistencia correspondiente. Las soldaduras de filete no deben diseñarse con un esfuerzo mayor que el esfuerzo de diseño de los miembros adyacentes, por lo tanto, el esfuerzo máximo de diseño fue igual a 345 MPa [26].

Al no encontrar un soporte de fijación recomendado por las guías de diseño para luces de 30 y 40 m, se planteó dimensiones nuevas en los elementos estructurales, manteniendo las dimensiones mínimas entre la separación del centro de la perforación con el borde más cercano de la platina de acero de acuerdo con la norma ANSI/AISC 360-16 [19]. El espesor adoptado de la soldadura quedó en función de los elementos a soldar, en este caso la platina de acero con el canal tipo U de la viga lateral, por lo que fue necesario dentro del programa *ANSYS Workbench* modelar la soldadura a lo largo de la platina de acero con un contacto adherido como se muestra en la Figura 16.



**Fig. 16.** Espesores de soldadura, programa *ANSYS Workbench*.

En el Cuadro 10 se observa que el espesor del patín superior de la viga influye dentro del análisis del soporte de fijación, encontrando nuevos espesores con la finalidad de disminuir los esfuerzos.

**Cuadro 10.** Resumen espesores, longitudes, secciones U y esfuerzos en el soporte de fijación.

Luz [m]	Espesor inicial [mm]	Espesor final [mm]	Longitud caballete [mm]	Espesor soldadura [mm]	Sección U prediseño	Sección U final	Esfuerzo permisible [MPa]	Esfuerzo máximo [MPa]
10	3	4	60	3	150x50x3	150x50x5	345	321,26
20	4	7	160	5	200x50x3	200x50x6	345	274,83
30	7	10	209	5	250x60x3	250x60x8	345	218,32
40	10	12	240	5	300x80x4	300x80x8	345	238,18

Los esfuerzos máximos que se obtuvieron en los diferentes soportes de fijación se presentaron a lo largo del espesor de la soldadura como también en la parte superior de la platina de acero con valores muy por debajo de los esfuerzos permisibles (véase Figuras 17 y 18).

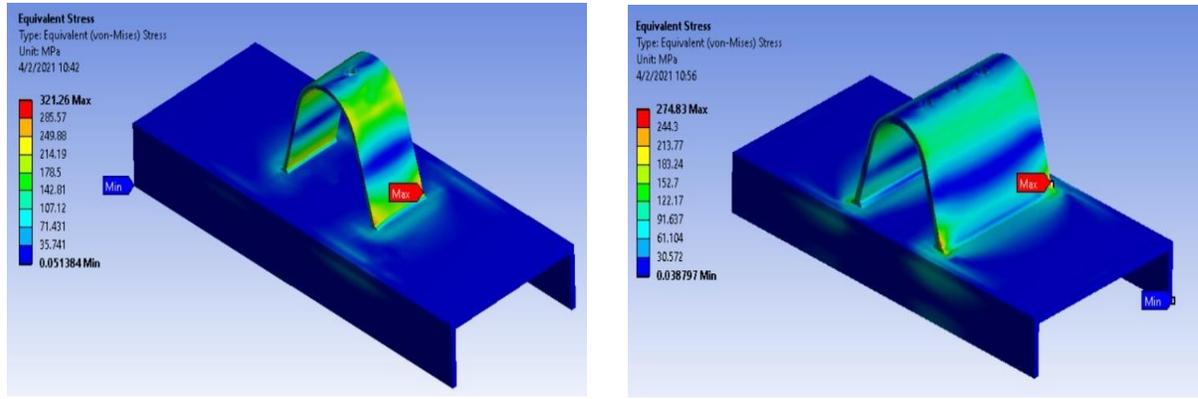


Fig. 17. Esfuerzos máximos soporte de fijación: a) 10 m, b) 20 m.

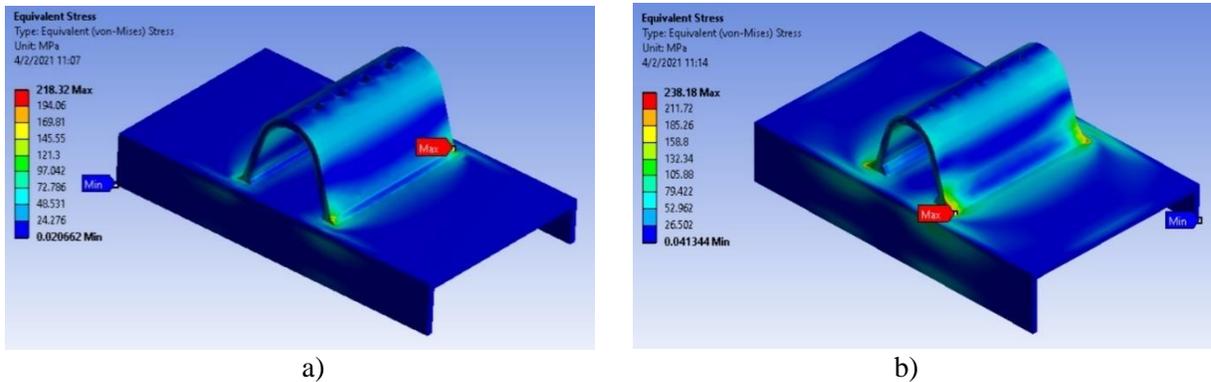


Fig. 18. Esfuerzos máximos soporte de fijación: a) 30 m, b) 40 m.

## 2.7 Peso real de las estructuras

Para estimar el peso total de cada uno de los modelos estructurales planteados se hace uso de un programa de análisis estructural conocido como SAP2000 [12], donde se modela el pórtico por completo con las dimensiones mencionadas en el capítulo 2. Por lo que se procedió a realizar una sección equivalente rectangular, obteniendo una inercia igual a la cubierta real y un coeficiente para representar el peso real de la misma.

El peso de la cubierta encontrado con el programa *ANSYS Workbench*, no es más que el peso de una lámina autoportante dividido para su área de cobertura. La diferencia entre el peso total de la estructura (vigas, columnas y cubierta) y el peso de la cubierta, permite determinar el peso de las vigas y columnas tipo celosía. Este proceso se lo realizó a cada uno de los pórticos establecidos anteriormente, originando de esta manera pesos reales por metro cuadrado, tal como se puede observar en el Cuadro 11.

**Cuadro 11.** Resumen peso de cubiertas, vigas y columnas de los modelos planteados.

Luz [m]	Peso cubierta catálogo [kg/m <sup>2</sup> ]	Peso cubierta programa [kg/m <sup>2</sup> ]	Peso total estructura [kg/m <sup>2</sup> ]	Peso vigas y columnas [kg/m <sup>2</sup> ]
10	11,18	10,60	19,48	8,88
20	18,26	21,85	30,61	8,76
30	-	33,77	42,09	8,32
40	-	39,48	48,31	8,83

### 3. Conclusiones

La inclinación de la cubierta plana autoportante según su concepto no permite tener una pendiente mayor al 5%, así como la normativa chilena NCh 1079, establece su uso en lugares con lluvias leves. Esto se logra corroborar con las recomendaciones que sugieren los proveedores, cuyos valores se encuentran entre el 1 al 5%. Si este tipo de estructuras fueran implantadas en lugares donde las lluvias son constantes, sería necesario un análisis más detallado, como parámetro principal el efecto de la lluvia.

Al comprobar que la sección IMAP-800 posee una sección transversal compleja, la aplicación del método de elementos finitos y una mallada con elementos cuadriláteros superficiales empelando un mallado más fino alrededor de las perforaciones cercanas a la conexión, permitiendo visualizar el comportamiento ante las cargas de diseño, obteniendo resultados que pueden ser empleados dentro de programas tradicionales como SAP2000 [12], logrando calibrar las propiedades como el peso y su inercia real, que ayuden a verificar el comportamiento general de la nave industrial.

Mientras tanto el soporte de fijación al ser un elemento no complejo se utilizó elementos poligonales regulares con elementos más finos cerca de la soldadura donde existió una concentración de esfuerzos debido a los esfuerzos de tracción.

Los esfuerzos obtenidos en cada una de las cubiertas analizadas demuestran que sus valores máximos se encuentran cerca de las conexiones. El soporte de fijación empleado en el modelo con una luz de 10 metros fue de acuerdo con lo estipulado en el manual del fabricante [13]. Al no existir un soporte de fijación recomendado por el fabricante para luces de 30 y 40 metros, fue necesario establecer nuevas dimensiones y un aumento en el número de perforaciones de acuerdo con la normativa ANSI/AISC 360-16 [19]. Esto con el objetivo de reducir los esfuerzos producidos en la zona próxima a las perforaciones.

La característica principal de las deflexiones en cada una de las cubiertas estudiadas es que, sus desplazamientos máximos se encuentran en la primera y última lámina, debido a que no existe un traslape entre láminas o un elemento transversal que evite el desplazamiento vertical. Mientras la luz aumenta, los valores de desplazamiento crecen en el centro de la cubierta, pero los valores máximos siguen presentes en los extremos de la cubierta plana autoportante.

En todos los modelos analizados, se planteó un aumento progresivo del número de láminas autoportantes, completando los 12 metros de profundidad de cada pórtico. Los resultados de esfuerzos y deflexiones encontrados en la simulación de una sola lámina varían con relación a las simulaciones de dos láminas, tres láminas y así sucesivamente hasta complementar las 15 láminas requeridas por el modelo. A medida que se incrementaba el número de láminas, los valores llegaron a estabilizarse. Para las luces de 10m, 20m, 30m y 40 m, se observaron errores relativos en los esfuerzos de la primera lámina simulada con relación a las simulaciones subsecuentes de 4,01%, 43,85%, 75%, 217,56%

respectivamente, en tanto que las deflexiones presentaron valores de 1,27%, 23,21%, 65,3%, 3,86% respectivamente. En conclusión, la simulación de una sola lámina autoportante no evidencia el comportamiento real de toda la cubierta, puesto que, dentro del análisis, no existe la influencia de un traslape entre láminas.

Los esfuerzos máximos en el soporte de fijación se presentaron en el cordón de soldadura, debido principalmente a las fuerzas laterales, lo que podría suceder es un desprendimiento de la soldadura si este no se encuentra realizado de una manera técnica o por un personal calificado. Cabe mencionar que el espesor del canal de sección tipo U es un parámetro importante para la disminución de los esfuerzos en el soporte de fijación principalmente en la conexión soldada, tal como se observa en el Cuadro 10.

Analizando el Cuadro 11, se observa que el peso de la cubierta establecido en el catálogo para las luces de 10 y 20 metros tiene una diferencia con respecto al peso encontrado por el programa ANSYS Workbench, de alrededor del 5%. Mientras que, para las luces de 30 y 40 metros, no existe un valor con el cual se pueda comparar, pero se observa que existe un incremento del peso, esto llega a suceder debido a que existe un aumento en los espesores de la lámina. Lo que advierte que el peso de la cubierta influye significativamente en el peso total de la estructura, llegando a superar el peso de los elementos como vigas y columnas, los cuales se mantienen en un rango de 9 kg/m<sup>2</sup>.

## Referencias

- [1] Telaport. Manual técnico IMAP-850, Pernambuco: Telaport coberturas metálicas, 2004.
- [2] J. Fernández. Cubiertas planas. Madrid: Tectónica, 1998.
- [3] INN. Norma Chilena NCh 1079. Arquitectura y construcción. Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización, 1977.
- [4] INEN. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2492. Láminas de acero recubiertas con zinc (galvanizadas) o Recubiertas con aleación hierro zinc (galvano-recocido) mediante procesos de inmersión en caliente. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009.
- [5] ASTM. ASTM A 653 Standard specification for Steel sheet, zinc-coated (galvanized) or zinc-iron alloy-coated (galvannealed) by the hop-dip process. Pennsylvania, United States: American Society for Testing and Materials, 2009.
- [6] ABNT. NBR 7008 Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou com liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.
- [7] C. Zienkiewicz; R. Taylor. El método de los elementos finitos. Barcelona: McGraw-Hill, 1994.
- [8] ANSYS Workbench 19.0. Mechanical help, 2019.
- [9] H. Lee. Finite element simulations with ANSYS Workbench 2019. Kansas: SDC Publications, 2019.
- [10] C. Páez; D. Guerrero. “Cubiertas autoportantes circulares aplicando el método de elementos finitos”, *Gaceta Técnica*, vol 23, no 1, pp.72-91, 2022. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.6>
- [11] Dipac. Catálogo general de productos, Quito: Dipac productos de acero, 2020.
- [12] Producto of computers & structures inc. Getting started with SAP2000, 2020.
- [13] Conacero. Cubiertas autoportantes manual, Quito: Aceros y Afines Conacero S.A., 2006.
- [14] Acoport telhas autoportantes. Dado técnicos. <http://acoport.com.br/telhas-autoportantes/dados-tecnicos/>
- [15] D. Guerrero; M. Guerrón; J. Pilamunga; C. Páez; N. López. “Analysis of the structural behavior of flat and circular self-supporting roof using finite elements”, *Revista de la Universidad de Zulia*, vol 13, no 36, 2022. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/rluz/article/view/37554>
- [16] Zhongcansteel. Cotización Proforma Galvanized Steel Coild, Shandong: Zhongcansteel News Material, 2020.

- [17] Acoport telhas autoportantes (10 de enero de 2021). Imágenes de soportes de fijación.  
<https://www.facebook.com/acoport/photos/2521518717965566>
- [18] J. McCormac. Diseño de estructuras de acero. México: Alfaomega, 2012.
- [19] AISC. ANSI/AISC 360-16 Especificación para construcciones de acero. Chicago, Estados Unidos: Instituto Americano de la Construcción en Acero, 2016.
- [20] AWS. AWS A5.18 Specification for Carbon Steel Electrodes. Miami, United States: American Welding Society, 2005.
- [21] NEC. NEC-SE-CG. Cargas (no sísmicas). Quito, Ecuador: Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015.
- [22] NEC. NEC-SE-DS. Peligro sísmico diseño sismo resistente. Quito, Ecuador: Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015.
- [23] D. Loachamin; A. Freire; D. Guerrero; M. Guerrón. “Análisis técnico-económico de naves industriales mediante interpolación no lineal de Lagrange”, *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*. Universidad del Zulia, 44(2), 102-116, 2021. <http://doi.org/10.22209/rt.v44n2a05>
- [24] F. Crisafulli. Diseño sismorresistente de construcciones de acero. Mendoza: Asociación Latinoamericana del Acero, 2018.
- [25] ASCE. ASCE/SEI 7-16. Minimum design loads and associated criteria for building and other structures. Virginia, United States: American Society of Civil Engineers, 2016.
- [26] V. Capa, Diseño de conexiones soldadas. Tesis de grado, Universidad Politécnica Nacional, 2009.

## Sobre los autores

*José Luis Pilamunga Gualpa*

Ingeniero Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador.

Correo electrónico: luis-24-1996@hotmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0892-1838>

*David Patricio Guerrero Cuasapaz*

Ingeniero Civil. Magister en Estructuras. Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador. Docente Investigador Carrera Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador.

Correo electrónico: dguerrero@ups.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8547-906X>

## Forma de citar

J.L. Pilamunga Gualpa y D.P. Guerrero Cuasapaz, “Simulación del comportamiento de cargas diversas en conexiones de cubierta plana autoportante con vigas laterales mediante elementos finitos”, *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol 15, No 2, pp. 76-94, 2021. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>

## Fuente de financiamiento

Los autores declaran que financiaron íntegramente el estudio.

## Contribuciones intelectuales de los autores

Concepción y diseño del trabajo: J LPG, DPGC.

Adquisición, análisis o interpretación de los datos: J LPG.

Redacción y/o revisión crítica del manuscrito: J LPG, DPGC.

Todos los autores han leído y aceptado la versión final del manuscrito.

## Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.