

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:
SIMULACIÓN DE UNA CUBIERTA PLANA AUTOPORTANTE Y SU CONEXIÓN
CON LAS VIGAS LATERALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ELEMENTOS
FINITOS.**

**AUTOR:
JOSÉ LUIS PILAMUNGA GUALLPA**

**TUTOR:
DAVID PATRICIO GUERRERO CUASAPAZ**

Quito, marzo del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo José Luis Pilamunga Gualpa, con documento de identificación N° 1718747767, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: **SIMULACIÓN DE UNA CUBIERTA PLANA AUTOPORTANTE Y SU CONEXIÓN CON LAS VIGAS LATERALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, marzo del 2021



.....
José Luis Pilamunga Gualpa

CI: 1718747767

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto técnico, con el tema: SIMULACIÓN DE UNA CUBIERTA PLANA AUTOPORTANTE Y SU CONEXIÓN CON LAS VIGAS LATERALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS, realizado por José Luis Pilamunga Gualpa, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'D. Guerrero Cuasapaz', written over a horizontal line. Below the signature is a dotted line indicating the position of the printed name.

David Patricio Guerrero Cuasapaz

CI: 1715215974

SIMULACIÓN DE UNA CUBIERTA PLANA AUTOPORTANTE Y SU CONEXIÓN CON LAS VIGAS LATERALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS

SIMULATION OF A SELF-SUPPORTING FLAT ROOF AND ITS CONNECTION TO THE SIDE BEAMS BY APPLYING FINITE ELEMENTS

José Pilamunga-Guallpa¹ David Guerrero-Cuasapaz²

Resumen

Se presenta un estudio de las cubiertas planas autoportantes y su conexión con las vigas laterales, empleando una sección transversal de lámina tipo IMAP-800 con la ayuda del software de simulación basado en elementos finitos ANSYS Workbench 19.0, lo que permitió evidenciar el comportamiento real de la cubierta completa, bajo la aplicación de estados de carga por última resistencia y servicio, comprobando de esta manera las variables de diseño encontradas en catálogos, tales como espesor, pendiente, luz máxima; y de igual forma, el tipo de conexión empleado para transmitir los esfuerzos a la viga lateral. Lo que supone establecer un estudio de luces de 10, 20, 30 y 40 metros. De cada uno de los modelos analizados, los esfuerzos y deformaciones máximas presentaron una línea de tendencia lateral con valores dentro de lo permisible, con esfuerzos máximos concentrados en los soportes de fijación, principalmente en sus perforaciones y su conexión por soldadura. Al establecer nuevos parámetros para salvar las luces correspondientes, demostró un aumento en el peso de la cubierta de alrededor del 5%.

Palabras Clave: Autoportante, Conexión, Cubierta plana, Elementos finitos, Estados de carga

Abstract

A study of self-supporting flat roofs and their connection with the lateral beams is presented, using a cross section of IMAP-800 type sheeting with the help of the simulation software based on finite elements ANSYS Workbench 19.0, which allowed to demonstrate the real behavior of the complete roof, under the application of load states for ultimate strength and service, thus verifying the design variables found in catalogs, such as thickness, slope, maximum span; and likewise, the type of connection used to transmit the forces to the lateral beam. This involves establishing a study of spans of 10, 20, 30 and 40 meters. For each of the models analyzed, the maximum stresses and deformations presented a lateral trend line with values within the permissible range, with maximum stresses concentrated in the fixing brackets, mainly in their perforations and their welding connection. When establishing new parameters to save the corresponding spans, it showed an increase in the deck weight of about 5%.

Keywords: Self-supporting, Connection, Flat roof, Finite elements, Load states

¹ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

² Docente de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: jpilamungag@est.ups.edu.ec

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 a ahorros considerables en tiempo, materiales y mano de obra conocido como cubiertas planas autoportantes, remplazando de esta manera el uso de naves industriales tradicionales que utilizan elementos transversales para apoyar la cubierta [1].

Uno de los puntos principales dentro del comportamiento de una cubierta plana autoportante, son los soportes de fijación que constituyen un elemento estructural, con una forma igual a la onda presente en la geometría de la lámina. Cada uno de estos soportes de fijación sirven como nexo entre la cubierta plana autoportante y las vigas laterales, mediante la utilización de pernos galvanizados [1] [2]. Adicionalmente, los soportes de fijación son componentes esenciales en el análisis, debido a que es el responsable de transmitir las cargas que recibe de la cubierta a las vigas laterales. Cabe destacar que el traslape entre láminas se unen entre sí mediante pernos de acero galvanizado aplicados a cada metro, lo que permite solidificar el conjunto autoportante y evitar la apertura en los traslapes de cada lámina [1].

Observando la poca investigación que existe respecto al comportamiento de una cubierta plana autoportante, surge esta investigación con el interés de conocer cuál es su comportamiento real al estar sometido a diferentes estados de carga que se encuentran en su entorno, comprobando cada una de las variables de diseño establecidos en los catálogos, para posteriormente estudiar nuevos parámetros que determinen un comportamiento apropiado de la cubierta plana autoportante. Para ello se empleará un programa basado en elementos finitos, que básicamente permitirá dividir la lámina autoportante en un número finito de componentes, lo que lo convertirá en un problema discreto. Con la llegada de los ordenadores, los problemas discretos pueden resolverse generalmente sin dificultad, aún cuando el número de elementos sea elevado [3].

El desarrollo de una simulación correcta requiere de una selección cuidadosa de las propiedades mecánicas y del tipo de recubrimiento del metal base, de las cuales está conformada una cubierta autoportante, debido a que estas generarán un impacto significativo en los resultados, es posible que el uso de información del mercado nacional no sea suficiente para complementar una ficha técnica correcta. Por ello, es necesario una investigación del mercado internacional.

2. Materiales y Métodos

Con el fin de evitar un consumo excesivo e innecesario de recursos tecnológicos, se originaron modelos de pórticos con una configuración lo más regular posible y una geometría de la lámina con sus respectivas propiedades, mediante la aplicación de un programa de diseño estructural como también de un programa de diseño basado en elementos finitos, como son Sap2000 y ANSYS Workbench.

2.1. Configuración estructural

2.1.1. Modelo general de la estructura

Para lograr valores adecuados dentro de esta investigación, es importante conocer la configuración, resistencia y rigidez de los materiales que conformarán el sistema estructural estudiado [4]. De manera que fue necesario establecer una nave industrial con dimensiones que podrían ser empleadas dentro de un proyecto real, pero con la diferencia de que los elementos transversales son sustituidos por la cubierta plana autoportante.

La norma chilena NCh 1079 [5], en su apartado 5 define las características climáticas donde una cubierta plana de pendiente 5% resulta apropiada su utilización, siendo estas en un clima dominante marítimo, nubosidad, humedad que se disipa al medio día y lluvias débiles.

El concepto de una cubierta plana establece un único plano de inclinación y de igual forma su pendiente máxima no debe ser mayor al 5%. Este límite resulta adecuado cuando su propósito es la implementación de aparatos e instalaciones sobre la cubierta, mantenimiento y una evacuación de aguas lluvias para conducirla a su respectivo canal [6].

En consecuencia, se estableció 4 modelos de análisis con una profundidad de 12 metros en sus pórticos laterales, una altura mínima de columna de 6 metros y una pendiente del 5%, tal como se observa en las Figuras 1 y 2.

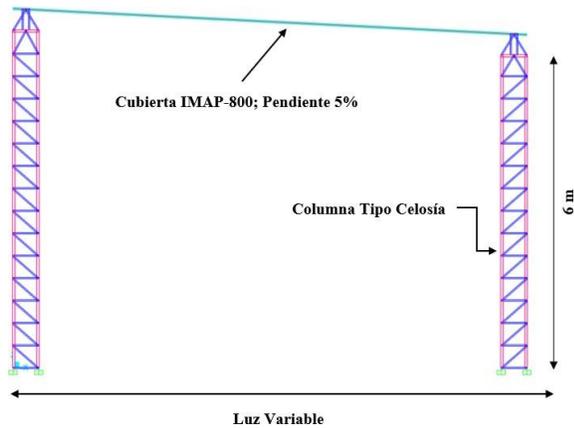


Figura 1. Vista frontal pórtico referencial.

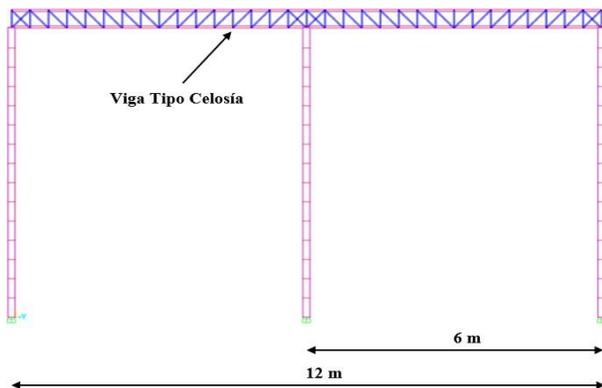


Figura 2. Vista lateral pórtico referencial.

El primer modelo se estableció con una luz de 10 metros y una altura máxima de columna de 6.50 metros. Figura 3.

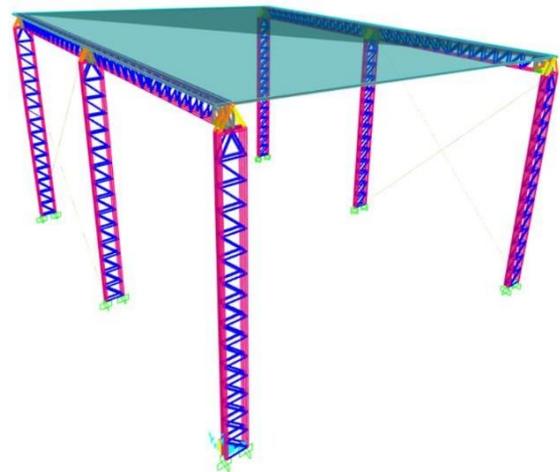


Figura 3. Pórtico de luz 10 metros modelado en SAP200.

Para el segundo modelo se empleó una luz de 20 metros y una altura máxima de columna de 6.70 metros. Figura 4.

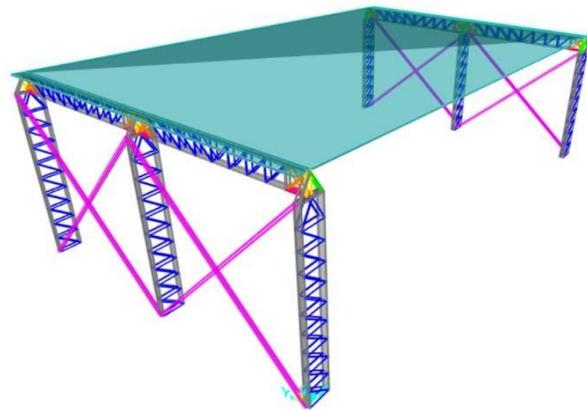


Figura 4. Pórtico de luz 20 metros modelado en SAP200.

Para el tercer modelo estableció una luz de 30 metros y una altura máxima de columna de 7.45 metros. Figura 5.

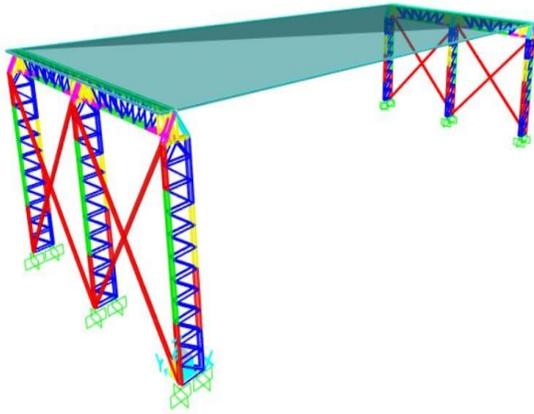


Figura 5. Pórtico de luz 30 metros modelado en SAP200.

Para el cuarto modelo se empleó una luz de 40 metros y una altura máxima de columna de 7.95 metros. Figura 6.

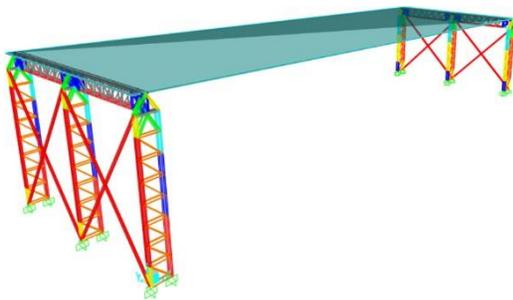


Figura 6. Pórtico de luz 40 metros modelado en SAP200. [32]

2.1.2. Características geométricas cubierta autoportante

Una de las principales características de las cubiertas planas autoportantes es tener una sección transversal en forma de omega. Por tal motivo, en esta investigación se hará uso de las láminas conocidas como IMA-P-800 [7], cuya característica principal son sus curvaturas, las cuales son realizadas mediante embuticiones como se observa en la Figura 7, lo que genera que su tipo de junta entre láminas sea una unión traslapada.

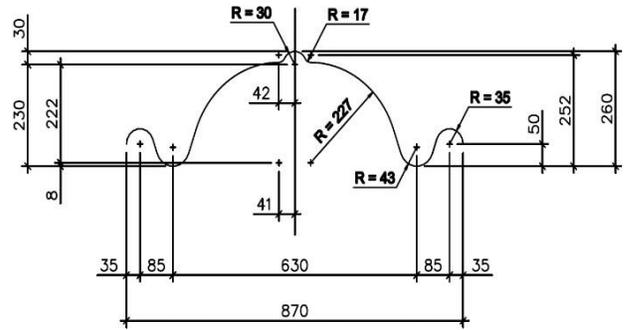


Figura 7. Sección transversal IMA-P-800. [7]

Para cubrir la profundidad de 12 metros de cada uno de los pórticos, se toma en consideración el ancho útil de la lámina que es igual a 0.80 metros. De manera que, la cantidad de láminas necesarias para cubrir dicha profundidad es igual a 15 unidades. Figura 8.

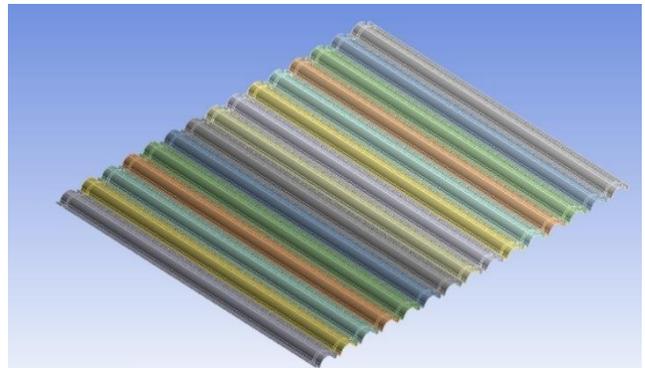


Figura 8. Quince láminas autoportantes empleadas para cubrir 12 metros de profundidad.

Los catálogos establecen un espesor recomendado para salvar una luz determinada, la cual está en función de las características de una bobina de acero galvanizada con diferentes espesores, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Espesores recomendados para cubiertas planas autoportantes [7].

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

^aNo se encuentra establecidos en catálogos para cubiertas planas.

Al no existir un espesor recomendado para luces de 30 y 40 metros, se hace uso de proveedores de bobinas de acero galvanizadas con espesores mayores, llegando a obtener un espesor máximo de 5 mm [8].

2.1.3. Soporte de fijación (caballete)

El soporte de fijación que conecta la cubierta plana autoportante con las vigas laterales 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, el cual se encuentra empernado a la cubierta y soldada al patín superior de la viga lateral como se observa en la Figura 9.

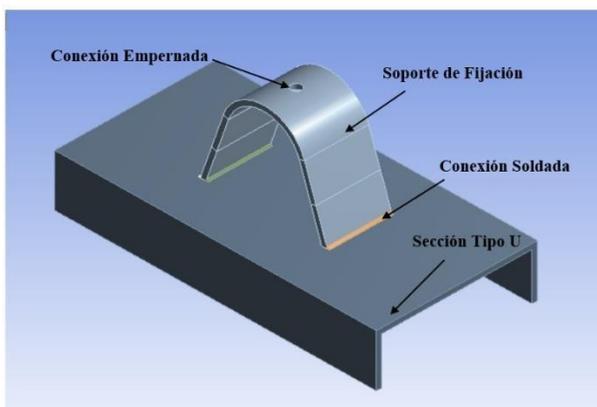


Figura 9. Soporte de fijación (caballete).

Los pernos utilizados para este tipo de cubiertas son

1.6 mm (1/16 plg) al ancho real de los agujeros [7] [9]. Dentro de la norma ANSI/AISC 360-16 [10], establece una distancia mínima entre centros de

perforaciones igual a 2.67 veces el diámetro, una distancia mínima al borde no menor a 22 mm y una distancia máxima que no debe exceder los 150 mm al borde [10].

2.2. Propiedades de materiales empleados

2.2.1. Propiedades de los elementos laminados en caliente y conformados en frío

Es claro mencionar que la configuración de las vigas laterales y columnas serán tipo celosía. Por ende, dentro de la variedad de perfiles existentes, se consideró angulares L laminados en caliente de lados iguales, con el fin de utilizarlos para el diseño de las diagonales, en base a la norma del Instituto Americano de la Construcción en Acero, AISC [10]. De igual forma para el diseño de los cordones tanto externos como internos, se utilizó canales con sección tipo U conformados en frío, en el cual el diseño se rige por la norma de Instituto Americano del Hierro y el Acero [11].

Se dispone de manuales actualizados de perfiles nacionales para el diseño de las secciones armadas (vigas y columnas) [12] [13], con el objetivo de conocer las características de los perfiles que se comercializan localmente y si éstos satisfacen la relación demanda/capacidad de cada modelo. De modo que se pudo obtener las principales propiedades de diseño tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades adoptadas de aceros estructurales.

Descripción	Laminados en caliente	Conformados en frío
Densidad [kg/m ³]	7850	7850
Módulo de young [MPa]	200000	203000
Coefficiente de poisson	0,3	0,3
principalmente de calidad ASTM A325		con un

Esfuerzo de fluencia [MPa]
Resistencia a la tracción [MPa]

250^a
75^b

2

460^a

3

60^b

diámetro mínimo de 8 mm (5/16 plg). Al momento de ranurar los agujeros la práctica usual es añadir

^a Valores adoptados de la norma INEN 2215 [14].

^b Valores adoptados de la norma INEN 1623 [15].

2.2.2. Propiedades mecánicas y de recubrimiento de la cubierta autoportante

El material empleado en las cubiertas autoportantes son láminas de acero recubiertas con zinc (galvanizadas) por inmersión en caliente, el cual deja una gruesa capa gris en sus dos caras [16].

En la Tabla 3, se presenta un resumen de sus principales propiedades, aunque dichos productos son clasificados como calidad comercial, sus propiedades mecánicas se encuentran clasificadas como calidad estructural. La norma NTE INEN 2492 [16] establece que no es obligatorio que se cumpla con los valores de propiedades mecánicas establecidos para un acero de calidad comercial, de esta manera el comprador puede exigir un rango específico o más restringido para la aplicación [16].

Tabla 3: Ficha técnica acero recubierto con zinc.

Descripción	IMAP-800
Designación recubrimiento	Z275 - G90
Recubrimiento ambas caras [g/m ²]	275
Densidad [kg/m ³]	7850
Módulo de young [MPa]	200000
Coefficiente de poisson	0,3
Módulo bulk [MPa]	167000
Módulo de corte [MPa]	76900
Esfuerzo de fluencia [MPa]	380 ^a
Resistencia a la tracción [MPa]	480 ^a

^a Valores de calidad estructural.

2.2.3. Propiedades mecánicas del soporte de fijación

Como se mencionó anteriormente el soporte se caracteriza por ser una platina de acero al carbono con designación ASTM A36, por lo cual, sus características de fluencia se encuentran en los 250 MPa, pero debido a que la conexión es mediante pernos, los esfuerzos de tracción y corte rigen el diseño, por tal motivo se tiene en cuenta la resistencia a la tracción cuyo valor se encuentra en los 460 MPa [14].

La conexión con la viga lateral, se lo realiza mediante el proceso de soldadura de arco metálico con gas (GMAW) Figura 10, el arco se produce con la ayuda de un alambre sólido de acero al carbono con manganeso y silicio con protección superficial de cobre [17]. Las propiedades mecánicas de la soldadura se encuentran dentro de la norma AWS A5.18 [18], con un esfuerzo de fluencia de 400 MPa y una resistencia a la tracción igual a 480 MPa

[18].



Figura 10. Conexión soldada entre el soporte de fijación y la viga lateral [19].

2.3. Cargas estructurales

2.3.1. Carga muerta

En este caso se considerará carga muerta, el peso propio de la cubierta y de cada uno de los perfiles empleados para la conformación de las vigas y columnas.

2.3.2. Sobrecarga de cubierta

La carga sobre la cubierta establecida para este caso es de 0.70 kN/m², la cual es una carga producida durante la instalación y el mantenimiento durante la vida útil de la estructura [20] [21].

2.3.3. Carga de viento

La cubierta plana autoportante se caracteriza por tener un solo plano de inclinación, y la acción del viento se presenta perpendicularmente a la

superficie, por lo que las cargas determinadas son aplicadas en dos direcciones, generando presión y succión en la cubierta, como se observa en las Figuras 11 y 12.

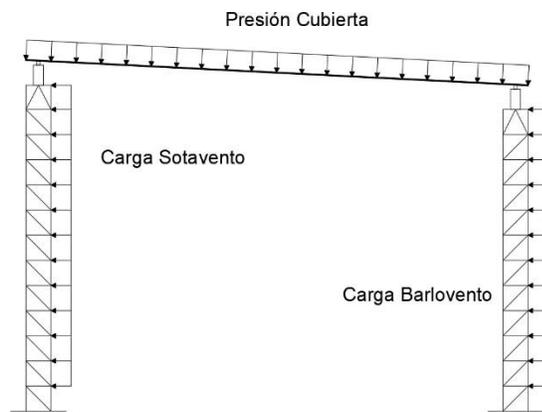
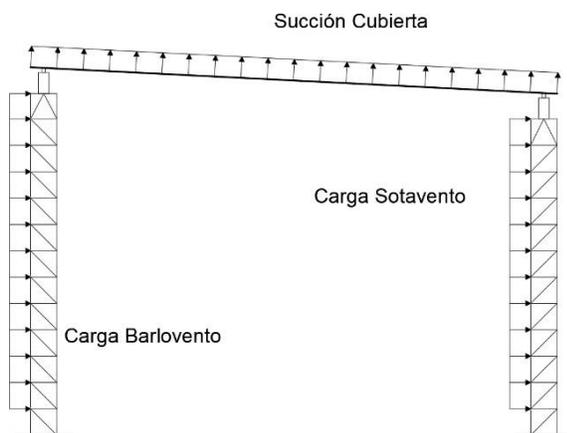


Figura 11. Aplicación de la carga viento con presión en la cubierta.



Los parámetros necesarios para determinar la presión en cada uno de los pórticos, se encuentra 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. Tabla 4 [22].

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

Descripción	Parámetros presión de viento
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 ²]	18.79 ^a
Presión sotavento [kg/m ²]	-9.39 ^a
Presión cubierta [kg/m ²]	±18.79 ^a

Figura 12. Aplicación de la carga viento con succión en la cubierta.

^a Valores para los pórticos 10, 20, 30 y 40 metros.

2.3.4. Carga por granizo

Al establecer una pendiente igual al 5%, se considera una acumulación de granizo de alrededor de 5 cm de espesor, con un valor de carga igual a 0.50 kN/m² [20].

2.3.5. Carga sísmica

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, peligro sísmico NEC-SE-DS [23], establece los parámetros necesarios para determinar un coeficiente de cortante basal mediante el método estático equivalente como se observa en la Tabla 5, que están en función de la zona sísmica, el tipo de suelo

y características geométricas de la estructura [23][24].

Tabla 5: Factores empleados para la carga sísmica.

Descripción	Parámetros presión de viento
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	1
Factor de regularidad en planta	1
Coefficiente de cortante basal	0.476

2.4. Diseño para estados límites últimos

Dentro de la investigación se hará uso del método de diseño plástico LRFD (Load and Resistance Factor Design), el cual considera diversas combinaciones de carga, actuando separadamente con el máximo valor esperado en la vida útil de la construcción [25].

Nuestra norma nacional NEC-SE-CG, establece varias combinaciones de carga para el diseño por

última resistencia, tal como se observa en la Tabla 6 [20].

Tabla 6: Combinaciones diseño por última resistencia.

Descripción	Combinación
Combinación 1	1.4D
Combinación 2	1.2D+1.6L+0.5max[Lr ; S ;R]
Combinación 3	1.2D+1.6max[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

2.5. Diseño por condiciones de servicio

El objetivo de utilizar los estados límites de servicio en el diseño de la cubierta autoportante, es de asegurar un normal funcionamiento durante la instalación de las láminas y el confort de sus ocupantes durante la vida útil de la estructura [25]. Para ello se hace uso de una combinación, donde se encuentra involucrada la carga muerta de la estructura (D) y una sobrecarga de cubierta (Lr), dicha sobrecarga no es más que el efecto que puede tener durante la instalación y posteriormente el mantenimiento de la cubierta.

Dentro del reglamento ASCE/SEI 7-16 [21] indica, en su apéndice C: recomendaciones para las condiciones de serviciabilidad, menciona 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 considera conveniente utilizar una deflexión máxima de $L/200$, para evitar problemas que puedan comprometer su funcionamiento.

2.6. Valores de factores de resistencia

Luego de conocer las propiedades tanto de la lámina autoportante como también de la junta de conexión, se tomará en cuenta un factor de resistencia que no es más que tomar en cuenta las incertidumbres en la resistencia de los materiales, en las dimensiones de los elementos, en la mano de

obra y en la aproximación de las teorías de análisis [26].

El comportamiento de una cubierta plana autoportante es de un miembro sometido a flexión, por lo que su estado límite principalmente se encuentra al llegar a la fluencia, teniendo claro esto, su factor de resistencia será de 0.90 [25].

La junta de conexión al ser un elemento que se va a encontrar atornillado, su comportamiento principalmente se encuentra a corte y tracción, por consiguiente, el factor de resistencia a tomar es de 0.75 [25].

La conexión del soporte de fijación con la viga lateral es realizada mediante una junta soldada, con soldadura de filete que se encuentra sometida a tracción, compresión y corte, con un factor de resistencia igual a 0.75 [25].

2.7. Contacto entre láminas

Al momento de la modelación se genera una junta traslapada entre láminas, por lo cual es necesario dejar una separación entre láminas igual al espesor adoptado, de tal manera que se genere un tipo de contacto sin penetración, como se puede observar en la Figura 13.

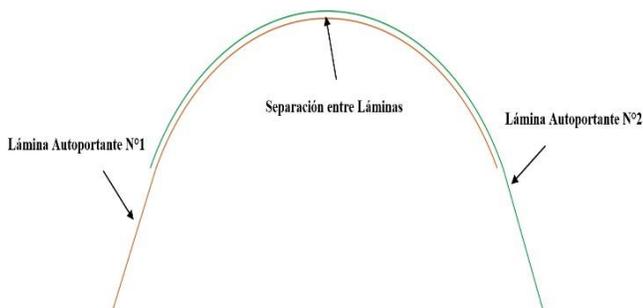


Figura 13. Traslape entre láminas autoportantes.

El tipo de contacto se puede volver un problema lineal o no lineal, lo que es muy importante entender cuál será el contacto que se asemeje al problema en la realidad, esto dependerá de las cargas aplicadas, el material y las condiciones del contorno [27].

Si observamos el proceso de instalación de la cubierta, nos daremos cuenta de que el traslape entre láminas aparte de estar conectado al caballete,

también se encuentra a lo largo de todo el vano, colocando pernos cada metro como se observa en la Figura 14.

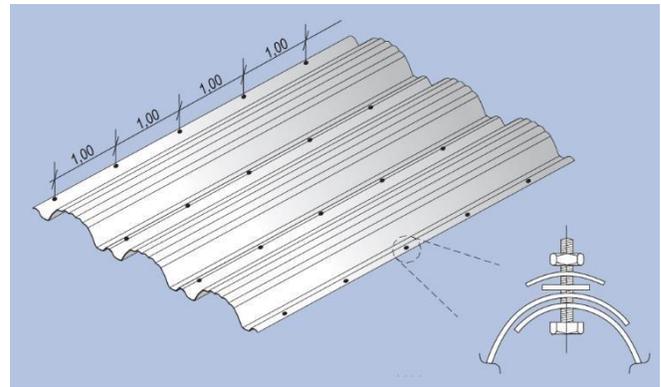


Figura 14. Fijación entre láminas. [7]

Considerando las características del traslape se adoptó un contacto adherido (bonded) como se observa en la Figura 15, lo que significa que se encuentra restringido en el sentido normal a la cubierta y no permite la separación en el sentido radial y tangencial.

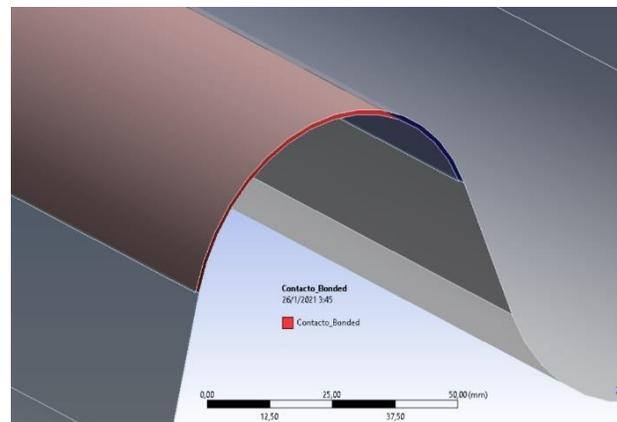


Figura 15. Contacto tipo bonded (programa ANSYS Workbench).

2.8. Condiciones de borde

Conociendo que el contacto entre el caballete y la cubierta autoportante es empernado 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 [28], bajo esta premisa, se impuso las siguientes condiciones de borde:

- En el contacto entre la cubierta y el caballete se estableció un apoyo simple, esto quiere decir una restricción en el sentido normal al contacto y un desplazamiento impedido en Z, pero una libre rotación en sus extremos.
- Los pernos establecen otro tipo de restricción, siendo estos desplazamientos impedidos en X, Y y Z.

Como se puede observar en la Figura 16, las condiciones de borde establecidas en el programa fueron 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; y un soporte tipo desplazamiento (displacement), en el cual se especificó la restricción en el sentido Z, los pernos tuvieron el mismo soporte con la única diferencia que fueron restringidos en los tres sentidos del plano global (X,Y,Z) [29].

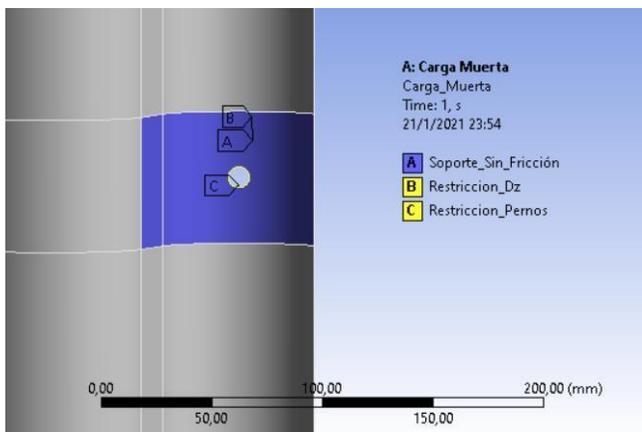


Figura 16. Condiciones de borde adoptados (programa ANSYS Workbench).

2.9. Medidas de calidad de mado

Las diferentes estadísticas de calidad de malla que se presentan en un programa de elementos finitos, es una buena manera de conocer el estado actual de una malla, a simple viste se puede observar que un cuerpo se discretiza con elementos simétricos, pero observando muchas veces las métricas no llegan a cumplir con los parámetros mínimos. Una manera

rápida y fácil de comprobar es mirar la calidad ortogonal mínima que sea mayor a 0.15 y su asimetría máxima menor a 0.97, como se observa en la Figura 17 [29].

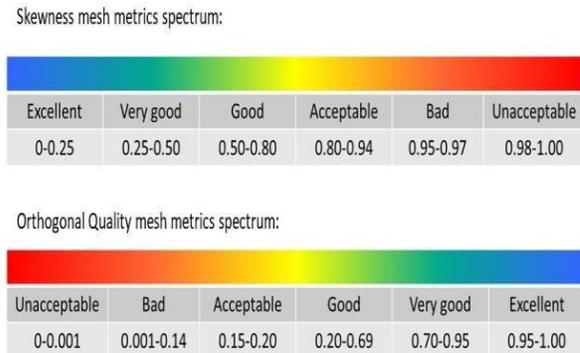


Figura 17. Valores permisibles de calidad de malla. [30]

2.10. Modelo matemático del método de elementos finitos

Lograr la funcionalidad, seguridad y confiabilidad es el propósito principal de una simulación en elementos finitos. Los desplazamientos generalmente se relacionan con la funcionalidad de la estructura, mientras que el esfuerzo con la seguridad y confiabilidad. Estos parámetros se pueden resumir mediante las siguientes ecuaciones:

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

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad r_{xy} \quad r_{yz} \quad r_{zx}\} \quad (2)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}\} \quad (3)$$

Siendo, $\{u\}$ el vector de desplazamientos, $\{\sigma\}$ los esfuerzos normales, $\{r\}$ esfuerzos tangenciales, $\{\varepsilon\}$ deformaciones unitarias y $\{\gamma\}$ rotaciones [29].

2.10.1. Teoría de Von Mises para materiales dúctiles

Richard Von Mises propuso una teoría para predecir el rendimiento de los materiales dúctiles, llegando a determinar una ecuación equivalente para los esfuerzos y las deformaciones [29].

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

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

Donde ν' , 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 autoportante.

3. Resultados y Discusión

Se llevó a cabo una simulación, lámina por lámina hasta generar la cubierta completa, que en este caso el ancho útil de cada lámina es de 0.80 m, lo que originó el uso de 15 láminas para completar los 12 metros de profundidad de cada uno de los pórticos.

3.1 Simulación de la cubierta plana autoportante

3.1.1. Métricas de calidad de malla

Cabe mencionar que antes de discretizar la cubierta autoportante en elementos finitos, lo principal es establecer qué tipo de estructura podríamos adoptar, esto quiere decir, si sería conveniente usar cuerpos superficiales o cuerpos sólidos. Para esta investigación la utilización de cuerpos superficiales es el más adecuado, dado que los espesores son demasiado pequeños para emplear un cuerpo sólido, lo que generaría problemas al mallar un elemento muy delgado.

Luego de haber establecido el tipo de estructura a emplear, es necesario conocer el tipo de elemento en el que se va a discretizar la cubierta autoportante, ya que de esto depende la capacidad y el tiempo que la computadora necesita para realizar una simulación. Los cuerpos superficiales se rigen por 2 tipos de elementos, siendo los cuadriláteros y los triangulares [29].

Verificando los parámetros estadísticos de la Tabla 7, el mallado con elementos cuadriláteros y triangulares, comprenden valores en su asimetría máxima menores a 0.97 y valores mayores a 0.15

de generar un mallado en el menor tiempo posible, sin lugar a duda es un mallado cuadrilátero.

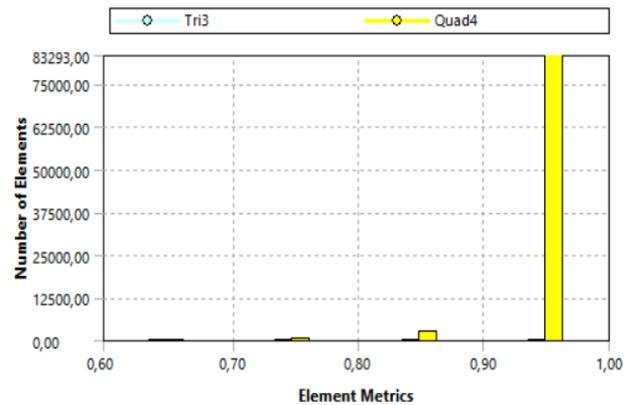
Tabla 7: Resumen de los parámetros estadísticos cubierta.

Descripción	Cuadriláteros	Triangulares
Tiempo [min]	0:11	1:10
Número de Nodos	83617	108779
Elementos	82618	215520
	Skewness	
Máximo	0,585	0,575
Mínimo	1,331E-04	1,147E-03
Promedio	0,0887	0,263
	Orthogonal Quality	
Máximo	1	0,999
Mínimo	0,699	0,607
Promedio	0,982	0,819

en su calidad ortogonal, no obstante, la capacidad

Claramente el uso de una malla fina con elementos cuadriláteros en la parte superior y en los extremos de la lámina, permite tener una mejor distribución en la simetría de los elementos como se muestra en las Figuras 18 y 19, esto quiere decir que la mayoría de los elementos están cerca de una cara ideal, y esto se contrasta de manera visual como se muestra en la Figura 20.

Figura 18. Diagrama de barras (orthogonal quality) de una malla con elementos cuadriláteros (programa ANSYS Workbench).



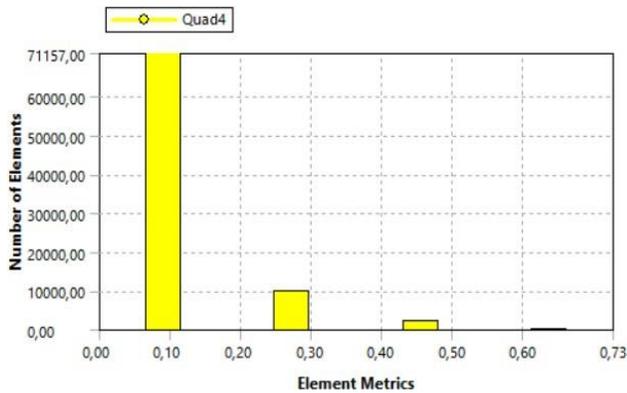


Figura 19. Diagrama de barras (skewness) de una malla con elementos cuadriláteros (programa ANSYS Workbench).

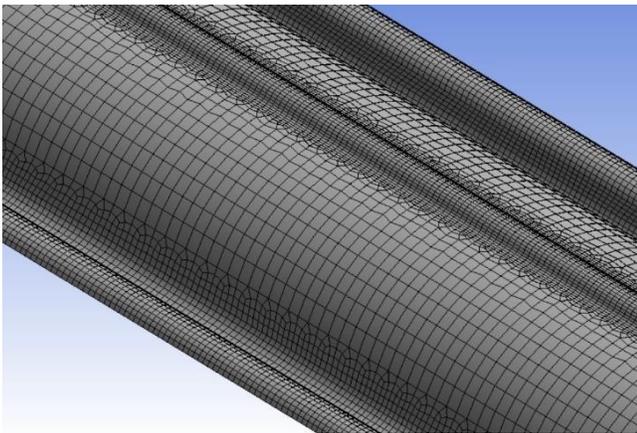


Figura 20. Mallado generado con elementos cuadriláteros (programa ANSYS Workbench).

3.1.2. Esfuerzos y desplazamientos máximos encontrados

La generación de los mayores esfuerzos como era de esperarse se produjo cerca de las conexiones, viéndose afectada principalmente las perforaciones de la lámina. Se conoce que el esfuerzo límite en la lámina es el de fluencia, el cual es de 380 MPa, y se considera un factor de resistencia de 0.90. Por tanto, ningún valor de esfuerzo debe superar los 342 MPa.

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. 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. En la

Tabla 8 se muestra un resumen de los parámetros utilizados y valores obtenidos.

Tabla 8: Espesores, esfuerzos y desplazamientos en la cubierta plana.

Luz [m]	Espesor catálogo [mm]	Espesor final [mm]	Nº perfor ^b	Esfuerzo máximo [MPa]	Desplaz. máximo [mm]
10	0,95	0,95	1	313,43	29,007
20	1,55	1,95	3	330,19	89,273
30	- ^a	3	4	313,43	139,14
40	- ^a	3,5	5	283,41	123,31

^aNo se encuentra establecidos en catálogos

^bNúmero de perforaciones en los soportes

Cubierta luz 10 m: Se utilizó una sola perforación en cada soporte con un diámetro de 9.5 mm (3/8 plg) y una separación entre el centro de la perforación al borde más cercano de 30 mm, como se muestra en la Figura 21. Graficando los esfuerzos máximos en cada lámina, se observa un esfuerzo máximo de 313.43 MPa a partir de la segunda lámina como se detalla en la Figura 22. Observando su comportamiento en la Figura 23.

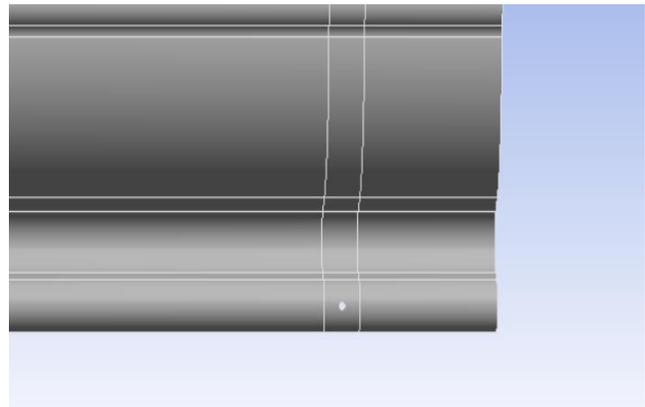


Figura 21. Perforación en la lámina 10 m (programa ANSYS Workbench).

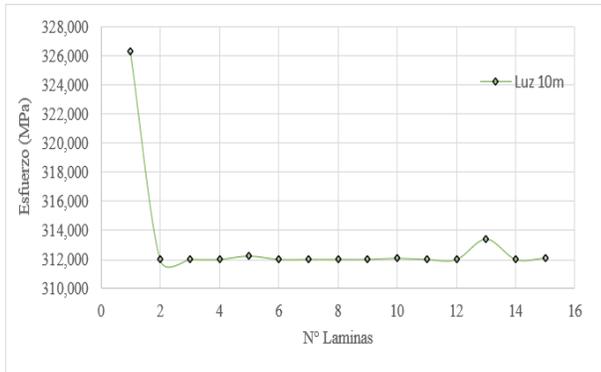


Figura 22. Gráfica esfuerzos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 10 m.

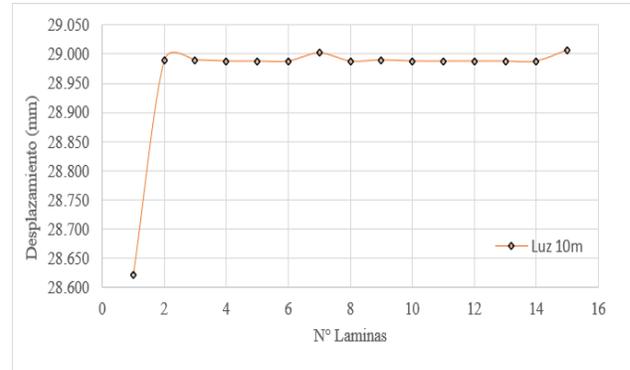


Figura 24. Gráfica desplazamientos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 10 m.

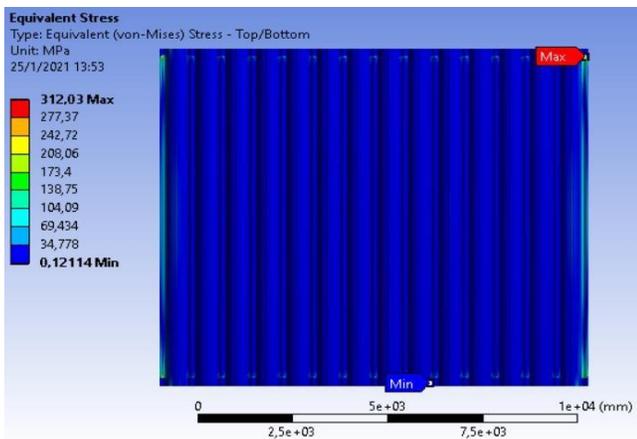


Figura 23. Esfuerzos máximos cubierta luz 10 m (programa ANSYS Workbench).

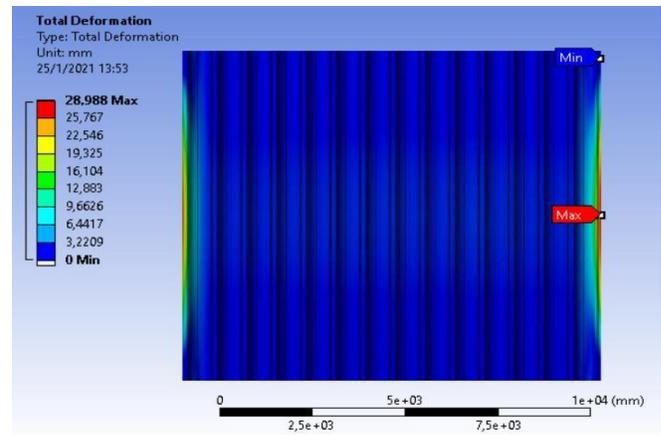


Figura 25. Desplazamientos máximos cubierta luz 10 m (programa ANSYS Workbench).

En la Figura 24 se observa una estabilidad en sus desplazamientos a partir de la segunda lámina, alcanzando un desplazamiento máximo de 29.00 mm. Logrando los mayores desplazamientos en el centro de la luz como se muestra en la Figura 25.

Cubierta luz 20 m: Se utilizó 3 perforaciones en cada soporte con un diámetro de 11.11 mm (7/16 plg), una separación entre el centro de la perforación al borde más cercano de 40 mm y una distancia entre centros de perforaciones de 40mm, como se muestra en la Figura 26. Graficando los esfuerzos máximos en cada lámina, se observa un esfuerzo máximo de 330.19 MPa a partir de la segunda lámina como se detalla en la Figura 27. Observando su comportamiento en la Figura 28.

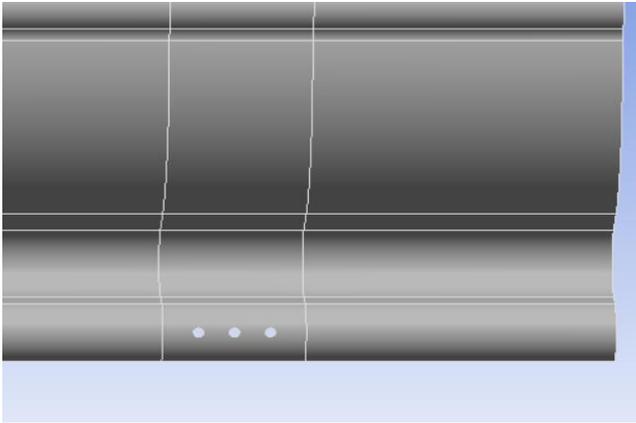


Figura 26. Perforación en la lámina 20 m (programa ANSYS Workbench).

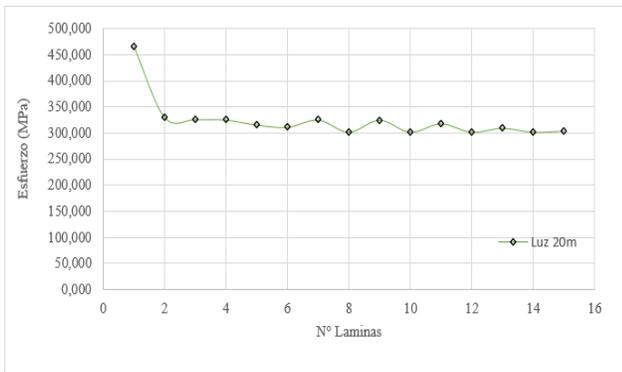


Figura 27. Gráfica esfuerzos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 20 m.

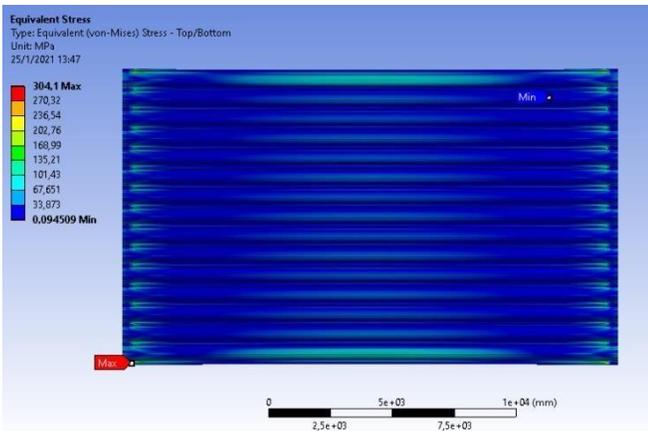


Figura 28. Esfuerzos máximos cubierta luz 20 m (programa ANSYS Workbench).

En la Figura 29 se observa una estabilidad en sus desplazamientos a partir de la segunda lámina,

alcanzando un desplazamiento máximo de 89.273 mm. Logrando los mayores desplazamientos en el centro de la luz como se muestra en la Figura 30.

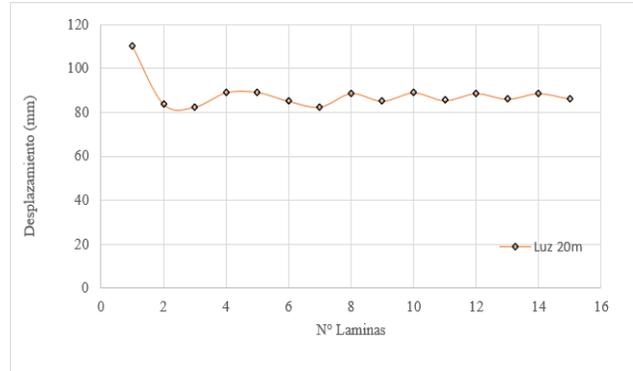


Figura 29. Gráfica desplazamientos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 20 m.

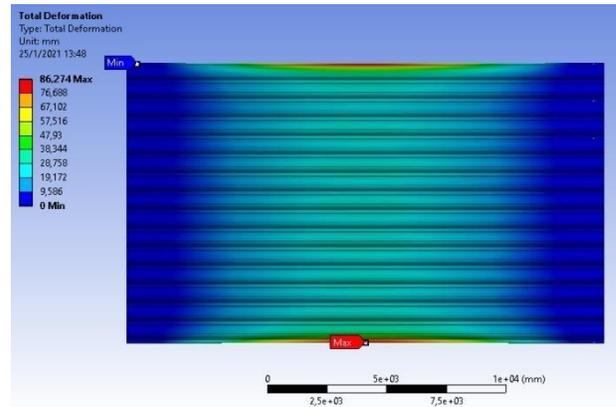


Figura 30. Desplazamientos máximos cubierta luz 20 m (programa ANSYS Workbench).

Cubierta luz 30 m: Se utilizó 4 perforaciones en cada soporte con un diámetro de 12.7 mm (1/2 plg), una separación entre el centro de la perforación al borde más cercano de 40 mm y una distancia entre centros de perforaciones de 40mm como se muestra en la Figura 31. Graficando los esfuerzos máximos en cada lámina, se observa un esfuerzo máximo de 313.43 MPa a partir de la segunda lámina como se detalla en la Figura 32. Observando su comportamiento en la Figura 33.

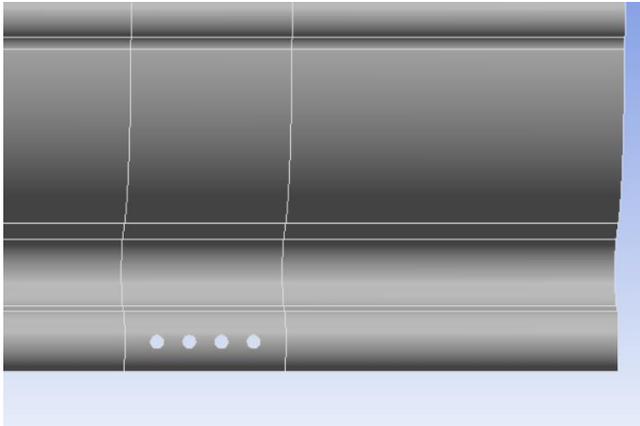


Figura 31. Perforación en la lámina 30 m (programa ANSYS Workbench).

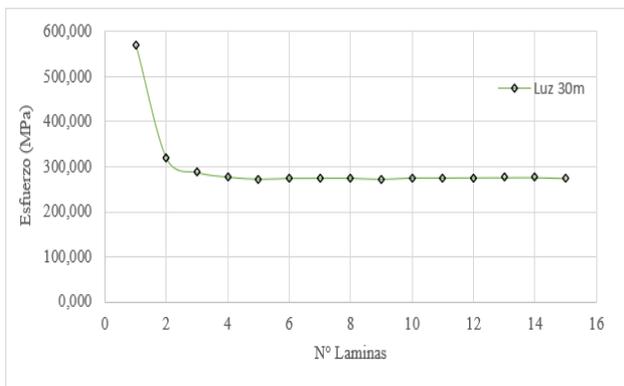


Figura 32. Gráfica esfuerzos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 30 m.

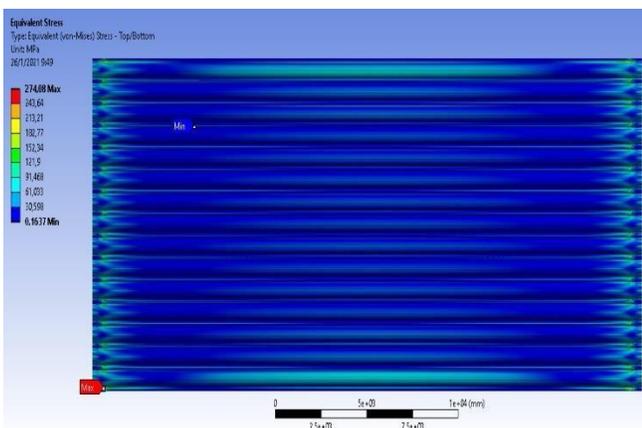


Figura 33. Esfuerzos máximos cubierta luz 30 m (programa ANSYS Workbench).

En la Figura 34 se observa una estabilidad en sus desplazamientos a partir de la segunda lámina,

alcanzando un desplazamiento máximo de 139.140 mm. Logrando los mayores desplazamientos en el centro de la luz como se muestra en la Figura 35.

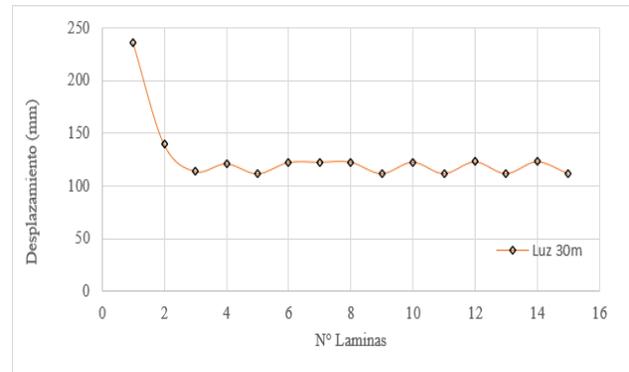


Figura 34. Gráfica desplazamientos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 30 m.

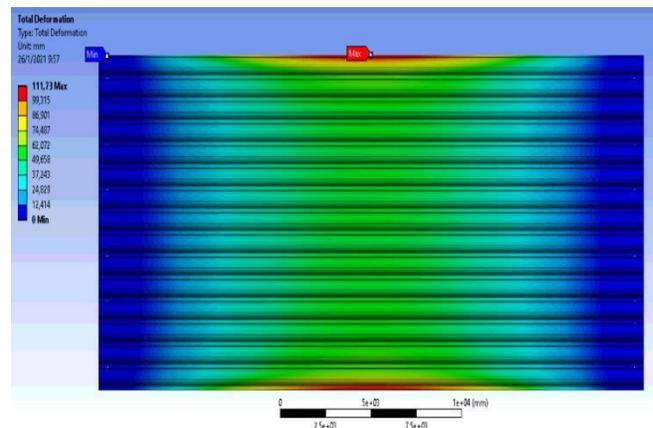


Figura 35. Desplazamientos máximos cubierta luz 30 m (programa ANSYS Workbench).

Cubierta luz 40 m: Se utilizó 5 perforaciones en cada soporte con un diámetro de 9.5 mm (3/8 plg), una separación entre el centro de la perforación al borde más cercano de 40 mm y una distancia entre centros de perforaciones de 40mm como se muestra en la Figura 36. Graficando los esfuerzos máximos en cada lámina, se observa un esfuerzo máximo de 283.41 MPa a partir de la segunda lámina como se detalla en la Figura 37. Observando su comportamiento en la Figura 38.

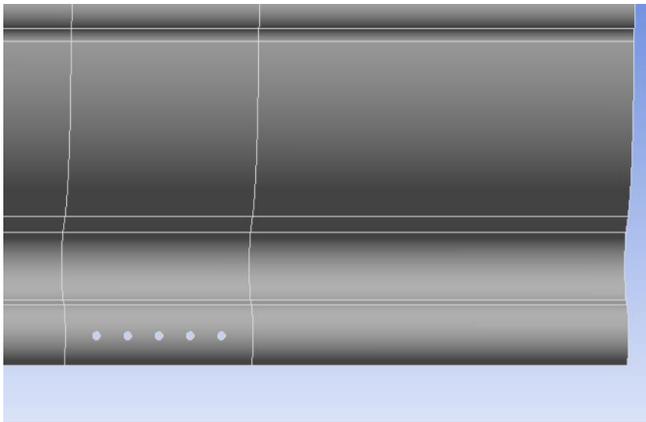


Figura 36. Perforación en la lámina 40 m (programa ANSYS Workbench).

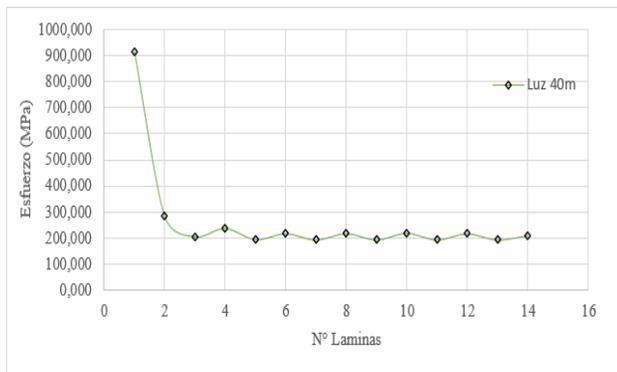


Figura 37. Gráfica esfuerzos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 40 m.

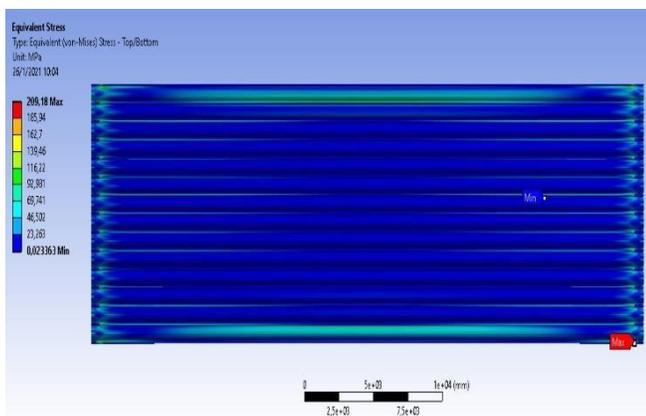


Figura 38. Esfuerzos máximos cubierta luz 40 m (programa ANSYS Workbench).

En la Figura 39 se observa una estabilidad en sus desplazamientos a partir de la segunda lámina,

alcanzando un desplazamiento máximo de 123.31 mm. Logrando los mayores desplazamientos en el centro de la luz como se muestra en la Figura 40.

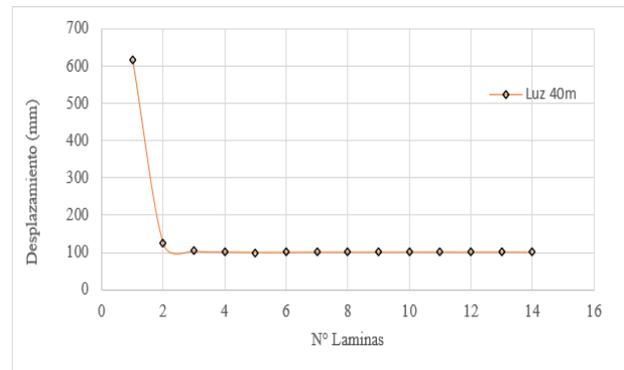


Figura 39. Gráfica desplazamientos máximos con respecto al número de láminas cubierta luz 40 m.

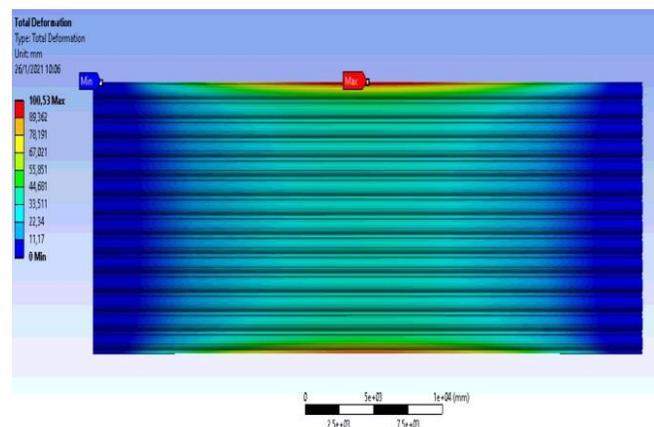


Figura 40. Desplazamientos máximos cubierta luz 40 m (programa ANSYS Workbench).

3.2 Simulación del soporte de fijación

Para el soporte de fijación, la investigación se centra en analizar y comparar los resultados encontrados en un soporte de fijación sin la presencia de la viga lateral con relación a un soporte de fijación donde se encuentra presente una conexión soldada a su viga lateral, mediante la aplicación de las reacciones generadas del análisis a las cubiertas planas autoportantes.

3.2.1. Métricas de calidad de malla caballete

Al contrario de la cubierta autoportante donde se utilizó cuerpos superficiales para cada lámina, el

caballete tiene espesores más grandes que llegan hasta 20 mm, por lo cual el uso de un cuerpo sólido es ideal para esta simulación. Dentro del mallado de un cuerpo sólido los principales elementos son tridimensionales. El método para obtener elementos hexaédricos es llamado “Hex Dominat” o “Multizone”, por el contrario, para introducir elementos tetraédricos el método es “Tetrahedrons”.

El mallado con elementos tetraédricos, como se puede observar en la Figura 41, está compuesto principalmente por caras triangulares.

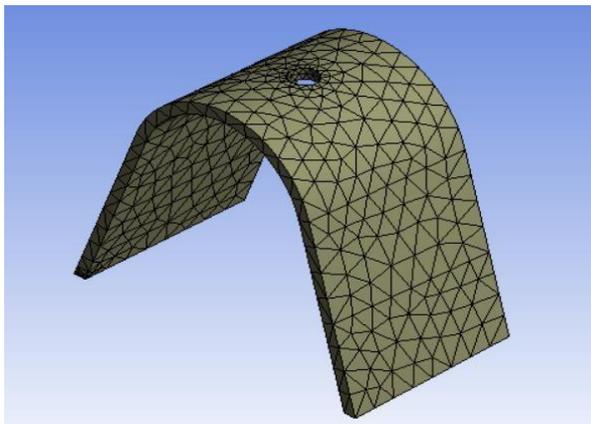
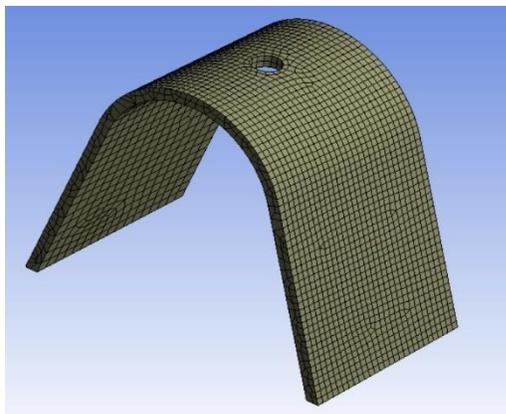


Figura 41. Mallado con elementos triangulares método Tetrahedrons (programa ANSYS Workbench).

Mientras tanto un soporte de fijación mallado con elementos hexaédricos está compuesto

principalmente por polígonos, como se puede observar en la Figura 42.



La principal diferencia con el método multizone Figura 43, es que su mallado en la parte interior está constituido mayormente por elementos irregulares que lleva a tener una mayor cantidad de elementos y en consecuencia mayor cantidad de nodos.

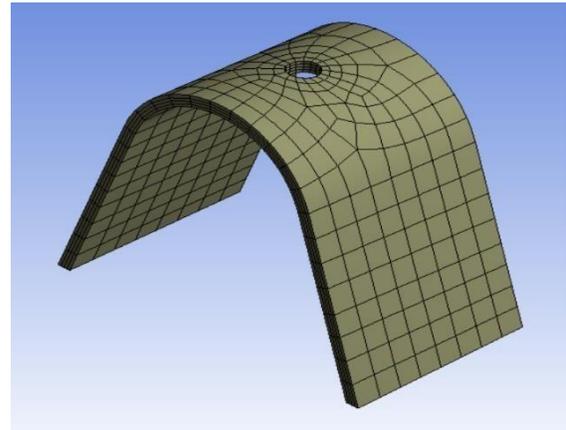


Figura 43. Mallado por el método Multizone (programa ANSYS Workbench).

En la Tabla 9 se muestra un resumen con las estadísticas de los diferentes tipos de malla establecidos.

Tabla 9: Resumen de los parámetros estadísticos caballete.

Descripción	Tetraedro	Hexaedro	MultiZone
Número de Nodos	2253	32198	4289
Número de Elementos	1031	9597	710
Skewness			
Máximo	0,998	1,000	0,516
Mínimo	0,104	0,120	1,368E-07
Promedio	0,703	0,699	0,145
Orthogonal Quality			
Máximo	0,859	0,993	1,000
Mínimo	1,684E-03	2,013E-09	0,853

Figura 42. Mallado con elementos hexaédricos método Hex Dominant (programa ANSYS Workbench).

Promedio	0,294	0,359	0,975
----------	-------	-------	-------

En esta ocasión el tiempo de ejecución no es un parámetro diferencial al momento de elegir un tipo de mallado, debido a que el caballete es un elemento que no tiene una geometría compleja. Observando las estadísticas del mallado, generado mediante elementos multizone cumple de mejor manera los parámetros necesarios presentes en la Figura 17.

3.2.2. Esfuerzos máximos en soportes de fijación sin conexión soldada a la viga lateral

Los esfuerzos máximos en los diferentes caballetes se presentan cerca de la conexión con la viga lateral. Se sabe que la resistencia a la tracción es la que rige en estos casos, su valor es igual a 460 MPa, de igual forma su factor de resistencia es igual a 0.75, por lo que el esfuerzo máximo que puede resistir el caballete es 345 MPa.

En la Tabla 10 se muestra un resumen de los parámetros adoptados durante el análisis, como también los esfuerzos máximos encontrados.

Tabla 10: Espesores, longitud caballete y esfuerzos máximos.

Luz [m]	Espesor inicial [mm]	Espesor final [mm]	Longitud caballete [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]
10	3	4	60	273,40
20	4	7	160	295,05
30	7	10	209	309,36
40	10	12	240	229,75

Caballete luz 10m: Se adoptó un espesor de 4 mm, con una longitud del caballete igual a 60 mm. Generándose un esfuerzo máximo de 273.40 MPa como se puede observar en la Figura 44.

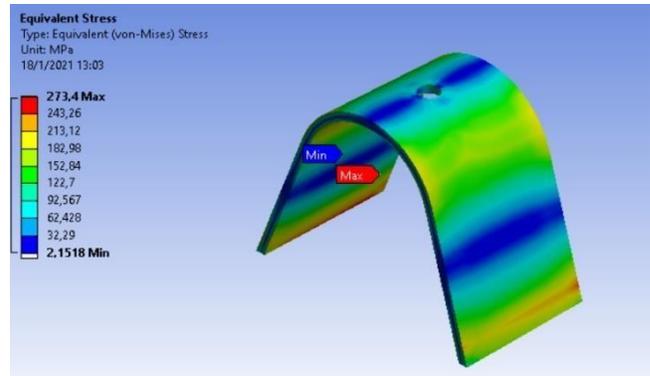


Figura 44. Esfuerzos máximos caballete de cubierta 10 m (programa ANSYS Workbench).

Caballete luz 20m: Se adoptó un espesor de 7 mm, con una longitud del caballete igual a 160 mm. Esta ocasión se plantea un caballete que no se encuentra en los catálogos con 3 perforaciones en la parte superior. Generándose un esfuerzo máximo de 295.05 MPa como se puede observar en la Figura 45.

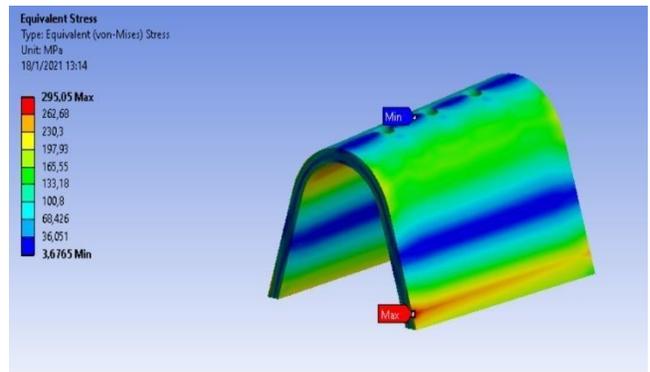


Figura 45. Esfuerzos máximos caballete de cubierta 20 m (programa ANSYS Workbench).

Caballete luz 30m: Se adoptó un espesor de 10 mm, con una longitud del caballete igual a 209 mm. En esta ocasión se plantea un caballete con 4 perforaciones en la parte superior. Generándose un esfuerzo máximo de 309.36 MPa como se puede observar en la Figura 46.

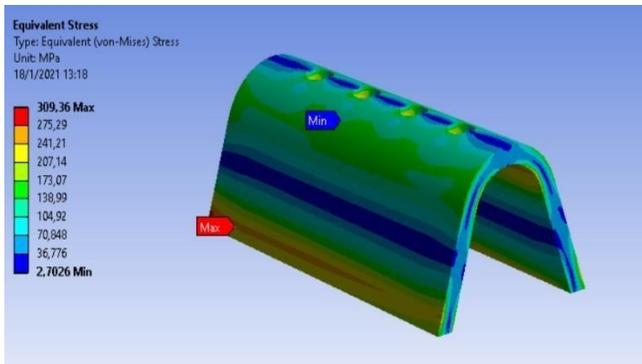


Figura 46. Esfuerzos máximos caballete de cubierta 30 m (programa ANSYS Workbench).

Caballete luz 40m: Se adoptó un espesor de 12 mm, con una longitud del caballete igual a 240 mm. En

esta ocasión se plantea un caballete con 5 perforaciones en la parte superior. Generándose un esfuerzo máximo de 229.75 MPa como se puede observar en la Figura 47.

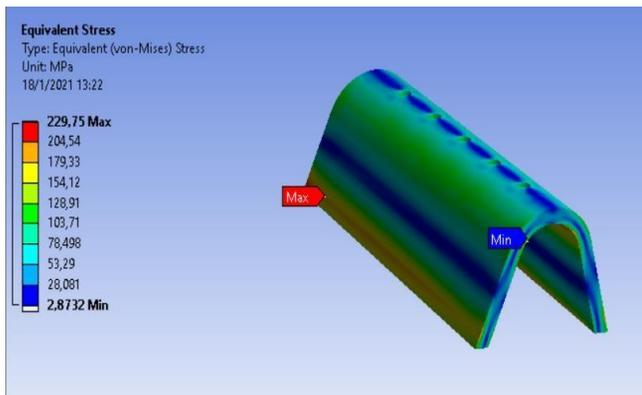


Figura 47. Esfuerzos máximos caballete de cubierta 40 m (programa ANSYS Workbench).

3.2.3. Esfuerzos máximos en soportes de fijación con conexión soldada a la viga lateral

Los esfuerzos máximos se presentan en el borde entre la soldadura y el soporte de fijación. Se conoce que la resistencia última en la soldadura es de 360 MPa, mientras que la resistencia última del caballete es de 345 MPa. 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 será igual a 345 MPa [31].

En la Tabla 11 se muestra un resumen de los parámetros adoptados durante el análisis, como también los esfuerzos máximos encontrados en la soldadura y el soporte de fijación.

Tabla 11: Espesor soldadura, secciones U y esfuerzos máximos.

Luz [m]	Espesor soldadura [mm] ^a	Sección U prediseño	Sección U final	Esfuerzo máximo [MPa]
10	3	150x50x3	150x50x5	321.26
20	5	200x50x3	200x50x6	274.83
30	5	250x60x3	250x60x8	218.32
40	5	300x80x4	300x80x8	238.18

^a Espesores mínimos adoptados de la norma ANSI/AISC 360-16 [10].

Caballete luz 10m: Se aprecia un esfuerzo máximo de 321.26 MPa, específicamente en la conexión soldada, como se puede observar en la Figura 48.

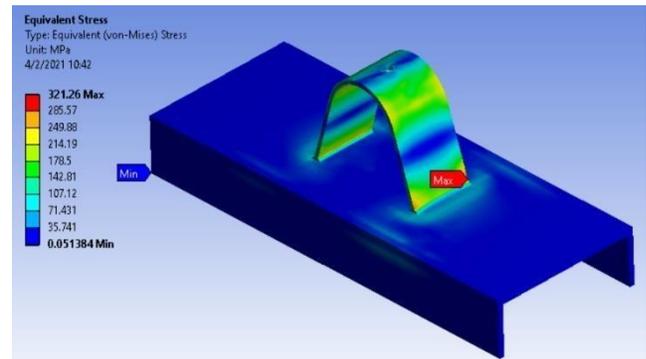


Figura 48. Esfuerzos máximos conexión tipo soldadura de cubierta 10 m (programa ANSYS Workbench).

Caballete luz 20m: Se aprecia un esfuerzo máximo de 274.83 MPa, específicamente en la conexión soldada, como se puede observar en la Figura 49.

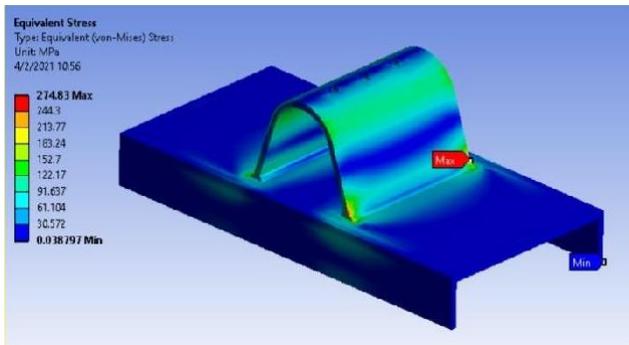


Figura 49. Esfuerzos máximos conexión tipo soldadura de cubierta 20 m (programa ANSYS Workbench).

Caballote luz 30m: Se aprecia un esfuerzo máximo de 218.32 MPa, específicamente en la conexión soldada, como se puede observar en la Figura 50.

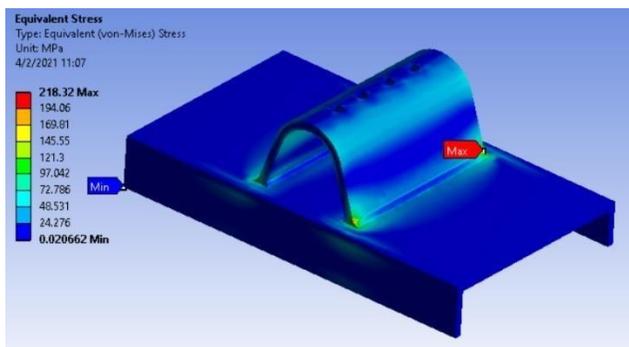


Figura 50. Esfuerzos máximos conexión tipo soldadura de cubierta 30 m (programa ANSYS Workbench).

Caballote luz 40m: Se aprecia un esfuerzo máximo de 238.18 MPa, específicamente en la conexión soldada, como se puede observar en la Figura 51.

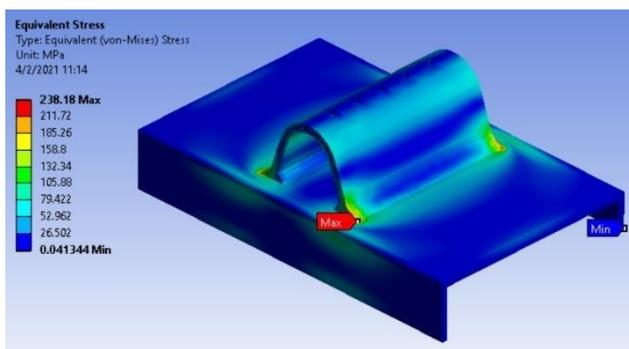


Figura 51. Esfuerzos máximos conexión tipo soldadura de cubierta

3.3 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 [32], donde se modela el pórtico por completo como se muestra en las Figuras 3, 4, 5 y 6, empleando las dimensiones que se mencionaron en el capítulo 2.1. 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 la Tabla 12.

Tabla 12: Pesos de cubierta, vigas y columnas de los pórticos analizados.

Luz [m]	Peso cubierta catálogo [kg/m ²] ^a	Peso cubierta programa [kg/m ²] ^b	Peso total estructura [kg/m ²] ^c	Peso vigas y columnas [kg/m ²]
10	11,18	10,60	19,56	8,96
20	18,26	21,85	30,76	8,91
30	- ^d	33,77	42,79	9,02
40	- ^d	39,48	48,41	8,93

40 m (programa ANSYS Workbench).

^a Valores obtenidos de catálogos de cubiertas planas autoportantes [7].

^b Valores obtenidos del programa ANSYS Workbench [33].

^c Valores obtenidos del programa Sap2000 [32].

^d Valores no se encuentran establecidos en catálogos.

4. 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.

Los esfuerzos obtenidos en cada una de las cubiertas analizadas demuestran que sus valores máximos se encuentran en 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 [7]. 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 [10]. 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 lamina, 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. El comportamiento de la platina de acero que conforma el soporte de fijación sin la presencia de la viga lateral es muy similar a los modelos en cuales se considera la conexión por soldadura, la diferencia más visible es que los esfuerzos máximos ahora se presentan 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 la Tabla 11.

Analizando la Tabla 12, 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 se da porque 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/m².

Referencias

- [1] *Manual Técnico IMAP-850*, Telaport, Pernambuco, Brasil, 2004.
- [2] *Sistema autoportante*, Cubinor, Gijón, España, (s/f).
- [3] C. Zienkiewicz, R. Taylor, "Preliminares: Los Sistemas Discretos en General" en *El Método de los Elementos Finitos*, Cuarta Edición, Barcelona, España, McGraw-Hill: 1994, pp. 1-2.

- [4] F. Cañizares, “Tipos de Estructuras Metálicas” en *Diseño Básico de Estructuras de Acero*, Primera Edición, Quito, Ecuador, Grupo Ingeniería Sísmica Estructural: 2018, pp. 2.
- [5] *Arquitectura y Construcción – Zonificación Climático Habitacional para Chile y Recomendaciones para el Diseño Arquitectónico*, NCh 1079, 1977.
- [6] J. Fernández, “Cubiertas Planas”, *Tectónica: Monografías de Arquitectura, Tecnología y Construcción*, vol. 6, pp. 13, 1998.
- [7] *Cubiertas Autoportantes Manual*, Conacero S.A., Quito, Ecuador, 2006.
- [8] *Cotización Proforma Galvanized Steel Coild*, Zhongcansteel, Shandong, China, 2020.
- [9] J. C. McCormac, “Análisis de Miembros en Tensión” en *Diseño de Estructuras de Acero*, Quinta Edición, México, Alfaomega: 2012, pp. 67-68.
- [10] *Especificación para Construcciones de Acero*, ANSI/AISC 360-16, 2016.
- [11] *Especificación para el Diseño de Miembros Estructurales de Acero Conformado en Frio*, AISI-96, 1996.
- [12] *Materiales de Acero para la Industria y Construcción*, Ferro Torre S.A., Quito, Ecuador, 2011.
- [13] *Catálogo General de Productos*, DIPAC, Ecuador, 2020.
- [14] *Perfiles de Acero Laminados en Caliente*, NTE INEN 2215, 2012.
- [15] *Perfiles Abiertos de Acero Conformados en Frio Negros o Galvanizados para Uso Estructural*, NTE INEN 1623, 2015.
- [16] *Láminas de Acero Recubiertas con Zinc (Galvanizadas) o Recubiertas con Aleación Hierro Zinc (Galvano-Recocido) Mediante Procesos de Inmersión en Caliente*, NTE INEN 2492, 2009.
- [17] *Manual de Electrodo para Soldador*, Electrodo INFRA, Ciudad de México, México, 2009.
- [18] *Especificación de Electrodo y Varillas de Acero al Carbono para Soldadura Bajo Protección Gaseosa*, AWS A5.18, 2005.
- [19] Acoport Telhas Autoportantes, “Imágenes de Soportes de Fijación” [online]. 2019. Disponible en: <https://www.facebook.com/acoport/photos/521518717965566>
- [20] *Cargas (No Sísmicas)*, NEC-SE-CG, 2015.
- [21] *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-16, 2016.
- [22] *Action on Structures*. DIN 1055, 2013.
- [23] *Peligro sísmico Diseño Sismo Resistente*, NEC-SE-DS, 2015.
- [24] D. Loachamín, A. Freire, D. Guerrero, and M. Guerrón, “construcción de Ábacos Aplicando un Modelo Matemático de Interpolación, para Definir el Peso en el Diseño de Estructuras Metálicas Destinadas para Naves Industriales a Dos Aguas, Tipo Cercha”, Proyecto de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2020, pp. 13-15.
- [25] F. Crisafulli, “Aspecto Generales” en *Diseño Sismorresistente de Construcciones de Acero*, Quinta Edición, Mendoza, Argentina, Asociación Latinoamericana del Acero: 2018, pp. 13-15.
- [26] J. Vásquez, “introducción y Conceptos Generales” en *Curso de Estructuras Acero y Madera*, Primera Edición, Ecuador, 2001, pp. 5-6.
- [27] D. Páez, “Método de Elementos Finitos Aplicado a Cubiertas Autoportante Tipo Circular” Artículo Académico, Universidad Politécnica Salesiana, Quito. Ecuador, 2020.
- [28] R. Hibbeler, “Equilibrio de un Cuerpo Rígido” en *Ingeniería Mecánica Estática*, Decimosegunda Edición, México, Pearson: 2010, pp. 201.
- [29] H. Lee, “2D Simulations” in *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2019*, United States of America, SDC Publications: 2019, pp. 146-147.
- [30] PADT. Inc, “Combining ANSYS Simulation with HPC” [online]. United States of America: Phoenix Analysis & Design

Technologies, 2017 Disponible en:
<https://www.padtinc.com/blog/>

[31] V. Capa, “Diseño de Conexiones Soldadas” Tesis , Universidad Politécnica Nacional, Quito. Ecuador, 2009.

[32] SAP2000, *Programa de Análisis Estructural*, 2019 Disponible en:
<http://www.csi.espana.com>

[33] ANSYS Workbench, *Programa de Elementos Finitos*, 2019 Disponible en:
[Engineering Simulation & 3D Design Software | Ansys](#)