

CUBIERTA EN MADERA CON ESTRUCTURA LAMINAR

DERLY VIVIANA GAMBA CARRILLO
WILSON HERNANDO PEÑARETE ORTIZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015

CUBIERTA EN MADERA CON ESTRUCTURA LAMINAR

**DERLY VIVIANA GAMBA CARRILLO
WILSON HERNANDO PEÑARETE ORTIZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil**

Director:

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
PhD. Ingeniería de Estructuras**

Codirector:

**LEONARDO MORENO DE LUCA
Msc. Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Cumplir con este logro se debió a la cooperación de grandes personas, quienes nos ofrecieron su ayuda, consejo y orientación, permitiéndonos un aprendizaje emocional, compartiendo ideas y criterios fundamentales en la conclusión de nuestro trabajo. Estas personas especiales son:

Nuestros padres, por su comprensión y experiencia que durante cada día fueron esenciales, a pesar de caídas siempre apoyándonos en la búsqueda de nuestros ideales y objetivos.

Nuestros maestros gracias por ofrecernos su ayuda y compromiso sin tener siempre el crédito que bien se merecen.

Nuestro director y codirector por darnos la oportunidad de realizar este proyecto, por su incansable apoyo y sabios consejos.

Nuestros amigos y compañero por escucharnos muchas veces en las que inconscientemente hablábamos del proyecto, brindándonos su apoyo y dándonos soluciones a problemas que usualmente se pasarían por alto debido a la intensidad del trabajo con el fin de mejorarlo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	19
4. DEFINICIÓN INICIAL DE LA GEOMETRÍA EN RHINOCEROS.....	21
5. CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA	25
6. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE LA CUBIERTA	32
7. ANÁLISIS DE LAS CONEXIONES	42
8. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA CUBIERTA.....	45
9. CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	53
ANEXOS	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metropol parasol de la Encarnación, Andalucía, España.....	14
Figura 2. Palacio de los deportes de Roma, Italia 1960.....	19
Figura 3. The Globe of Science and Innovation Cern, Suiza.	20
Figura 4. Esquema general de programación y geometría de las cubiertas estudiadas.	21
Figura 5. Esquema que representa el radio y longitud del semicilindro, necesarios para generar la geometría de las cubiertas.	22
Figura 6. Esquema que representa las divisiones en dirección X y en dirección Y.	23
Figura 7. Esquema que representa el proceso para obtener el ángulo α	24
Figura 8. Probeta para ensayo a tensión, según norma NTC-944.....	25
Figura 9. Dimensiones de la probeta para el ensayo a tensión, sección circular Norma Brasileira.	26
Figura 10. Resultados ensayos a tensión en probetas de sección circular.....	27
Figura 11. Falla en las probetas para ensayo a tracción paralelo a las fibras, sección circular.	27
Figura 12. Dimensiones de la probeta para el ensayo a tensión con sección rectangular Norma Brasileira.	28
Figura 13. Resultados ensayos a tensión en probetas de sección rectangular.	28
Figura 14. Falla en las probetas para ensayo a tracción paralelo a las fibras, sección rectangular.....	29
Figura 15. Dimensiones de la probeta para el ensayo a compresión, Norma Brasileira.....	29

Figura 16. Resultados ensayos a compresión.	29
Figura 17. Falla en las probetas para ensayo a compresión paralelo a las fibras, sección circular	30
Figura 18. Geometría generada en Rhinoceros.....	32
Figura 19. Ángulo β y α , a usar en el análisis estructural.....	33
Figura 20. Fuerzas vs Ángulo β	33
Figura 21. Momentos vs Ángulo β	34
Figura 22. Comportamiento de la carga axial al variar ángulos y divisiones en dirección “Y”	35
Figura 23. Comportamiento del momento 2-2 al variar ángulos y divisiones en dirección “Y”	36
Figura 24. Comportamiento del momento 3-3 al variar ángulos y divisiones en dirección “Y”	36
Figura 25. Geometría en tres dimensiones de la cubierta a diseñar con 16 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.	37
Figura 26. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 14 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.	38
Figura 27. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 12 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.	38
Figura 28. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 10 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.	39
Figura 29. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 8 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.	39
Figura 30. Cubierta con lona de PVC.	41
Figura 31. Diseño conceptual de la conexión, compuesta por tres placas metálicas.	42
Figura 32. Detalle de la placa metálica para la conexión, vista frontal, dimensiones en mm.	43
Figura 33. Detalle de la conexión vista superior, dimensiones en mm.	43

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Promedio módulos de elasticidad a tensión.....	30
Tabla 2. Promedio módulos de elasticidad a compresión.....	31
Tabla 3. Promedio para la densidad de la madera.	40
Tabla 4. Resultados de la envolvente de cargas máximas para la estructura (sección 100 mm x 100 mm).....	46

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Resultados caracterización mecánica de la madera (Sapán) generados por la máquina de ensayos avanzados MTS.	55
ANEXO B. Parámetros de diseño sísmico.	60
ANEXO C. Datos de las probetas para los ensayos.	61
ANEXO D. Resultados Análisis estructural sección 50 x 100 mm.	63
ANEXO E. Chequeo de las láminas de madera.	66
ANEXO F. Chequeo de la conexión.....	74
ANEXO G. Detalles del diseño de la cubierta en madera con estructura laminar.	87

RESUMEN

TÍTULO: Cubierta en madera con estructura laminar^{*}

AUTORES: DERLY VIVIANA GAMBA CARRILLO**
WILSON HERNANDO PEÑARETE ORTIZ

PALABRAS CLAVE: ESTRUCTURA LÁMINAR, CONEXIÓN, MEMBRANA TEXTIL.

DESCRIPCIÓN:

La industria de la construcción cambia constantemente debido a la gran cantidad de innovaciones en los procesos de diseño, análisis y edificación que se ha producido en las últimas décadas. Lo anterior obliga también a emplear materiales eficientes, sustentables y en especial que reduzcan el impacto ambiental.

La madera, como material estructural, no ha sido muy usada en nuestro país debido, especialmente, a la escasa información sobre sus propiedades físico mecánicas y sobre los beneficios de su empleo. Sumado a lo anterior, la falta de una industria consolidada que, basada en las actividades de reforestación, pueda ofrecer un suministro confiable de este valioso material hace difícil que su uso sea intensivo.

Al emplear la madera como elemento estructural y constructivo para cubrir grandes áreas como galpones, pabellones, depósitos, auditorios o gimnasios, esta puede proporcionar un giro innovador en la creación de cubiertas y edificaciones haciéndolas más llamativas (de gran impacto arquitectónico) y al mismo tiempo ofreciendo ventajas económicas.

En el anterior contexto, este trabajo presenta un procedimiento de diseño de cubiertas laminares en madera que incluye la generación automática de su geometría teniendo en cuenta la influencia de la variación en la cantidad de divisiones y del ángulo entre las láminas en el comportamiento de la estructura. También se presenta el diseño para la conexión tipo entre elementos, buscando el diseño que cumpla con características visuales y estéticas apropiadas. Finalmente, se presentan los resultados de la caracterización mecánica de la madera empleada.

^{*} Trabajo de grado

^{**} Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director.

ABSTRACT

TITLE: On wooden deck sheet structure^{*}

AUTHORS: DERLY VIVIANA GAMBA CARRILLO^{**}
WILSON HERNANDO PEÑARETE ORTIZ

KEYWORDS: LÁMINAR STRUCTURE, CONNECTION, TEXTILE MEMBRANE.

DESCRIPTION:

The construction industry constantly changes due to the large number of innovations in design processes, analysis and construction that has occurred in recent decades, this also obligates employ efficient, sustainable and especially materials that reduce environmental impact.

Wood as a structural material has not been used much in our country due, in special to the limited information on their physical-mechanical properties and the benefits of their employment. Added to this, the lack of a consolidated industry, based in the reforestation activities, can offer a reliable supply of this valuable material makes difficult its use intensively.

By to employ wood as a structural and constructive element to cover large areas such as sheds, pavilions, warehouses, auditoriums or gymnasiums, this can provide an innovative twist on building roof and making buildings more striking (of great architectural impact) while offering economic advantages.

In the previous context, this paper presents a design procedure of laminar roof in wood including automatic generation of its geometry considering the influence of variation in the number of divisions and the angle between the lamellas in the behavior of the structure. It also presents the design for type connection between elements, searching design that complies with appropriate visual and aesthetic characteristics. Finally, the results of the mechanical characterization of the wood used are presented.


^{*} Graduation Project

^{**} Physical-mechanical Faculty, School of Civil Engineering, Director Begambre Oscar Javier Carrillo, Civil Engineer, Codirector Leonardo Moreno De Luca Civil Engineer

INTRODUCCIÓN

Las estructuras laminares de madera son compuestas por elementos denominados láminas, que se interconectan componiendo una malla de rombos tridimensionales. De forma general, está constituida por barras interceptadas que forman un conjunto de “X”, que definen una malla curva denominada bóveda laminar. Este tipo de estructuras puede tener forma semicilíndrica (con sección transversal en forma de arco circular), puede ser parabólica, a cuatro aguas, de forma libre (ver Figura 1) o en forma de cúpula; las láminas son piezas relativamente largas y de pequeño espesor. [1]

Figura 1. Metropol parasol de la Encarnación, Andalucía, España.

Arquitecto:	Jürgen Mayer-Hermann	
Construcción:	De 2005 a 2011	
Dimensiones		
Altura:	28 m	
Niveles:	5	
Área:	11.000 m ²	
Utilización:	Comercio, Restaurantes Museo, Mirante	
País:	España	
Región:	Andalucía	
Localidad:	Sevilla	

Fuente. J. MAYER. H. Disponible en: <http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html>

En este trabajo se busca encontrar un diseño óptimo que contemple el ángulo entre láminas, la longitud de las láminas, las secciones transversales y el tipo de conexión para una cubierta laminar de madera. La tarea propuesta es ardua, debido a la incertidumbre y/o la dispersión involucrada en varios parámetros estructurales tales como las propiedades del material, las imperfecciones

geométricas, las variaciones de carga, los procesos de corte o aserrío y las condiciones de contorno.

En este contexto, como ya se mencionó, se pretende definir un procedimiento de análisis y diseño de la estructura global y de sus conexiones.

Este procedimiento, parte de la premisa de poder definir la geometría inicial de la cubierta (ángulos entre láminas, número de láminas y forma general de la cubierta) de manera semiautomática con ayuda de una rutina programada en *Rhinoceros 3D* y con la ayuda de la extensión *Grasshopper*. De tal manera, que se puedan estudiar varias configuraciones estructurales de forma rápida y eficaz. Seguidamente, con los datos de la geometría obtenidos en *Rhinoceros* y un predimensionamiento de los elementos se realiza el análisis estructural estándar en un programa de elementos finitos. Con esta información se obtiene el dimensionamiento final de la cubierta atendiendo a la normatividad vigente. Previamente, se realizó la caracterización de la madera. Esta caracterización provee información básica para el análisis y el diseño de la cubierta.

El contenido del trabajo se puede resumir de la siguiente manera: En la sección 1 hace una breve revisión sobre estructuras laminares. En la sección 2 se hace la definición inicial de la geometría en *Rhinoceros* y se presenta la programación efectuada para obtener la geometría de la cubierta. En la sección 3 se registran los resultados de la caracterización de la madera. La sección 4 comprende el procedimiento de análisis. Seguidamente, en la sección 5 se presenta el análisis y diseño de las conexiones. Finalmente, En la sección 6 se muestra el procedimiento de diseño de la cubierta y luego, las conclusiones del trabajo.

Con la finalidad de ilustrar el procedimiento anteriormente descrito, se realizó un estudio completo para definir una cubierta que abrigue una planta rectangular de 25 metros de ancho por 40 metros de profundidad, correspondiente a una estructura laminar en madera de tipo semicilíndrica con sección transversal en forma de arco circular.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El ámbito de la construcción ha estado cambiando incesantemente debido a la gran cantidad de tecnología y al perfeccionamiento de los procesos constructivos, lo cual obliga a desarrollar formas innovadoras para el diseño de edificaciones eficientes, sustentables y en especial que reduzcan el impacto ambiental.

La madera actualmente en nuestro país no es muy usada, debido especialmente al poco conocimiento de las propiedades físico mecánicas, de los beneficios y sus características, además de ello la poca cultura acerca de las actividades de reforestación que se pueden llevar a cabo para suministro de la misma sin tener en cuenta que es un recurso renovable e inagotable

Al introducir un material en los métodos comúnmente utilizados en la construcción, este puede proporcionar un giro innovador en la creación de cubiertas y edificaciones haciéndolas más llamativas debido a que la madera presenta características que pueden abrir un campo importante del desarrollo de cubiertas económicas y de gran impacto arquitectónico, comportándose estructuralmente bien, es decir, ¿se puede diseñar y construir una estructura no convencional con materiales que brinden seguridad, reduzcan el impacto ambiental y siendo más armonioso a la vista arquitectónicamente?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una cubierta de madera con forma no convencional (estructura laminar).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

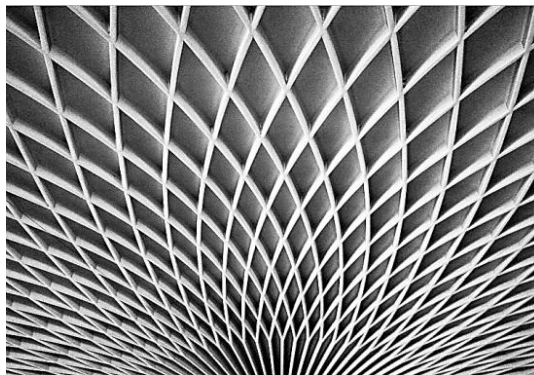
- ✓ Determinar en el laboratorio las propiedades mecánicas del *Clathrotropis brunnea* Amshoff – Sapán (curva esfuerzo - deformación).
- ✓ Caracterizar la estructura laminar a ser diseñada (geometría, ángulos y unidades estructurales).
- ✓ Definir un procedimiento de análisis y de diseño tanto para las uniones como para la estructura en global.

3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En los años veinte del siglo XX se inicia la construcción de láminas de hormigón armado con diversas directrices, con las cuales se consigue cubrir grandes espacios con unos pocos centímetros de espesor y sin necesidad de nervios de refuerzo ni de apoyos continuos. El desarrollo de los cascarones se produce con la aparición del hormigón armado y el desarrollo de nuevos métodos de análisis. Al mismo tiempo, el sistema estructural laminar en madera también fue introducido. [1]

Un ejemplo clásico de este tipo estructural lo constituye el recinto deportivo construido en Roma para ser sede de los juegos olímpicos de 1960 (Ver Figura 2). El proyecto consistió en un edificio circular con soportes inclinados a su alrededor en forma de “Y” rematado en una cúpula de hormigón armado, haciendo reminiscencia de los adornos clásicos romanos y de su cerámica, por la forma del mismo, se podría pensar que su diseño se basa en el Panteón Romano.

Figura 2. Palacio de los deportes de Roma, Italia 1960.



Fuente. Pier Luigi Nervi. Palacio de los deportes de Roma. Roma. Italia. Disponible en: 1960<http://arquiscopio.com/archivo/2012/05/07/palacio-de-los-deportes-de-roma>

Otro ejemplo más reciente, esta vez en madera, es el Globo de la Ciencia y de la Innovación, Localizada en Cern, Suiza (ver Figura 3). Diseñado por Thomas Büchi y Hervé Dessimoz. Posee una altura de 28 metros, con diámetro de la esfera de 40 metros. Fue construido por un consorcio de 11 empresas especializadas en estructuras de madera, llamado *Lignum* (Asociación Suiza de madera). Toda la madera es reciclada y procede de estructuras desmontadas. La esfera está compuesta por 18 arcos laminados, simbolizando un globo terrestre. (Ver Figura 3).

Figura 3. The Globe of Science and Innovation Cern, Suiza.



Fuente. The Globe of Science and Innovation. Disponible en: <http://estruturasdemadeira.blogspot.com/2007/03/toda-madeira-vem-de-estruturas.html>

4. DEFINICIÓN INICIAL DE LA GEOMETRÍA EN RHINOCEROS

Como ya se mencionó, la definición de la geometría de la cubierta en madera se realizó por medio de esta herramienta de modelado en *Rhinceros 3D*. Esto permite exportar hacia el Software de análisis estructural, las coordenadas y líneas de cada uno de los elementos que conforman la estructura laminar (en este caso, del tipo semicilíndrico), permitiendo cubrir el área anteriormente descrita y generando un modelo con valor arquitectónico (ver Figura 18).

El modelo geométrico se estableció en este trabajo realizando la programación en *Grasshopper* (Ver Figura 4). Para llevarlo a cabo es necesario definir inicialmente el radio y longitud del semicilindro como se muestra en la Figura 5, precisando la proyección del arco circular en un plano YZ, y la longitud en componentes vectoriales para darle profundidad en el eje X, dando como resultado la superficie de la estructura.

Figura 4. Esquema general de programación y geometría de las cubiertas estudiadas.

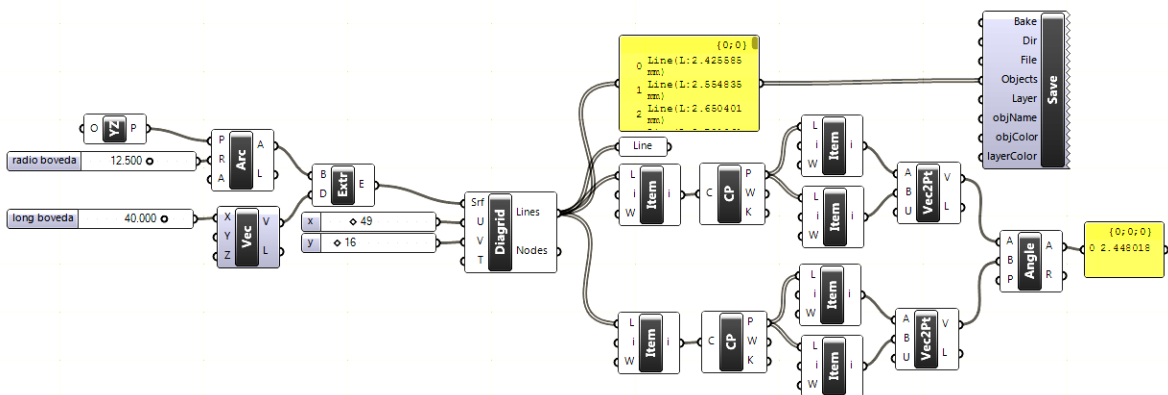
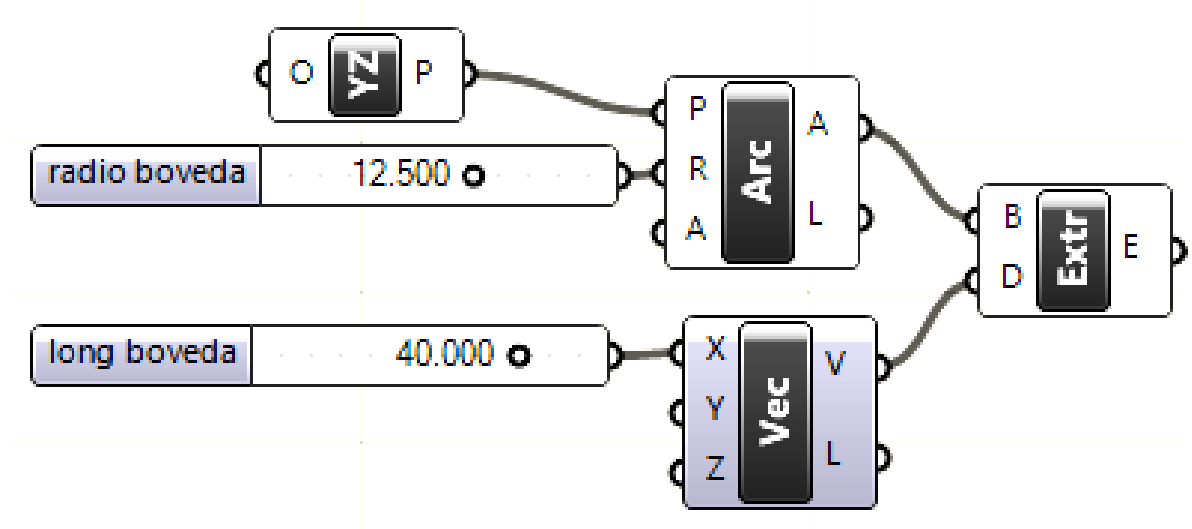
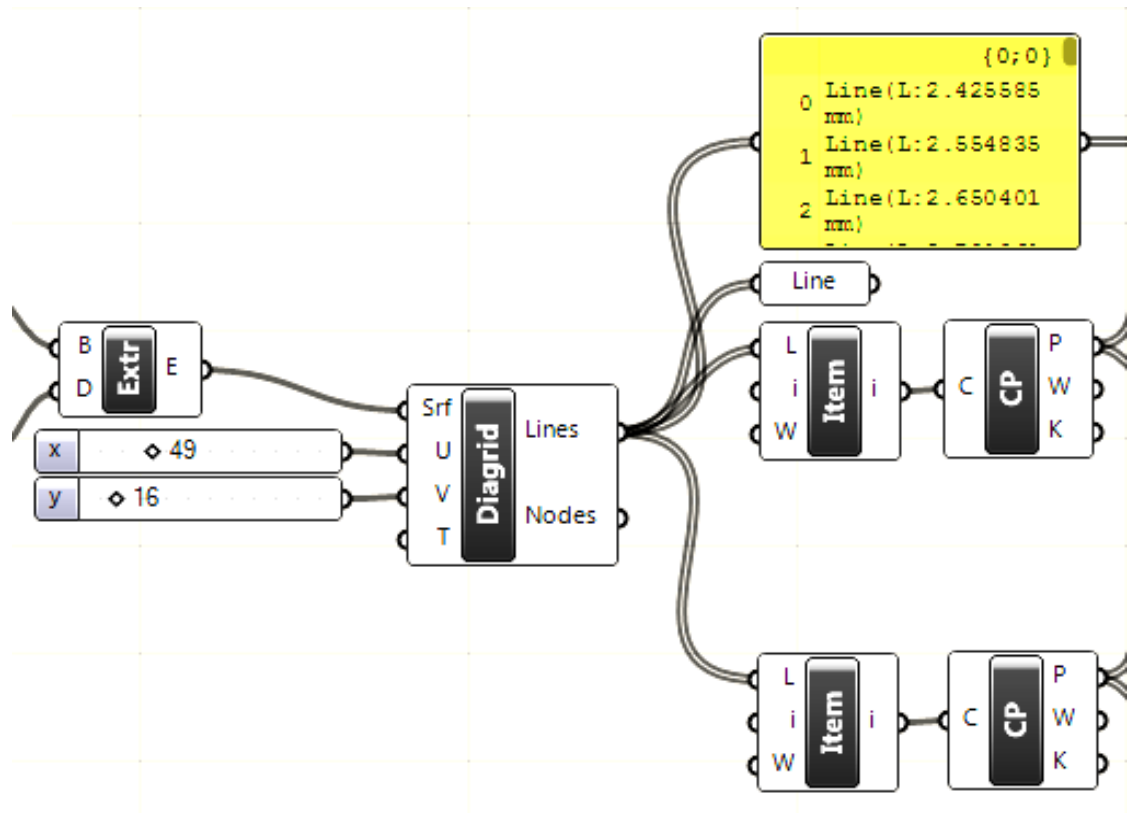


Figura 5. Esquema que representa el radio y longitud del semicilindro, necesarios para generar la geometría de las cubiertas.



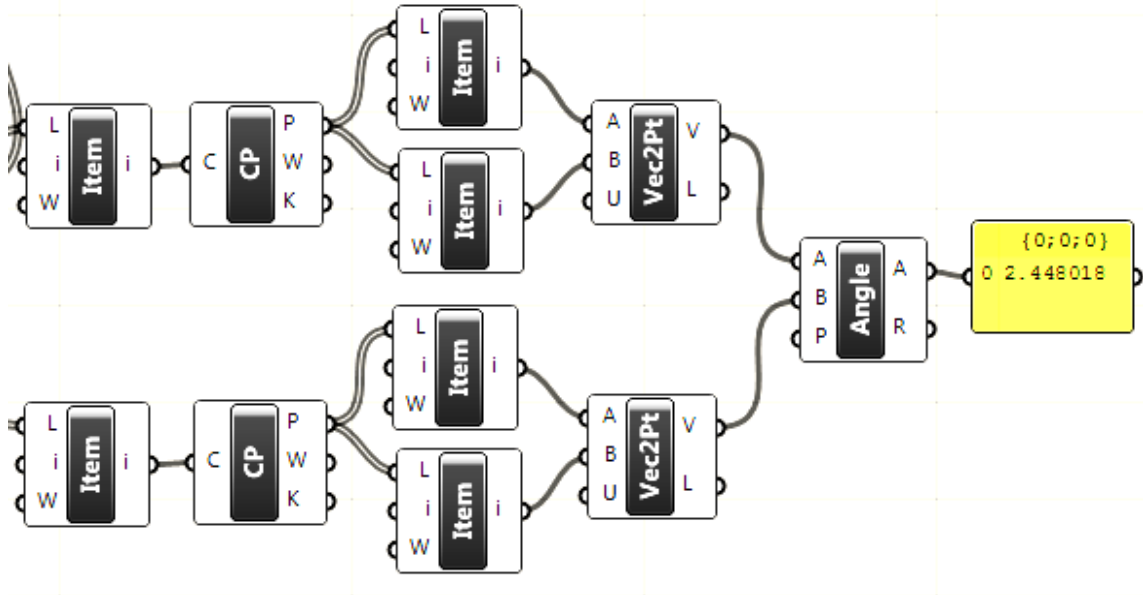
Una vez creada la superficie, es necesario fijar el número de divisiones en las direcciones X y Y, que dará origen a la estructura de líneas sobre la superficie o rejilla diagonal (Ver Figura 6).

Figura 6. Esquema que representa las divisiones en dirección X y en dirección Y.



Una vez generada la estructura de líneas, esta se convierte en puntos de control guardados en una lista, para transformarse en vectores y así poder determinar el ángulo α entre ellos (Ver Figuras 7 y 19).

Figura 7. Esquema que representa el proceso para obtener el ángulo α .



En la sección 6 se indica el procedimiento de diseño de la cubierta.

En este trabajo, también se busca una estructura en la que se reduzcan esfuerzos internos manteniendo características arquitectónicas. En este contexto, las variables de diseño a considerar están dadas por el número de divisiones a usar y los ángulos que definen la cubierta (como se verá en la sección 4 y la Figura 19).

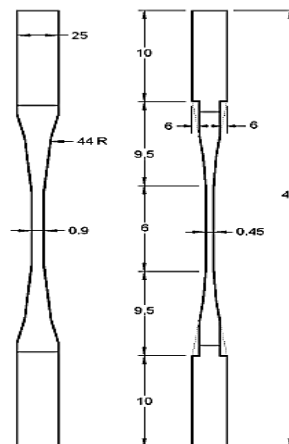
De forma general, para el análisis de la cubierta, se mantuvo el número de divisiones en una dirección conservando la forma del rombo o romboide según sea el caso, (el rombo es una figura geométrica de cuatro lados iguales o romboide que tiene sus ángulos y sus lados iguales dos a dos sin formar ángulos rectos) variando los ángulos, lo cual hace que las divisiones en la otra dirección aumenten o disminuyan, con el fin de encontrar una tendencia (como se indica en la sección 4).

5. CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA

Como parte importante de este trabajo, se procedió a caracterizar la madera empleada. De acuerdo a la relación peso resistencia que se presenta en las maderas, se ha escogido el ***Clathrotropis brunnea Amshoff*** con nombre común **Sapán**, la cual posee características estructurales especiales además de producirse en la región.

A consecuencia de la falta de información en la Norma Técnica Colombiana NTC-944 *determinación de la tracción paralela al grano*, lo suficientemente precisa que permita la interpretación de las dimensiones de la probeta requerida para el ensayo, observándose unidades inadecuadas, inconsistencia en las medidas y/o falta de ellas (Ver Figura 8), por tal razón se recurrió al uso de las normas Brasileñas.

Figura 8. Probeta para ensayo a tensión, según norma NTC-944.



Dimensiones en cm

Figura 1. Probeta de ensayo

Con el fin de obtener el módulo de elasticidad se realizaron los ensayos de tensión y compresión paralelo a las fibras, de acuerdo con el proyecto de norma Brasileña: Método de caracterización de la madera con probetas libre de defectos [PN 02:126.10-001-2] del profesor Calil Junior, cuyo procedimiento de ensayo se encuentra en el numeral 5.8 *Compresión paralela a las fibras* y el numeral 5.9 *tracción paralela a las fibras*; de los resultados de los ensayos se obtuvo: Figura 10, ensayos a tensión con las probetas de sección circular (Figura 9); Figura 13, ensayo a tensión con las probetas de sección rectangular (Figura 12) y finalmente Figura 16, ensayos a compresión (Figura 15). (Ver Anexo C)

Figura 9. Dimensiones de la probeta para el ensayo a tensión, sección circular Norma Brasilera.

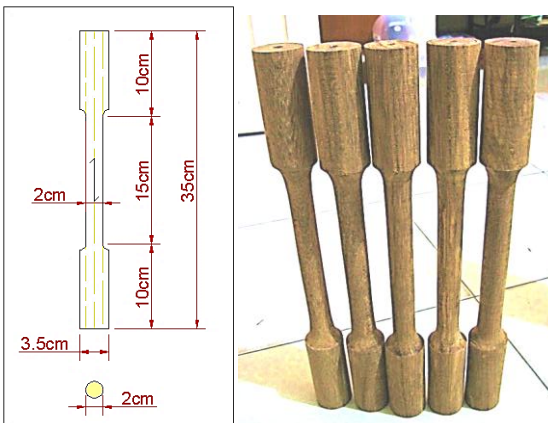


Figura 10. Resultados ensayos a tensión en probetas de sección circular.

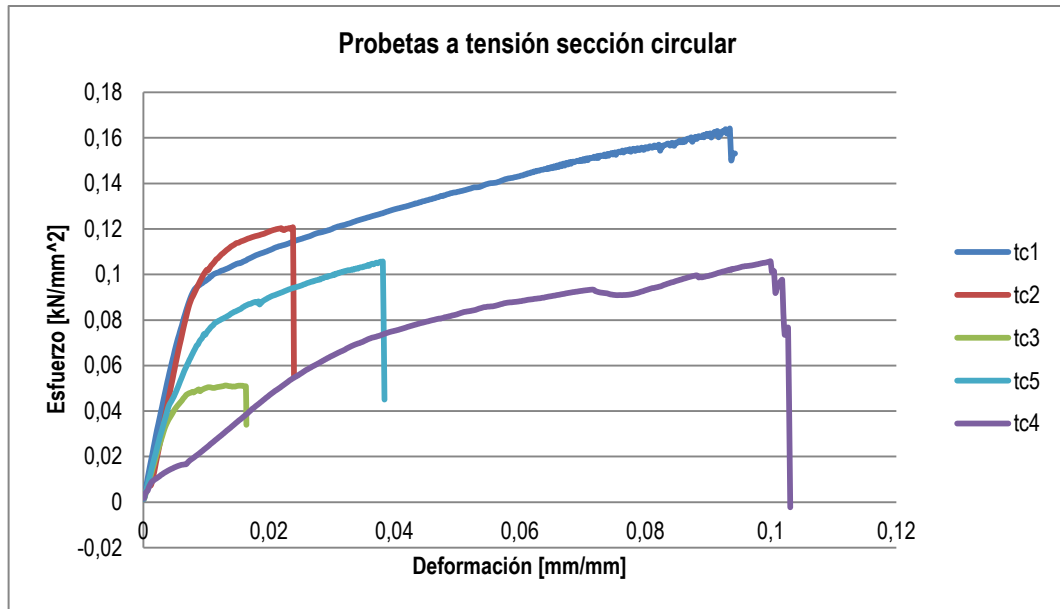


Figura 11. Falla en las probetas para ensayo a tracción paralelo a las fibras, sección circular.



Figura 12. Dimensiones de la probeta para el ensayo a tensión con sección rectangular Norma Brasileira.

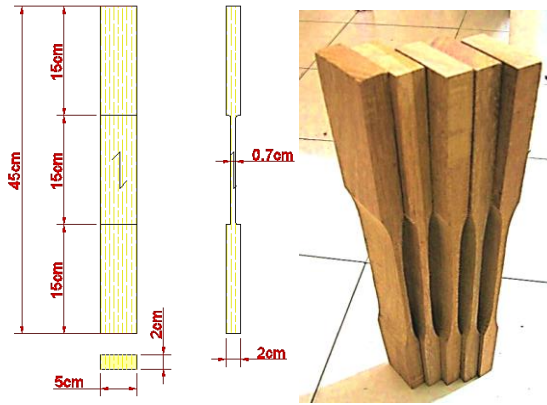


Figura 13. Resultados ensayos a tensión en probetas de sección rectangular.

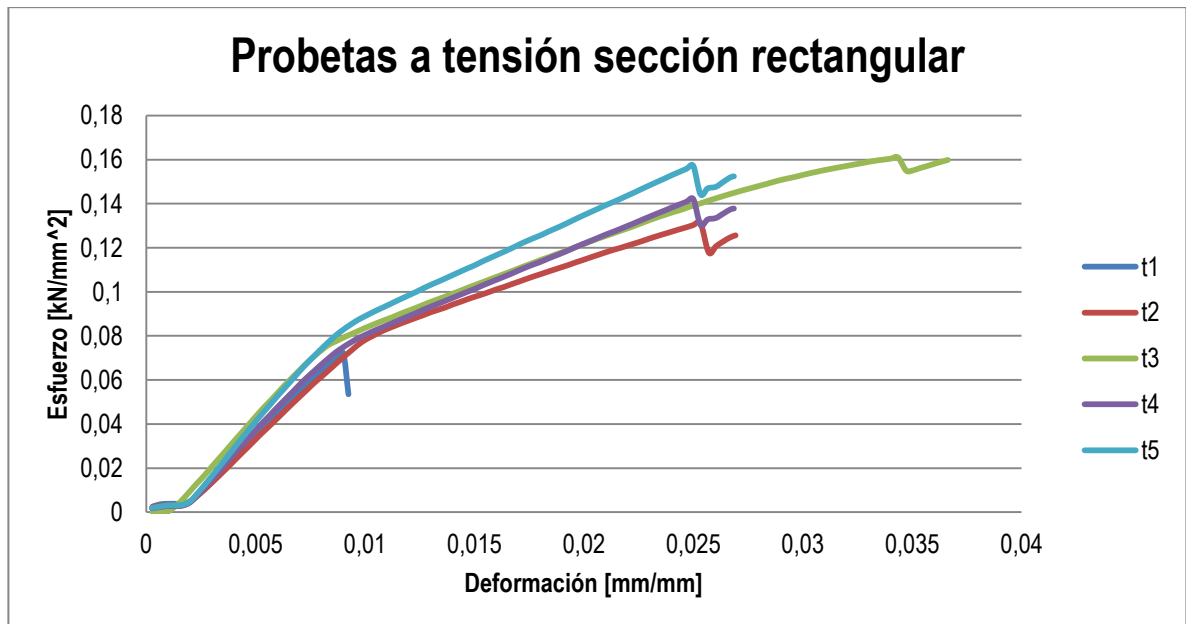


Figura 14. Falla en las probetas para ensayo a tracción paralelo a las fibras, sección rectangular.

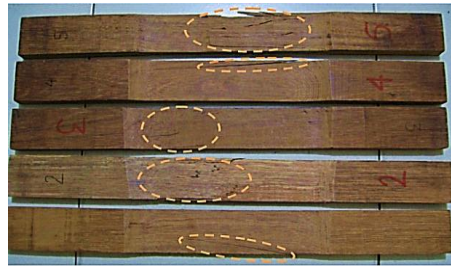


Figura 15. Dimensiones de la probeta para el ensayo a compresión, Norma Brasileira

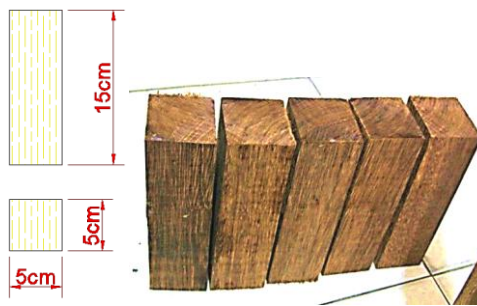


Figura 16. Resultados ensayos a compresión.

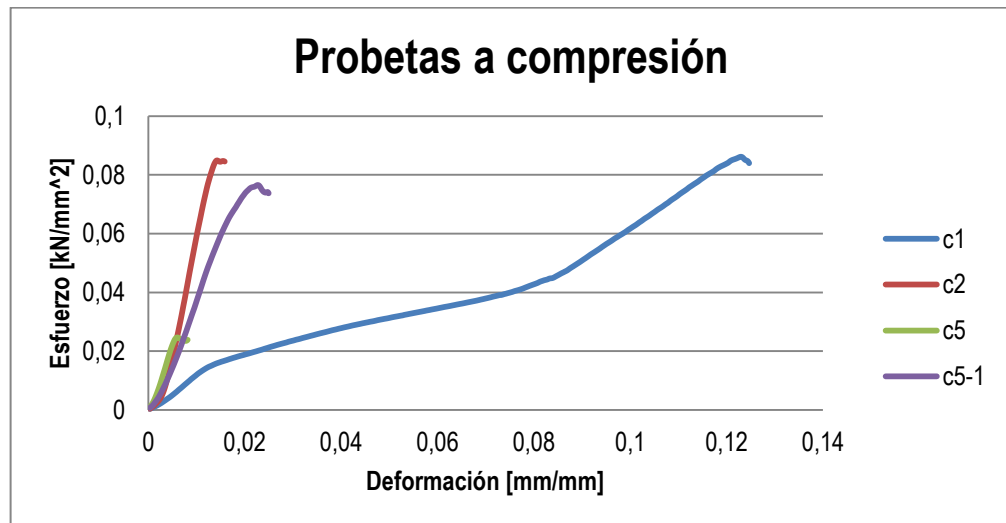


Figura 17. Falla en las probetas para ensayo a compresión paralelo a las fibras, sección circular



De los respectivos ensayos se obtuvieron los valores de carga axial y desplazamiento (Ver Anexo A) para así calcular los módulos de elasticidad experimentales a tensión mostrados en la Tabla 1, y los módulos de elasticidad experimentales a compresión mostrados en la Tabla 2, en tanto el promedio de estos será el utilizado para el desarrollo del diseño, exceptuando aquellos cuya desviación sea excesiva, cumpliendo con los chequeos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Tabla 1. Promedio módulos de elasticidad a tensión.

PROBETAS A TENSIÓN			
Circular [MPa]		Rectangular [MPa]	
tc1	13107.09	t1	9668.45
tc2	13056.79	t2	9277.27
tc3	9546.67	t3	10309.69
tc4	2209.09	t4	10057.06
tc5	10401.06	t5	11300.47
tc prom	11527.90 MPa	t prom	10122.59 MPa

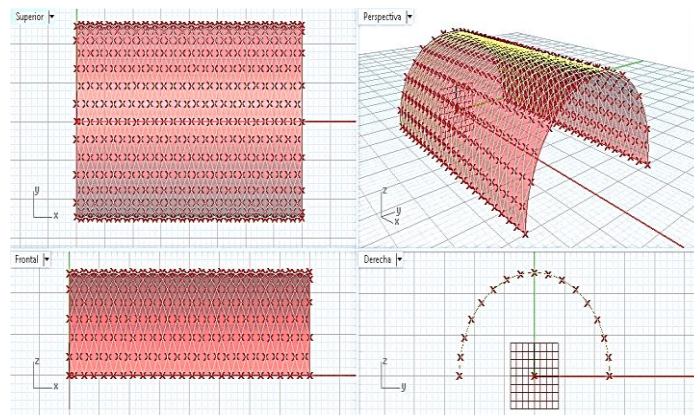
Tabla 2. Promedio módulos de elasticidad a compresión.

PROBETAS A COMPRESIÓN	
c1	1388.39
c2	7869.69
c5	5166.71
c5-1	4467.62
c prom	5834.67 MPa

6. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE LA CUBIERTA

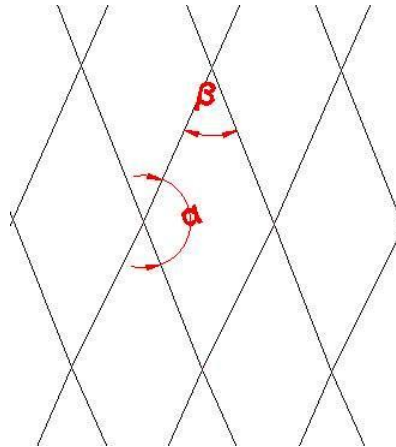
La cubierta que se eligió para diseñar en este trabajo es de forma semicilíndrica como ya se mencionó. Detalles de su geometría se presentan en la Figura 18.

Figura 18. Geometría generada en Rhinoceros.



Para definir la geometría de la cubierta se establece inicialmente el ángulo $\beta^{[2]}$ que se forma entre láminas como se muestra en la Figura 19. Luego se realizaron cinco tipos de modelos para un mismo ángulo, inspeccionando la influencia de la cantidad de divisiones en la dirección “Y” sobre los elementos, permitiendo una comparación entre ellos. En cuanto a las cargas se calculan por área aferente para cada modelo. Vale la pena mencionar que se estudiaron ángulos β de 30°, 40°, 45° y 60°.

Figura 19. Ángulo β y α , a usar en el análisis estructural.



De cada modelo se extraen los requerimientos de carga axial, torsión, cortante y momentos de los elementos más críticos. Al interpretar estos datos se pueden constituir las líneas de tendencia que se presentan en la Figura 20, correspondiente a las fuerzas y la Figura 21, correspondiente a los momentos en función del ángulo β .

Figura 20. Fuerzas vs Ángulo β .

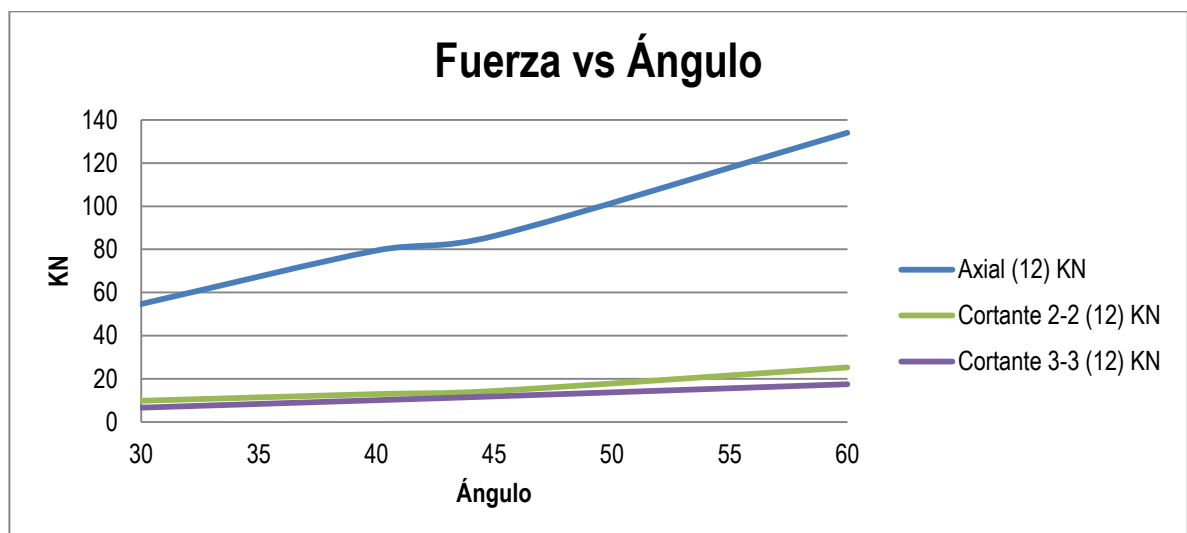
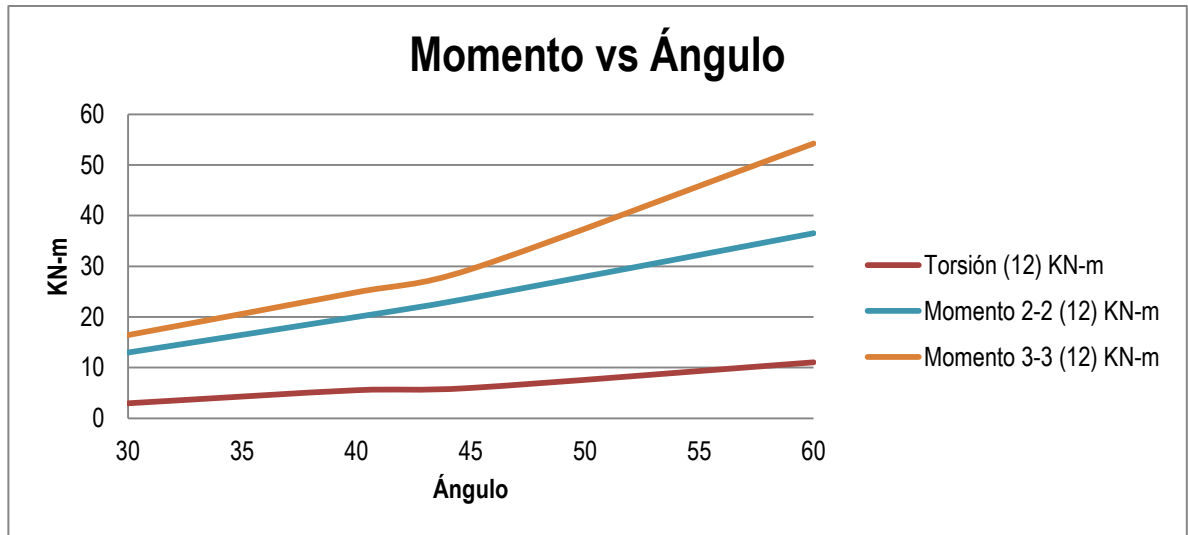


Figura 21. Momentos vs Ángulo β .



Nota: la nomenclatura 2-2, 3-3 en las Figuras 20 y 21 hace referencia a los ejes locales de los elementos.

En el Figura 20, se puede observar que domina la fuerza axial para los casos en estudio, mostrando una leve descarga para los ángulos comprendidos entre 40 y 45 grados. En la Figura 21, el momento es el que presenta una participación más influyente. Cabe decir que al analizar estas dos fuerzas en función de esfuerzos internos en los miembros, la acción crítica es el momento en dirección 2, no siendo superado por los esfuerzos producidos por la acción de fuerzas axiales internas.

Al observar el comportamiento de las curvas se presenta una relajación de las fuerzas (ver Figuras 22, 23 y 24) en el rango comprendido por los ángulos de 40 a 45 grados, aunque la cantidad de particiones (divisiones en la dirección Y) arroja una relación que implica que a mayor cantidad de divisiones menor carga axial, como se observa en la Figura 22. Sin embargo, se debe considerar aquella división en "Y" inferior más cercana a estos valores, por lo cual el modelo con 16

divisiones es el que más se adapta, teniendo en cuenta que comercialmente las secciones de madera se adquieren por piezas de 3 metros en su mayoría.

Adicionalmente, se pretende evitar cargas mayores producidas por las uniones si se presentasen más particiones y debido a que el cambio en los momentos mostrados en las Figuras 23 y 24, no es tan evidente como ocurre con la carga axial, siendo más factible el aumento de sección transversal capaz de contener los esfuerzos presentes en los elementos producto de los momentos.

Figura 22. Comportamiento de la carga axial al variar ángulos y divisiones en dirección “Y”.

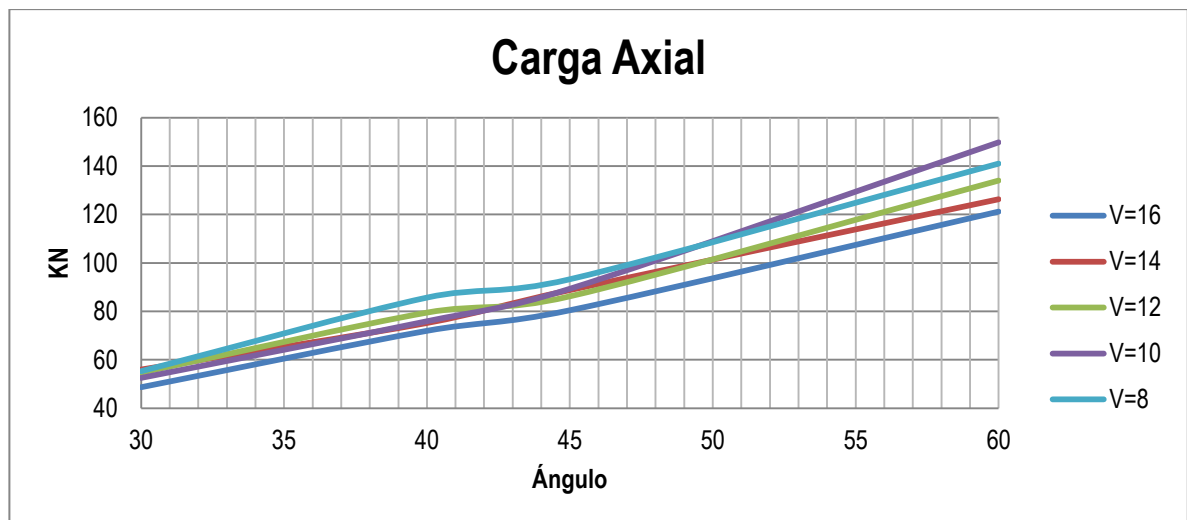


Figura 23. Comportamiento del momento 2-2 al variar ángulos y divisiones en dirección “Y”.

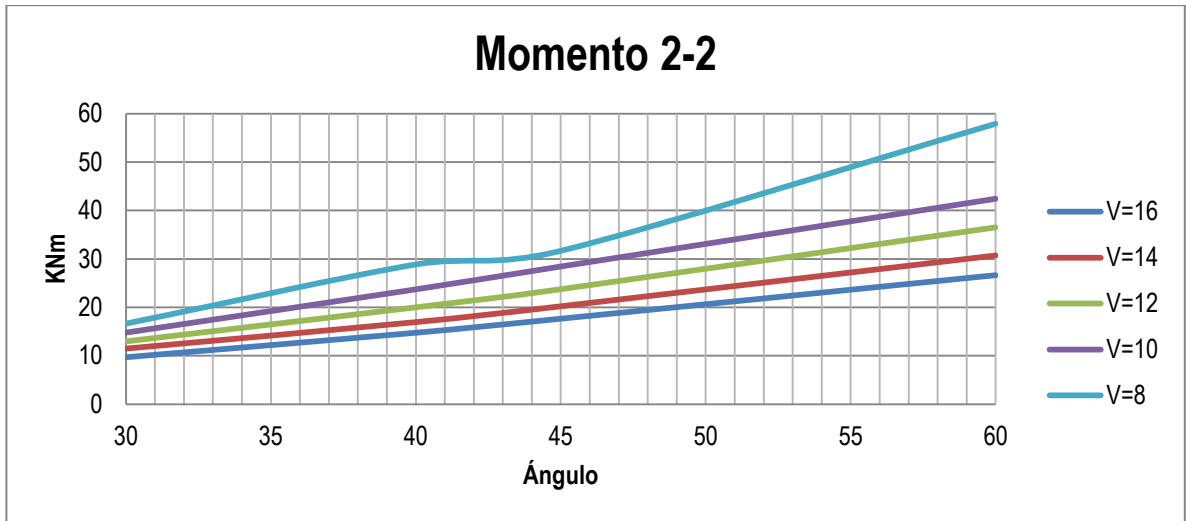
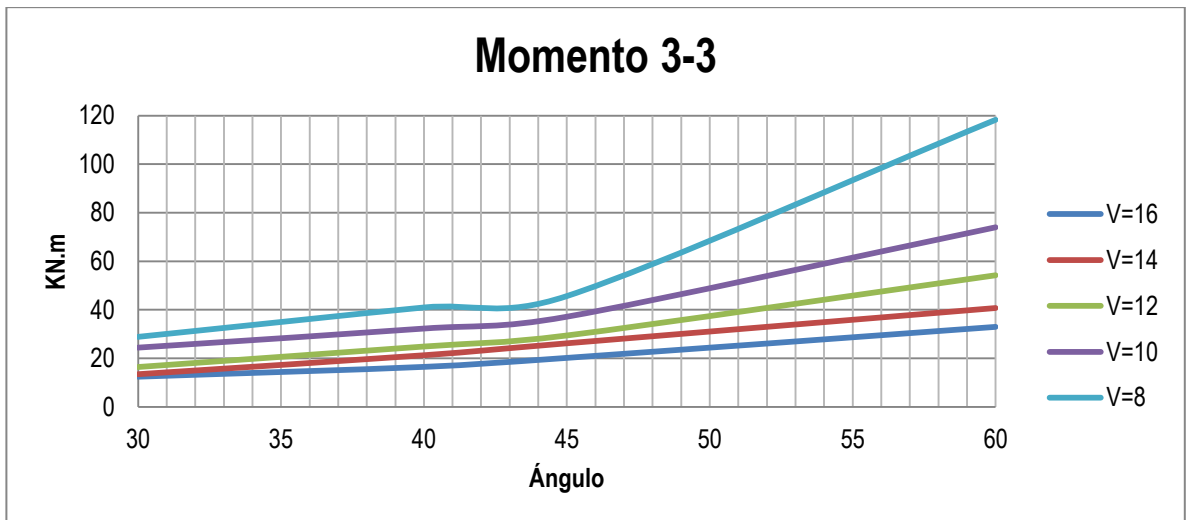


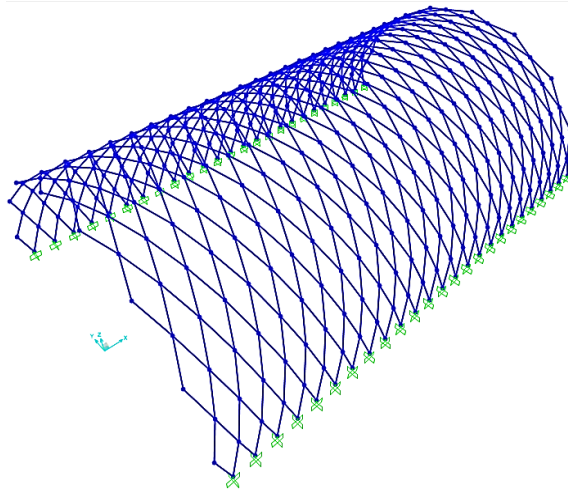
Figura 24. Comportamiento del momento 3-3 al variar ángulos y divisiones en dirección “Y”.



Con base en las Figuras 25 a 29 el ángulo que se puede elegir para la geometría se encuentra en el rango de 40 a 45 grados. De acuerdo con lo discutido anteriormente se eligió el ángulo β aproximadamente igual a 40 grados para el

modelo con 16 divisiones en dirección Y. Además esta configuración presenta algunas ventajas a nivel constructivo (por tener secciones con longitudes cercanas a los 3 metros permite mayor rapidez en el proceso de construcción, menos elementos de soporte debido a que en la construcción se debe garantizar la posición de cada nodo para que la estructura cierre con precisión) y al tener en cuenta el aspecto estético esta opción presenta una estructura laminar mayormente marcada. Con esta información se generó la Figura 25 correspondiente a la geometría en tres dimensiones para la cubierta a ser diseñada.

Figura 25. Geometría en tres dimensiones de la cubierta a diseñar con 16 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.



En seguida se observó el cambio en la configuración de la geometría variando las divisiones en la dirección “Y”, lo que hace variar la cantidad de elementos o láminas de la estructura. También se nota como cambia la percepción de curvatura en la sección, sin favorecer el objetivo desde el punto de vista arquitectónico (Ver Figuras 25-29 y Anexo D).

Figura 26. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 14 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.

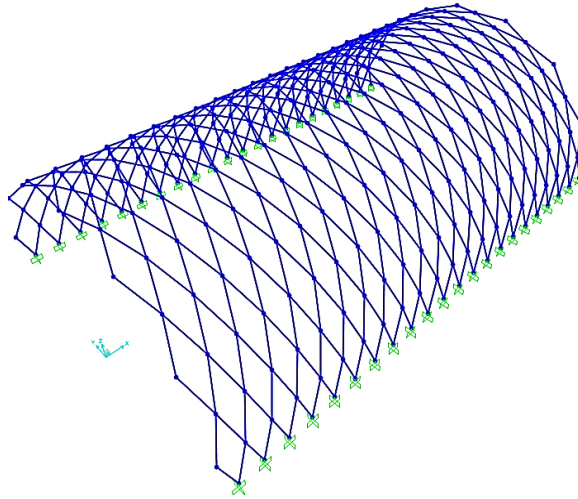


Figura 27. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 12 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.

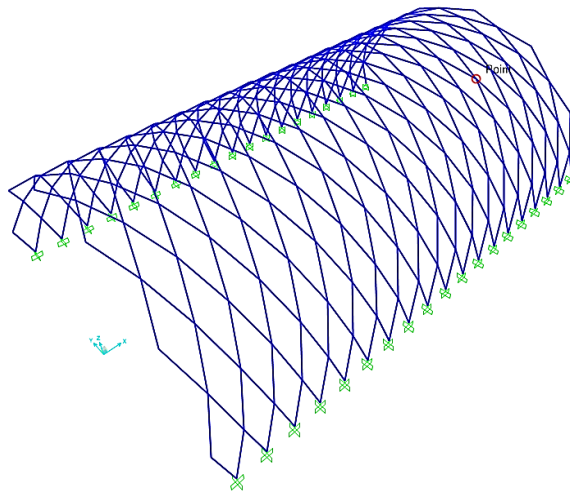


Figura 28. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 10 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.

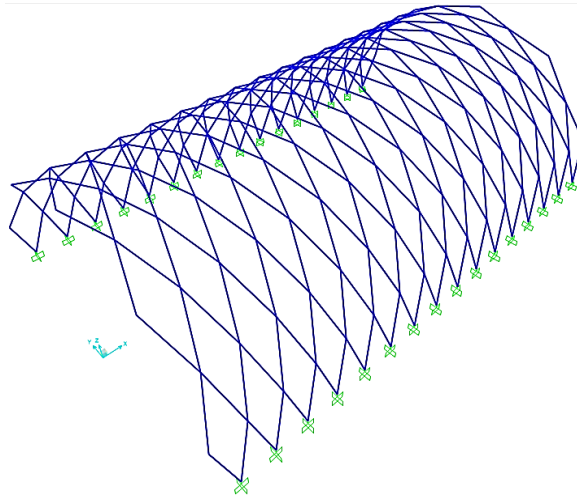
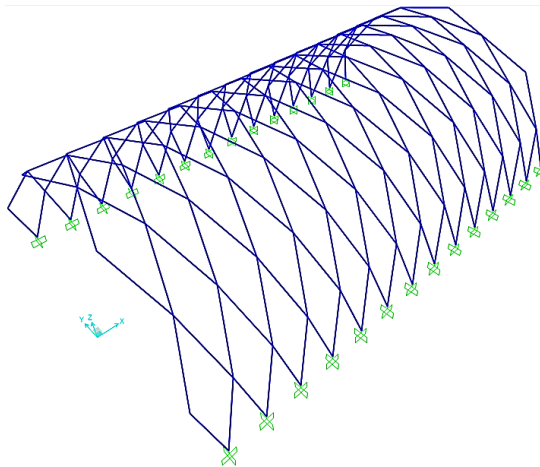


Figura 29. Geometría en tres dimensiones de la cubierta estudiada con 8 divisiones y ángulo β de aproximadamente 40 grados.



Luego de establecer la geometría del modelo en tres dimensiones (dado por la Figura 25), se definieron las propiedades del material y el tipo de apoyo en el software de análisis estructural; y como se ha observado anteriormente, las acciones internas predominantes en los elementos corresponden al momento y la

carga axial, por ende el módulo de elasticidad (E) a utilizar es el obtenido por el ensayo de compresión, con el valor de $E=5834.67 \text{ MPa}$ (ver la sección 3); A partir de las dimensiones de las probetas y su peso se determina la densidad promedio consignada en la Tabla 3 para la madera en estudio la cual tiene un valor $\rho = 984.201 \text{ kg/m}^3$.

Tabla 3. Promedio para la densidad de la madera.

Probeta	Volumen [m ³]	Peso [kg]	Densidad [kg/m ³]
1	0.000349	0.346	990.871
2	0.000347	0.339	975.774
3	0.000348	0.345	992.100
4	0.000348	0.340	975.974
5	0.000347	0.342	986.284
Promedio			984.201

Al iniciar la evaluación de cargas (Título B – cargas. NSR-10), que deben soportar los elementos, se procede a elegir entre los diversos materiales disponibles en el medio para cubiertas, con el fin de emplear un tipo que se adecue estéticamente y reduzca el impacto ambiental. Por lo tanto, se opta por la membrana textil en lona de PVC, (fabricado por Mecalux logismarket) de gramaje 2,1 kg/m² (Ver Figura 30), luego el peso de la estructura será evaluado automáticamente por el software y las cargas externas constituidas por las cargas de viento y sismo de diseño con las características para Bucaramanga, Santander (Ver Anexo B) y del tipo estructural definido anteriormente.

Figura 30. Cubierta con lona de PVC.



Fuente. Cubiertas modulares con lona de PVC. Disponible en:
<http://www.logismarket.com.ar/metalcover/cubiertas-modulares-con-lona-de-pvc/1653361674-1349163488-p.html>.

7. ANÁLISIS DE LAS CONEXIONES

Al diseñar la estructura laminar es importante analizar las uniones para que el conjunto trabaje armoniosamente. Aunque hay gran variedad de conexiones en función de la geometría, magnitud y forma de aplicar las cargas estas deben cumplir con los requisitos del reglamento NSR-10 para elementos metálicos, teniendo la capacidad de resistir momentos flectores, cortantes, efectos de torsión y de cargas axiales.

De la variedad de conexiones conocidas se seleccionó un tipo de conexión que admite asegurar las restricciones de rotación y que permite la interconexión de los elementos o láminas de la estructura, siendo al mismo tiempo sencilla de construir por medio de dos placas metálicas que se suelda una a la otra. Además de ello es posible adicionar una placa circular metálica que le proporcione mayor rigidez a la unión como se muestra en la Figura 31. La conexión presenta una combinación de pernos con soldadura, que brinda la seguridad de mantener las restricciones supuestas de desplazamiento y rotación asumiendo que los elementos se comportaran de manera continua. (Ver Figura 32 y 33)

Figura 31. Diseño conceptual de la conexión, compuesta por tres placas metálicas.

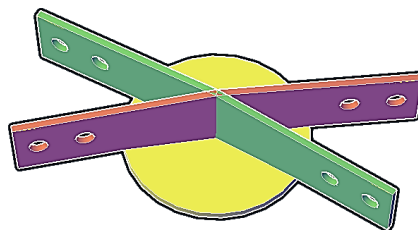


Figura 32. Detalle de la placa metálica para la conexión, vista frontal, dimensiones en mm.

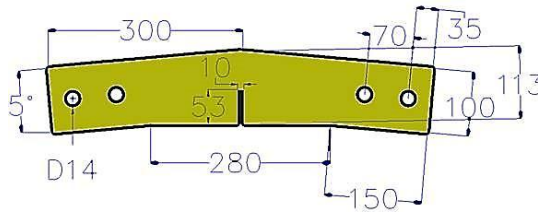
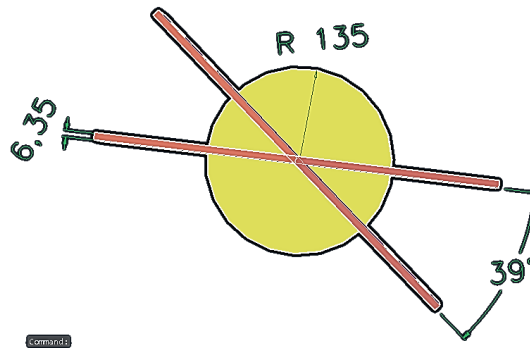


Figura 33. Detalle de la conexión vista superior, dimensiones en mm.



El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente permite instalar pernos de alta resistencia apenas ajustados en conexiones estructurales que se encuentren sometidos a fuerza axial o fuerza cortante, o a una combinación de las dos, actuando en un plano de su sección recta, durante el diseño los pernos tienen requisitos de instalación en función del tipo diámetro, para el caso se analizaron pernos ASTM A325 de diámetro 12,7 mm [$1/2$ "] con mínima tensión de 53 kN [Tabla F.2.10.3-1 NSR-10], diámetro de perforación estándar de 14,3 mm [Tabla F.2.10.3-3 NSR-10], distancia mínima de 19,1 mm [Tabla F.2.10.3-4 NSR-10] y máxima [12 veces el espesor de la parte conectada, sin exceder 150 mm] al borde de la placa. Por lo tanto, se debe chequear el perno con los requerimientos de resistencia última. Como la conexión combina elementos soldados, estas soldaduras se deben diseñar teniendo en cuenta los requisitos de la NSR-10.

Definidos los elementos se puede aplicar el tipo de soldadura en este caso de filete y placa de 6,35 mm o $\frac{1}{4}$ ", para espesor mínimo de soldadura 3 mm [Tabla F.2.10.2-4 NSR-10] y máximo de 4,7 mm siguiendo análisis para resistencia última (Ver Anexo F).

8. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA CUBIERTA.

A partir del modelo creado en *Grasshopper* (ver sección 2) con la programación mostrada anteriormente, se muestra claramente la interacción y dependencia entre el radio y la longitud del semicilindro a ser construido. A su vez, se puede variar la cantidad de divisiones en cada proyección de eje. Igualmente, en uno de los paneles se observa la lista que representa la cantidad de líneas creadas con datos de las mismas como longitud. En otro panel se muestra el ángulo “ α ” entre líneas en unidades de radianes. La extracción de las líneas se debe hacer por medio del parámetro *LINE*, creando una capa con todos los segmentos de líneas y así después exportarlas como un archivo de intercambio de dibujo de AutoCAD (*.dxf). El dibujo se muestra en la ventana de *Rhinoceros* automáticamente una vez se cambian las divisiones en la extensión.

Este tipo de archivo se puede importar al software de análisis estructural *SAP2000* para realizar el análisis de carga de viento, peso propio y el producido por el sismo con base en el espectro de diseño especificado en el reglamento NSR-10 (Ver Anexo B), para el tipo y ubicación definidos. Una vez ingresadas las combinaciones de carga dispuestas por el mismo reglamento, se escoge el resultado producto de la envolvente de cargas para obtener la situación más crítica para carga axial y momento. Este resultado se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la envolvente de cargas máximas para la estructura (sección 100 mm x 100 mm).

Axial	0.7930	-13.6950	[kN]
Torsión	1.6640	-2.0011	[kN-m]
Cortante 2-2	1.6410	-1.6390	[kN]
Cortante 3-3	2.8400	-2.9760	[kN]
Momento 2-2	9.8096	-4.3179	[kN-m]
Momento 3-3	3.6047	-4.2699	[kN-m]

Con estos valores y los esfuerzos obtenidos por el ensayo de laboratorio, se procede a dimensionar los elementos con el objetivo de lograr una sección transversal lo menor posible, usando las siguientes ecuaciones para determinar las áreas de los elementos:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad Ec \ 1$$

$$\sigma = \frac{M*Y}{I} \quad Ec \ 2$$

Dónde:

P: Carga axial.

A: Área de la sección transversal del elemento.

M: Momento actuante.

Y: Distancia desde el eje neutro a la fibra más externa.

σ : Esfuerzo de proporcionalidad.

I: Inercia de la sección transversal.

Se asumieron secciones transversales cuadradas y sus valores, para cada acción, se determinaron de la siguiente forma:

a) Producto de la acción de la carga axial y el esfuerzo experimental menor de las probetas a compresión.

$$A_{Axial} = \frac{P}{\sigma_c} = \frac{13695 \text{ N}}{20 \text{ MPa}} = 684.75 \text{ mm}^2$$

b) Producto da la acción del momento y el esfuerzo mayor experimental, anotando que en comparación con el esfuerzo crítico de la norma este es menor, nuevamente garantizando seguridad.

$$A_{Momento} = \frac{1}{\frac{\sigma^4}{6 * M^3}}$$

$$A_{Momento} = \frac{1}{\frac{73.5 \text{ MPa}^4}{6 * 9809.6 \text{ N}^3}} = 7436.24 \text{ mm}^2$$

Al obtener la sección transversal se deben chequear requisitos del reglamento NSR-10, definidos en el *Título G.4 Estructuras de madera y estructuras de guadua* (Ver Anexo E). Para un esfuerzo actuante menor al esfuerzo admisible en tensión y para una carga axial a compresión actuante menor a la carga admisible (las verificaciones de cortante y otros detalles se pueden consultar en el Anexo E).

Basado en la conexión propuesta anteriormente (ver Figura 31), se realizó el chequeo para el diseño de las placas, teniendo en cuenta efectos de flexión, cortante, aplastamiento y desgarramiento (Ver Anexo F). Seguidamente, se verificó que los pernos resistan las cargas respectivas o fuerzas a los cuales serán sometidos, estableciendo el diámetro, longitud y fuerza mínima de tensado. Al conectar las placas se establece el espesor del cordón de soldadura en función del espesor de las placas y las cargas actuantes en la conexión. Una vez realizado el ensamble de la conexión esta se acomoda en los elementos de madera para

disponerlos en la estructura, teniendo en cuenta que, a nivel constructivo la estructura se debe soportar en cada nodo, mientras es construida en su totalidad. Para finalizar el ensamble, se recomienda descargar la estructura para que esta se mantenga por sí misma, todo ello con el fin de evitar fallas y/o daños en los elementos mientras se desarrolla el proceso constructivo.

En *AutoCAD* se importa el archivo con la estructura para comenzar los dibujos de los elementos y de las conexiones con mayor detalle, estableciendo las características de corte, perforaciones, inclinaciones y espesores, haciéndolos más perceptibles a la vista del constructor, incluyendo las características y recomendaciones para los materiales y elementos a usar. (Ver Anexo G).

9. CONCLUSIONES

- Durante el proceso de obtención de los módulos de elasticidad se observó gran desviación entre las cargas soportadas y también en los módulos de elasticidad, consecuencias debidas principalmente a la variación del corte de la probeta, la dificultad de obtener una sección de madera madura sin defectos internos por desviación del grano.
- Las probetas durante el proceso de carga a compresión presentaron abultamiento producto de la falla, aunque es de destacar que sometida a fuerzas de compresión mientras no produzca desgarre en su totalidad esta seguirá soportando carga, sin embargo se observó en probetas donde hubo desgarramiento de sección paralelo a las fibras una reacción explosiva, por seguridad del operario y de las maquinas alrededor, no se ensayó una de las probetas, debido a la gran cantidad de fuerza axial a compresión soportada por la probeta 1, para una sección transversal de 50x50 mm, llegando aproximadamente a 198.6 kN en su máximo. En lo que se refiera a probetas de tensión, un comportamiento más uniforme fue observado en las probetas de sección rectangular, cuya característica mostrada en la *Figura 13* evidenció una disposición similar al comienzo de la misma, manteniendo una tendencia en la pendiente que representa el módulo de elasticidad (E).
- Una vez efectuado el análisis se pudo observar que las secciones críticas se presentan en los elementos cercanos a los apoyos e inclusive los elementos que salen de los apoyos debido a su característica de empotramiento principalmente, en tanto el análisis efectuado se realizó asumiendo la envolvente de cargas, siendo una de las razones del aumento de las secciones transversales de estos elementos de madera y las longitudes de los elementos

cercanos a tres metros que incide en las divisiones en la dirección “Y” de estudio, evitando desperdicios del material en coherencia con el factor ambiental y en función de las dimensiones comerciales.

- El dimensionamiento de las láminas de madera en función de los esfuerzos producto de la envolvente de carga asegura una sección de área aproximada de 7500 mm^2 , por lo tanto la sección transversal cuadrada de 100 mm es capaz de soportar los esfuerzos internos para los cuales es requerida, inducidos principalmente por el momento.
- Al definir la cubierta con forma semicircular para cubrir una planta de 25 metros de ancho por 40 metros de profundidad, el ángulo β favorable es de aproximadamente 40° grados entre láminas, debido a que se generan menores valores para los fenómenos de carga axial, momento y cortante.
- Para las conexiones se debe emplear una dimensión mayor de placas a la requerida por análisis debido a razones constructivas.
- Teniendo en cuenta que el primer objetivo específico de este trabajo hace referencia a: Determinar en el laboratorio las propiedades mecánicas del *Clathrotropis brunnea* Amshoff – Sapán (curva esfuerzo - deformación) y basados en los resultados de cada ensayo que involucra carga contra desplazamiento axial, se crean las curvas de esfuerzo –deformación, mostradas el *Figura 10* para probetas a tensión de sección circular, *Figura 13* para probetas a tensión de sección rectangular y *Figura 16* para probetas a compresión, por ende se da por concluido el objetivo con los módulos de elasticidad (E) promedio, mostrados en la *Tabla 1* para probetas a tensión y en la *Tabla 2* para probetas a compresión.

- En lo referente al segundo objetivo específico, Caracterizar la estructura laminar a ser diseñada (geometría, ángulos y unidades estructurales), se muestra el procedimiento desarrollado para obtener de forma automática, la geometría de la estructura final en la sección 2 definición de geometría usando *Rhinoceros* y la sección 4 Procedimiento de análisis de la cubierta. Estas secciones, definen un proceso que permite al diseñador analizar de forma rápida diversas configuraciones geométricas y por lo tanto definir con detalle la influencia del ángulo β , y del número de unidades (divisiones) en la respuesta estructural del sistema. Por último el tercer objetivo específico comprende definir un procedimiento de diseño y análisis para uniones, donde se tuvo en cuenta la rigidez y restricciones de rotación en los nodos, por tal motivo se plantea un tipo en común de conexión en la sección 5 y en las *Figuras 31, 32 y 33*, diseñado en concordancia con los apartes del Reglamento NSR-10 para estructuras metálicas (ver *Figuras 32 y 33*).
- Por último este proyecto no incluye, estudio de factibilidad, ensayos para madera diferentes al de tensión y compresión paralelo a las fibras y finalmente no se presenta el análisis estadístico para los ensayos realizados

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Calil Junior, Carlito; Molina, Julio Cesar. *Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo*. São Paulo, Pini, 2010. ISBN 978-85-7266-224-6.

[2] Dos Santos, Núbia. *Estruturas lamelares de madeira para coberturas*. Director: Dr. Carlito Calil Junior. Universidade de São Paulo, 1999.

BIBLIOGRAFÍA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Projeto de estruturas de madeira (NBR 7190)*. Agosto 1997.

Calil Junior, Carlito; Molina, Julio Cesar. *Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo*. São Paulo, Pini, 2010. ISBN 978-85-7266-224-6.

Cárdenas L., Dairon y Salinas, Nelson R. *Libro rojo de plantas de Colombia. Especies maderables amenazadas*. Bogotá D.C., Colombia, febrero 2006.
Disponibile en:
<http://senaintro.blackboard.com/bbcswebdav/users/1130585219/LibroRojoMaderables.pdf> [Consulta: 26 de agosto de 2014]

Dos Santos, Núbia. *Estruturas lamelares de madeira para coberturas*. Director: Dr. Carlito Calil Junior. Universidade de São Paulo, 1999.

Pontificia Universidad Javeriana Bogotá D.C., Colombia. Listado de precios 2014.
Disponibile en: http://puj-portal.javeriana.edu.co/portal/page/portal/Facultad%20de%20Ingenieria/1pdf_dept_o_civil/PRECIOS_FEBRERO_2014.pdf [Consulta: 19 de julio de 2014]

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá D.C., Colombia. Marzo de 2010.

Título A – Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente.

Título B – Cargas.

Título G – Estructuras de madera y estructuras de guadua.

Título F – Estructuras metálicas.

Pernos estructurales - Pernos A325 tipo 1 - pernos A325 tipo 3, Pernos A490 - A490 revestidos. Disponible en: http://www.gumpertz.cl/pernos_a325_a490.html
[Consulta: 17 de abril de 2015]

ANEXOS

ANEXO A. Resultados caracterización mecánica de la madera (Sapán) generados por la máquina de ensayos avanzados MTS.

Figura 1 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 1 sección circular.

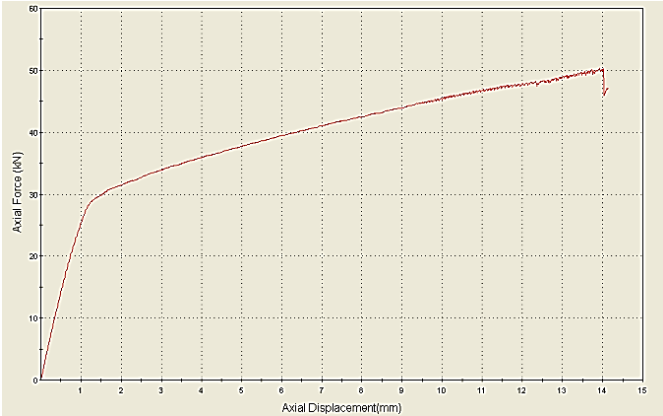


Figura 2 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 2 sección circular.

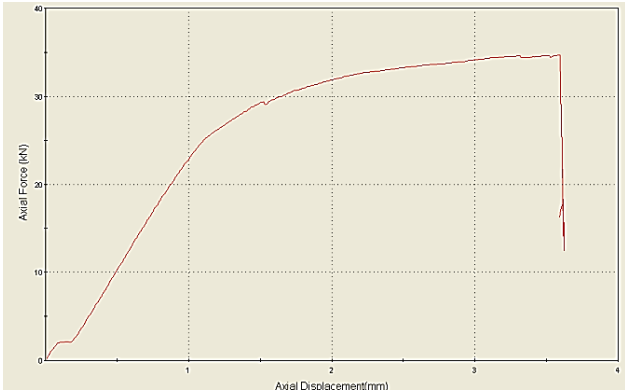


Figura 3 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 3 sección circular.

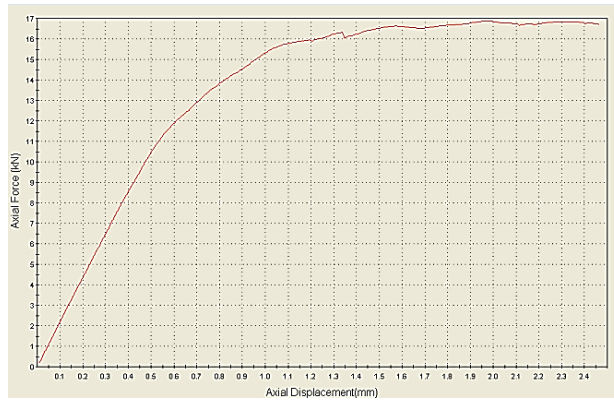


Figura 4 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 4 sección circular.

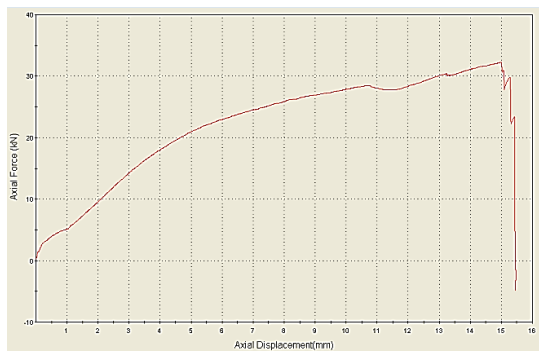


Figura 5 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 5 sección circular.

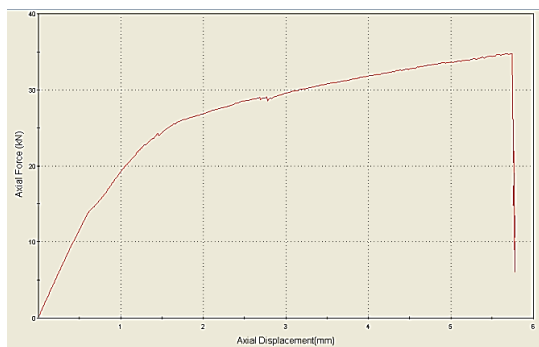


Figura 6 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 1 sección rectangular.

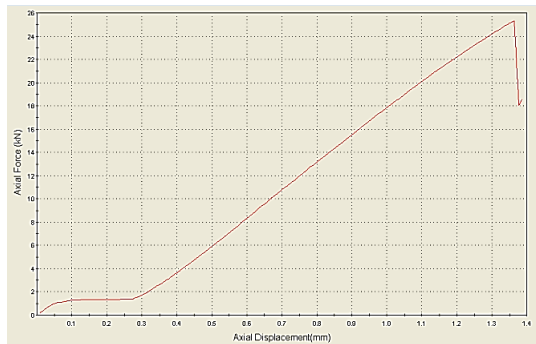


Figura 7 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 2 sección rectangular.

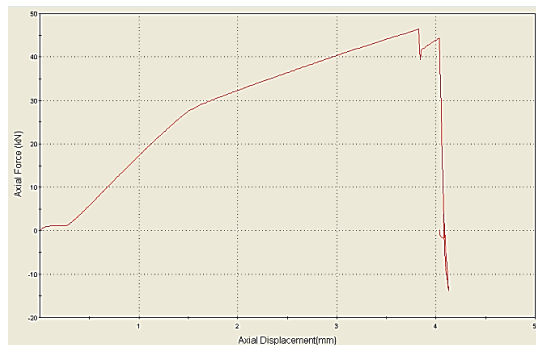


Figura 8 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 3 sección rectangular.

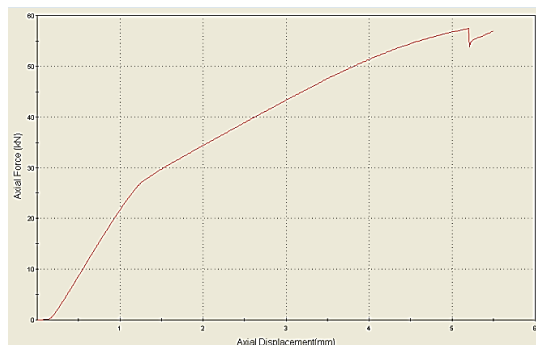


Figura 9 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 4 sección rectangular.

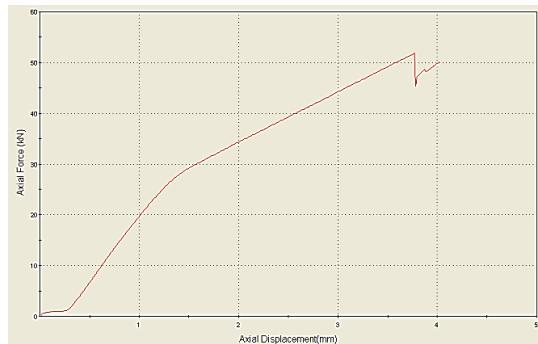


Figura 10 A1. Gráfica de tracción paralela a las fibras, probeta 5 sección rectangular.

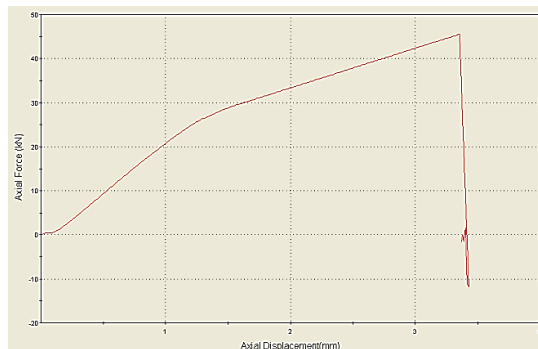


Figura 11 A1. Gráfica de compresión paralela a las fibras, probeta 1 sección rectangular.

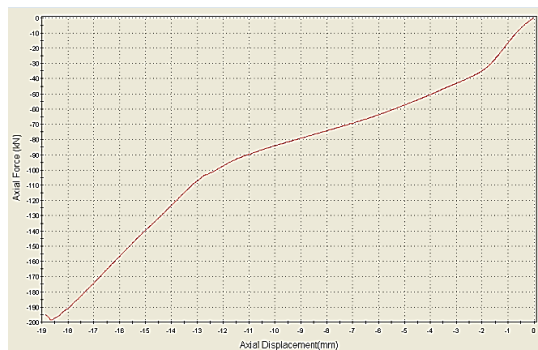


Figura 12 A1. Gráfica de compresión paralela a las fibras, probeta 2 sección rectangular.

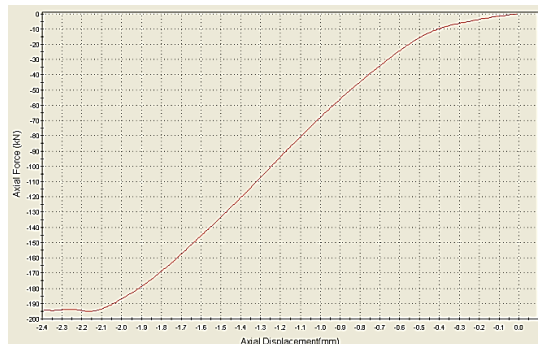


Figura 13 A1. Gráfica de compresión paralela a las fibras, probeta 5 sección rectangular.

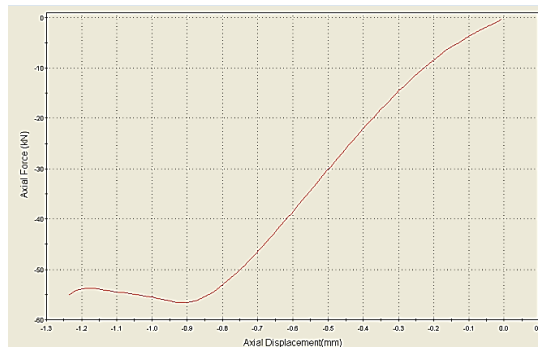
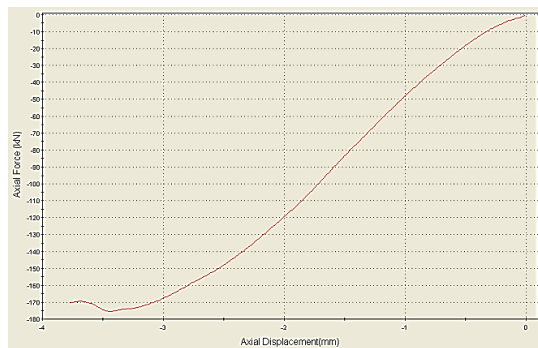


Figura 14 A1. Gráfica de compresión paralela a las fibras, probeta 5-1 sección rectangular.

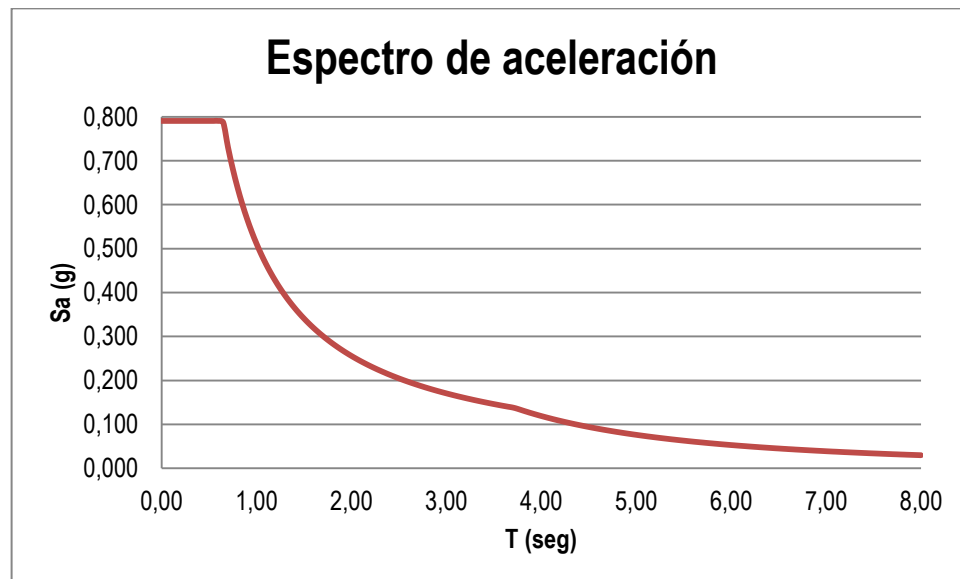


ANEXO B. Parámetros de diseño sísmico.

Tabla 1 A2. Datos de entrada para crear el espectro de diseño.

Coefficiente de aceleración	Aa	0.25
Coefficiente de velocidad	Av	0.25
Coefficiente de importancia	I	1.1
Coefficiente de ampliación que afecta la aceleración en zona de periodos cortos	Fa	1.15
Coefficiente de ampliación que afecta la aceleración en zona de periodos intermedios	Fv	1.55
Periodo de vibración de inicio de zona de aceleraciones constantes	To	0.1348
Periodo de vibración, zona de transición aceleraciones constantes para periodos cortos y la parte descendente del mismo	Tc	0.6470
Periodo de vibración de inicio de zona de desplazamientos constantes.	TL	3.7200

Figura 1 A2. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de gravedad.



ANEXO C. Datos de las probetas para los ensayos.

Tabla 1 A3. *Tabla de datos para probetas a compresión paralela a las fibras.*

Probetas a compresión						
Numero	Dimensionamiento					Peso [gramos]
	Base superior		Base inferior		Alto [mm]	
	Ancho [mm]	Profundo [mm]	Ancho [mm]	Profundo [mm]		
1	48.17	48.04	47.96	47.86	151.51	346
2	47.9	47.94	47.8	48.01	151.34	339
3	47.9	47.89	48.18	47.86	151.2	345
4	47.64	48.03	48	48.32	151.22	340
5	47.92	47.99	47.55	48.04	151.29	342

Tabla 2 A3 *Tabla de datos para probetas a tensión paralela a las fibras, sección circular.*

Probetas circulares a tensión				
Numero	Diámetro 1 [mm]	Diámetro 2 [mm]	Diámetro 3 [mm]	Peso [gramos]
1	19.32	19.69	20.28	228
2	18.71	19.11	19.57	214
3	20.35	20.74	20.34	225
4	19.9	19.78	19.43	220
5	20.36	20.33	20.72	231

Tabla 3 A3 *Tabla de datos para probetas a tensión paralela a las fibras, sección rectangular.*

Probetas rectangulares a tensión							
Numero	Dimensionamiento						Peso [gramos]
	Superior		Intermedia		inferior		
	Base [mm]	Espesor [mm]	Base [mm]	Espesor [mm]	Base [mm]	Espesor [mm]	
1	48.67	7.45	48.52	6.58	48.79	7.41	346
2	47.56	7.34	47.33	7.05	47.53	7.85	339
3	47.86	7.71	47.8	6.78	48.18	7.78	345
4	48.47	7.42	48.52	7.5	48.86	7.47	340
5	48.5	6.52	48.45	6.57	48.49	7.21	342

ANEXO D. Resultados Análisis estructural sección 50 x 100 mm.

Tabla 1 A4. *Tabla de resultados para los ángulos estudiados con 16 divisiones en dirección “Y”, usando sección de 50x100 mm.*

V=16	Grados	30	40	45	60	
	Carga	3.49	4.69	5.33	7.28	KN
	Axial	-48.6682	-71.9648	-80.4608	-121.2028	KN
	Torsión	1.8795	3.6668	4.2830	7.3476	KN-m
		-1.8795	-3.6668	-4.2830	-7.3476	
	Cortante 2-2	7.2828	9.2140	10.7504	19.7001	KN
		-7.2828	-9.2866	-10.7504	-19.7001	
	Cortante 3-3	5.6051	6.9797	9.7915	14.1327	KN
		-5.6051	-8.3258	-9.7915	-14.1327	
	Momento 2-2	9.7026	14.7628	17.6553	26.6468	KN-m
-9.7026		-14.7628	-17.6553	-26.6468		
Momento 3-3	12.4326	15.4489	16.6811	21.5699	KN-m	
	-10.6159	-16.4920	-20.1890	-32.9712		

Tabla 2 A4. *Tabla de resultados para los ángulos estudiados con 14 divisiones en dirección “Y”, usando sección de 50x100 mm.*

V=14	Grados	30	40	45	60	
	Carga	3.65	6.10	6.93	9.53	KN
	Axial	-55.9794	-75.2100	-88.7922	-126.3152	KN
	Torsión	2.8523	4.3984	5.6613	10.1245	KN-m
		-2.8523	-4.3984	-5.6613	-10.1245	
	Cortante 2-2	7.1673	10.8480	12.2045	22.0764	KN
		-7.2238	-10.8908	-12.1155	-22.0764	
	Cortante 3-3	5.4293	9.1446	10.7504	15.6036	KN
		-6.4754	-9.1446	-10.7504	-15.6036	
	Momento 2-2	11.4836	16.9569	20.2245	30.7180	KN-m
-11.4836		-16.9569	-20.2245	-30.7180		
Momento 3-3	12.0173	19.4247	21.5274	27.7312	KN-m	
	-13.4623	-21.2838	-26.1986	-40.7370		

Tabla 3 A4. Tabla de resultados para los ángulos estudiados con 12 divisiones en dirección “Y”, usando sección de 50x100 mm.

V=12	Grados	30	40	45	60	
	Carga	6.20	8.30	9.40	13.12	KN
	Axial	-54.6870	-79.4880	-86.2150	-134.0370	KN
	Torsión	2.9660	5.5468	5.9980	11.0540	KN-m
		-2.9660	-5.5468	-5.9980	-11.0540	
	Cortante 2-2	9.5920	12.9430	14.3830	25.2850	KN
		-9.8440	-12.8880	-14.3830	-25.2850	
	Cortante 3-3	6.6470	10.1170	11.8790	17.5140	KN
		-6.6470	-10.1170	-11.8790	-17.5140	
	Momento 2-2	12.9795	20.0129	23.7520	36.5263	KN-m
-12.9795		-20.0129	-23.7520	-36.5263		
Momento 3-3	16.4301	24.8774	27.4959	36.9868	KN-m	
	-16.0935	-21.4820	-29.4315	-54.2322		

Tabla 4 A4. Tabla de resultados para los ángulos estudiados con 10 divisiones en dirección “Y”, usando sección de 50x100 mm.

V=10	Grados	30	40	45	60	
	Carga	8.60	11.70	13.30	18.30	KN
	Axial	-52.5260	-75.9250	-89.3370	-149.8210	KN
	Torsión	3.5502	7.0853	9.3098	16.7405	KN-m
		-3.5502	-7.0853	-9.3098	-16.7405	
	Cortante 2-2	10.8480	14.9470	17.4780	26.7970	KN
		-10.8480	-14.9470	-16.8710	-22.6440	
	Cortante 3-3	6.8030	10.8940	12.9790	18.8580	KN
		-6.8030	-10.8940	-12.9790	-18.8580	
	Momento 2-2	14.7894	23.7196	28.4408	42.4320	KN-m
-14.7894		-23.7196	-28.4408	-42.4320		
Momento 3-3	24.4193	32.2781	36.0615	50.6412	KN-m	
	-18.0036	-29.1876	-37.1608	-74.0068		

Tabla 5 A4. *Tabla de resultados para los ángulos estudiados con 8 divisiones en dirección “Y”, usando sección de 50x100 mm.*

V=8	Grados	30	40	45	60	
	Carga	12.70	17.50	18.30	27.90	KN
	Axial	-55.2780	-85.6910	-93.2670	-141.0410	KN
	Torsión	4.1761	9.6622	11.5585	24.1208	KN-m
		-4.1761	-9.6622	-11.5585	-24.1208	
	Cortante 2-2	10.9210	17.1490	18.4840	30.7750	KN
		-10.9210	-16.4130	-17.3210	-26.2030	
	Cortante 3-3	6.4400	11.3670	12.4970	20.4290	KN
		-6.4400	-11.3670	-12.4970	-20.4290	
	Momento 2-2	16.6399	28.8638	31.6770	57.9109	KN-m
-16.6399		-28.8638	-30.7646	-57.9109		
Momento 3-3	28.8667	40.9706	42.7955	69.3652	KN-m	
	-20.8915	-39.5048	-45.6596	-118.3040		

Nota: 2-2, 3-3, hacen referencia a los ejes locales de los elementos

ANEXO E. Chequeo de las láminas de madera.

Durante el chequeo de las láminas de madera se tuvo en cuenta los requisitos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en su Título G *Estructuras de madera y estructuras de guadua*; en sus apartados correspondientes para este proyecto.

G.2.2 Método de diseño estructural

G.2.2.1 El diseño de estructuras de madera se hará por el método de los esfuerzos admisibles y el presente Título G contiene provisiones para su utilización.

G2.2. Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad

De acuerdo a los módulos de elasticidad obtenidos por medio de las pruebas en laboratorio, los resultados son: $E_{Tc} = 11527.90 \text{ MPa}$, $E_{TR} = 10122.59 \text{ MPa}$ y $E_C = 5834 \text{ MPa}$. Según el reglamento NSR-10, los esfuerzos máximos se dan de acuerdo a los módulo de elasticidad, (Tabla G.2.2-2, NSR-10), lo que se hizo fue utilizar módulos de elasticidad correspondiente al grupo ES5, el cual corresponde a los valores más aproximados a los obtenidos por el ensayo de laboratorio.

Tabla G.2.2-1
Esfuerzos Admisibles, F_i , (MPa) C.H = 12%

GRUPO	F_b Flexión	F_t Tensión	F_c Compresión	F_p Compresión \perp	F_v Cortante
ES1	29.5	21.0	23.0	6.0	2.0
ES2	28.5	20.0	22.0	4.3	2.0
ES3	23.0	17.0	19.0	3.8	1.6
ES4	17.0	12.0	15.0	2.8	1.5
ES5	15.0	11.0	13.0	2.0	1.1
ES6	12.5	9.0	10.0	1.5	1.3

Tabla G.2.2-2
Módulos de Elasticidad Longitudinal, E_i , (MPa)
CH = 12%

GRUPO	Módulo Promedio $E_{0.5}$	Módulo 5° Percentil $E_{0.05}$	Módulo Mínimo E_{min}
ES1	18 000	13 250	7 130
ES2	18 000	13 250	7 130
ES3	14 000	11 000	5 500
ES4	12 500	10 000	5 000
ES5	11 200	8 250	4 435
ES6	9 000	6 500	3 564

Tabla G.2.2-10

Coefficientes de modificación para madera aserrada seleccionada visualmente

Coeficientes	C_D Duración carga					C_m Humedad CB%		C_t Temperatura °C					C_L Estabilidad vigas	C_F Forma	C_{fu} Colocación cara ancha	C_{in} Inciación	C_r Acción conjunta	C_p Estabilidad columnas	C_T Rigidez pandeo	C_b Soporte	C_e Corte			
	Permanente	2 meses	7 días	Viento y sismo	Impacto	CH ≤ 12% Seca	CH > 19% Húmeda	≤ 37.8			37.8 < t < 61.7											61.7 ≤ t < 85		
								$\frac{A}{CH} \geq 0.5$	$\frac{A}{CH} < 0.5$	$\frac{A}{CH} \geq 0.5$	$\frac{A}{CH} < 0.5$	$\frac{A}{CH} \geq 0.5$										$\frac{A}{CH} < 0.5$		
$F'_b = F_b \times$	0.90	1.15	1.25	1.6	2.0	1	0.75	1	0.7	0.8	0.5	0.7	1.0	G.3.3.4.4	Tablas G.3.3-1 G.3.3-2									
$F'_t = F_t \times$	0.90	1.15	1.25	1.6	2.0	1	0.75	1	0.9	0.9	0.9	0.9	-	-	G.3.3.2.1	Tabla G.3.3-3	0.80	1	1	-	-	-	-	-
$F'_c = F_c \times$	0.90	1.15	1.25	1.6	2.0	1	0.80	1	0.7	0.8	0.5	0.7	-	-	-	-	0.80	1	1	-	-	-	-	-
$F'_p = F_p \times$	0.90	1.15	1.25	1.6	2.0	1	0.70	1	0.7	0.8	0.5	0.7	-	-	G.3.3.2.1	-	0.80	1.15	1	G.4.3.5	-	-	-	-
$F'_v = F_v \times$	-	-	-	-	-	1	0.80	1	0.7	0.8	0.5	0.7	-	-	-	-	1	1	1	-	-	Tabla G.3.5.1	-	-
$E'_{0.5} = E_{0.5} \times$	-	-	-	-	-	1	0.80	1	0.9	0.9	0.9	0.9	-	-	-	-	0.95	-	-	-	-	-	-	Tabla G.3.2-2
$E'_{0.05} = E_{0.05} \times$	-	-	-	-	-	1	0.80	1	0.9	0.9	0.9	0.9	-	-	-	-	0.95	-	-	-	-	-	-	-
$E'_{min} = E_{min} \times$	-	-	-	-	-	1	0.80	1	0.9	0.9	0.9	0.9	-	-	-	-	0.95	-	-	-	-	-	-	-

G.3.4. Cortante

G.3.4.2 Esfuerzo cortante paralelo a las fibras (f_v) En cualquier sección transversal del miembro a flexión, no excederá el valor del esfuerzo admisible modificado paralelo a las fibras para cortante (F'_v) y en vigas de sección rectangular se calculará por las fórmulas:

$$f_v = \frac{3v}{2bd} \leq F'_v$$

En donde

f_V = Esfuerzo cortante actuante, en MPa

F'_V = Esfuerzo cortante admisible modificado en **MPa** (Tabla G.2.2-10 NSR-10)

v = Fuerza cortante vertical en la sección considerada, en N (Tabla 4)

bd = Dimensiones de la sección rectangular en mm

$$f_V = \frac{3 * 2976}{2 * 100 * 100}$$

$$f_V = \mathbf{0.4464 \text{ MPa}}$$

$$F'_V = F_V * C_D * C_m * C_t * C_{in} * C_r$$

$$F'_V = 1.1 * 1.6 * 1 * 1 * 0.8 * 1$$

$$F'_V = \mathbf{1.408 \text{ MPa}}$$

$$\mathbf{0.4464 \text{ MPa} \leq 1.408 [\text{MPa}]}$$

De acuerdo a la fuerza cortante vertical sobre láminas de madera, estas deben soportar una carga actuante de 2976 N, que produce un esfuerzo cortante $f_v=0.4464 \text{ MPa}$ el cual no excede el valor del esfuerzo admisible $F'_v=1.408 \text{ MPa}$.

G.4 Diseño de elementos estructurales solicitados por fuerza axial

G.4.1.2 Los esfuerzos actuantes (f_t) y (f_c), generados por fuerzas axiales no deberán exceder los esfuerzo admisibles, de tensión paralela al grano (F_t), y compresión paralela al grano (F_c), definidos en la tabla G.2.2-1, para el grupo de madera especificado, afectado por los correspondientes coeficientes de modificación de la tabla G.2.2-10.

G.4.2 Elementos sometidos a tensión axial

G.4.2.1 El esfuerzo (f_t) a carga axial de tensión (T), no sobrepasará al esfuerzo admisible modificado a tensión paralela a la fibra (F'_t), según la siguiente fórmula:

$$f_t = \frac{T}{An} \leq F'_t$$

En donde

f_t = Esfuerzo actuante a tensión paralela al grano, en MPa

T = Fuerza axial de tensión actuante, en N. (Tabla 4)

An = Área neta de la sección en mm

F'_t = Esfuerzo admisible modificado de tensión paralela al grano en MPa (Tabla G.2.2-10)

$$f_t = \frac{793}{100 * 100}$$

$$f_t = \mathbf{0.0793 \text{ MPa}}$$

$$F'_t = F_t * C_D * C_m * C_t * C_{in} * C_r$$

$$F'_t = 11 * 1.6 * 1 * 1 * 0.8 * 1$$

$$F'_t = \mathbf{14.08 \text{ MPa}}$$

$$\mathbf{0.0793 \text{ MPa} \leq 14.08 [\text{MPa}]}$$

La carga axial a tensión que debe soportar la lámina es de 793 N, produciendo un esfuerzo axial a tensión paralelo al grano $f_t=0.0793$ MPa, mientras el esfuerzo admisible a tensión es $F'_t=14.08$ MPa; garantizando que la lámina soporta la carga a tensión para la cual es solicitada.

G.4.3 Elementos sometidos a compresión axial

De acuerdo con la clasificación de las columnas dadas en G.4.3.1.1 el comportamiento de los elementos tipo columnas es el correspondiente a una columna simple sólida.

G.4.3.2 Longitud efectiva la longitud efectiva de una columna puede calcularse con la fórmula:

$$l_e = k_e * l_u$$


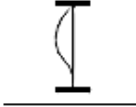





En donde:

l_e = Longitud efectiva en mm

k_e = Coeficiente de longitud efectiva, según lo determinado en la tabla G.4.3-1

l_u = Longitud no soportada lateralmente de la columna en la dirección considerada en mm

Tabla G.4.3-1
Coeficientes de longitud efectiva de columna k_e

Condición de los apoyos	Gráficos	k_{e1}	k_{e2}
Empotrados en ambos extremos (1)		0.50	0.65
Impedido de desplazarse en ambos extremos y uno de ellos impedido de rotar (2)		0.70	0.85
Articulado en ambos extremos (3)		1.00	1.00
Empotrado en un extremo y el otro impedido de rotar pero libre de desplazamiento (4)		1.00	1.20
Empotrado en un extremo y el otro parcialmente libre de rotar y libre de desplazamiento (5)		1.50	1.50
Articulado en un extremo y el otro impedido de rotar pero libre de desplazamiento (6)		2.00	2.40
Empotrado en un extremo y el otro libre de rotar y libre de desplazamiento (7)		2.00	2.10

k_{e1} teórico



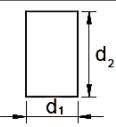
k_{e2} recomendado cuando las condiciones ideales son aproximadas

$$l_e = 0.5 * 2700$$

$$l_e = 1350 \text{ mm}$$

G.4.3.4 Relación de esbeltez (λ) En el diseño de columnas de madera, se considera como medida de esbeltez la definida por la fórmula:

Tabla G.4.3-2
Relación de esbeltez λ

Sección transversal				Cualquier sección
λ	$\frac{l_e}{0.866D}$	$\frac{l_e}{d}$	$\frac{l_{e1}}{d_1} \frac{l_{e2}}{d_2}$	$\frac{l_e}{r\sqrt{12}}$

En donde

λ = Medida de esbeltez. Debe ser $\lambda \leq 50$, excepto durante la construcción que podrá ser $\lambda \leq 75$

l_e = Longitud efectiva de la columna en la dirección considerada, en mm

r = Radio de giro de la sección en mm

d_1, d_2 = Dimensiones de la sección transversal en la dirección considerada, en mm

D = Diámetro de la sección circular, en mm

I = Inercia de la sección transversal

A = Área de la sección transversal

$$\lambda = \frac{l_e}{d} = \frac{1350}{100}$$

$$\lambda = 13.5$$

G.4.3.5 Coeficiente de estabilidad de columnas C_p . El coeficiente de estabilidad para columnas, C_p debe ser calculado según la fórmula:

$$C_p = \frac{1 + \frac{F_{CE}}{F_C^*}}{2C} - \frac{1 + \frac{F_{CE}}{F_C^*}}{2C} - \frac{F_{CE}}{C} \frac{F_C^*}{F_C^*}$$

F_C^* = Esfuerzo admisible de compresión paralelo al grano, multiplicado por todos los factores de modificación, excepto (C_p)

F_{CE} = Esfuerzo critico. Véase tabla G.4.3-3.

En donde




le = Longitud efectiva de la columna en la dirección considerada, en mm

r = Radio de giro de la sección en mm

E'_{min} = Módulo de elasticidad mínimo modificado, en MPa

C = Coeficiente valorizado en tabla G.4.3-3

Tabla G.4.3-3
Valores de C y de F_{CE} Esfuerzo critico

	Madera aserrada			Madera rolliza	Madera laminada
Sección			Cualquier sección		Laminada
C	0.80	0.80	0.80	0.85	0.90
F_{CE}	$\frac{0.822E'_{min}}{\lambda^2}$	$\frac{0.822E'_{min}}{\lambda_{1.2}^2}$	$\frac{\pi^2 E'_{min}}{(\ell_e/r)^2}$	$\frac{0.822E'_{min}}{\lambda^2}$	$\frac{0.822E'_{min}}{\lambda^2}$

$$F_{CE} = \frac{0.822E'_{min}}{\lambda^2}$$

$$F_{CE} = \frac{0.822 * 4435}{13.5^2}$$

$$F_{CE} = 20.0032 \cong F_{CE} = 20 \text{ MPa}$$

$$F_C^* = F_C * C_D * C_m * C_t * C_{in} * C_r$$

$$F_C^* = 13 * 1.6 * 1 * 1 * 0.8 * 1.15$$

$$F_C^* = 19.136 \text{ MPa}$$

$$C_p = \frac{1 + \frac{20}{2 * 0.8} \frac{19.136}{19.136}}{1 + \frac{20}{2 * 0.8} \frac{19.136}{19.136} + \frac{20}{0.8} \frac{19.136}{19.136}}$$

$$C_p = 0.7060$$

G.4.3.6 Cargas admisibles La carga admisible de una columna con carga axial centrada, será calculada con la siguiente fórmula:

$$P_a = F'_C An$$

En donde

P_a =Fuerza o carga admisible de la columna en N

An =Área neta de la columna en mm²

F'_C =Esfuerzo admisible modificado a compresión paralela al grano en MPa

$$F'_C = C_p F_C^*$$

$$F_C^* = 19.136 \text{ MPa}$$

$$F'_C = 0.7060 * 19.136$$

$$F'_C = 13.51 \text{ MPa}$$

$$P_a = 13.51 * 100 * 100 = 135100.16 \text{ N}$$

$$P_a = 135.1 \text{ kN}$$

La carga axial a compresión que se ejerce sobre las láminas es de 13.695 kN y la carga admisible de la columna es de 135.1 kN, por consiguiente la lámina soporta satisfactoriamente la carga a la cual es solicitada.

ANEXO F. Chequeo de la conexión.

Placas metálicas

F.2.10.4 Elementos afectados de los miembros conectados y elementos de conexión

F.2.10.4.1 Resistencia de elementos a tensión. La resistencia de diseño ϕR_n , de los elementos afectados de los miembros y de los elementos de conexión solicitados por tensión será el menos entre los valores obtenidos para los estados limites de fluencia por tensión y rotura por tensión.

a) Para fluencia por tensión en elementos de conexión:

$$\phi = 0.90$$

$$R_n = F_y A_g$$

b) Para rotura por tensión en elementos de conexión:

$$\phi = 0.75$$

$$R_n = F_u A_g$$

Donde:

A_e = Área neta efectiva.

$$A_e = A_u \leq 0.85 A_g$$

$$R_n = 253 * 6.35 * 100 = 160655 \text{ N}$$

$$R_u = 0.90 * 160655 = 144589.5 \text{ N} \cong \mathbf{144.5895 \text{ kN}}$$

$$\mathbf{0.793 \text{ kN} \leq 144.5895 \text{ kN} [OK]}$$

$$R_u = 0.75 * 160655 = 120491.25 \text{ N} \cong \mathbf{120.4912 \text{ kN}}$$

$$\mathbf{0.793 \text{ kN} \leq 120.4912 \text{ kN} [OK]}$$

F.2.10.4.2 Resistencia de elementos a cortante La resistencia de diseño ϕR_n , de los elementos afectados de los miembros y de los elementos de conexión solicitados por cortante será el menos entre los valores obtenidos para los estados límites de fluencia por cortante y rotura por cortante.

a) Para fluencia por cortante del elemento:

$$\phi = 1.00$$

$$R_n = 0.60 F_y A_{gv}$$

Dónde:

A_{gv} =área bruta sometida a cortante, mm^2

$$R_n = 0.60 * 253 * 6.35 * 100 = 96393 \text{ N} \cong \mathbf{96.393 \text{ kN}}$$

$$R_u = 1.00 * 96.393 = \mathbf{96.393 \text{ kN}}$$

$$\mathbf{2.976 \text{ kN} \leq 96.393 \text{ kN} [OK]}$$

b) Para rotura por cortante del elemento:

$$\phi = 0.75$$

$$R_n = 0.60 F_u A_{nv}$$

Dónde:

A_{nv} =área neta sometida a cortante, mm^2

$$R_n = 0.60 * 253 * 6.35 * 100 = 96393 \text{ N} \cong \mathbf{96.393 \text{ kN}}$$

$$R_u = 0.75 * 96.393 = \mathbf{72.2947 \text{ kN}}$$

$$\mathbf{2.976 \text{ kN} \leq 72.2947 \text{ kN} [OK]}$$

F.2.10.4.3 Resistencia al desgarramiento en bloque. La resistencia de diseño ϕR_n , para el estado límite de desgarramiento en bloque a lo largo de una o más líneas de falla a cortante y de una línea de falla a tensión en dirección perpendicular, se calculará tomando:

$$\phi = 0.75$$

$$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_uA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$$

Dónde:

A_{gv} = área bruta sometida a cortante, mm^2

A_{nt} = área neta sometida a tensión, mm^2

A_{nv} = área neta sometida a cortante, mm^2

Cuando el esfuerzo de tensión sea uniforme, se tomara $U_{bs} = 1$; en caso contrario se tomará $U_{bs} = 0.5$.

$$R_n = 0.60 * 253 * 6.35 * 100 + 1 * 253 * 6.35 * 100 = 257048 \text{ N} \cong \mathbf{257.048 \text{ kN}}$$

$$R_u = 0.75 * 257.048 = \mathbf{192.786 \text{ kN}}$$

$$R_n = 0.60 * 253 * 6.35 * 100 + 1 * 253 * 6.35 * 100 = 257048 \text{ N} \cong \mathbf{257.048 \text{ kN}}$$

$$R_u = 0.75 * 257.048 = \mathbf{192.786 \text{ kN}}$$

$$\mathbf{192.786 \text{ kN} \leq 192.786 \text{ kN [OK]}}$$

F.2.10.4.4 Resistencia de elementos a compresión. La resistencia de diseño de elementos de conexión a compresión ϕR_n , para los estados límites de fluencia y pandeo se determinará como sigue:

$$\phi = 0.90$$

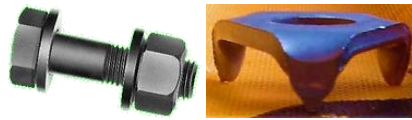
$$P_n = F_y A_g$$

$$P_n = 253 * 6.35 * 100 = 160655 \text{ N}$$

$$P_u = 0.90 * 160655 = 144589.5 \text{ n} \cong \mathbf{144.5895 \text{ kN}}$$

Conexión con pernos

Figura 1 A6. Esquema conceptual del perno y arandela.



Para la conexión los pernos serán de alta resistencia ASTM A325, debido a que en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente se establece que las juntas estructurales con pernos se deben construir con pernos de alta resistencia, los pernos que hace parte de una conexión estará sometido a fuerza axial o a fuerza cortante, o a una combinación de las dos.

F.2.10.3.1 Pernos de alta resistencia

Tabla F.2.10.3-1
Mínima Tensión de Instalación de los Pernos, kilonewtons*
Pernos con diámetro en pulgadas

Tamaño del perno mm (pulgadas)	Grupo A Pernos ASTM A325, ASTM F1852	Grupo B Pernos ASTM A490, ASTM F2280
12.7 (1/2")	53	67
15.9 (5/8")	84	107
19.1 (3/4")	125	156
22.2 (7/8")	173	218
25.4 (1")	227	285
28.6 (1 1/8")	249	356
31.8 (1 1/4")	316	454
34.9 (1 3/8")	378	538
38.1 (1 1/2")	458	658

* Igual a 0.70 veces la resistencia mínima a tensión de los pernos, redondeada al kN más cercano, como se establece en las especificaciones ASTM para pernos A325 y A490 con roscas UNC.

El perno tipo que se utiliza para la conexión corresponde a grupo A tipo ASTM A325 con un diámetro de ½” (12.7mm): Los pernos se consideran apenas ajustados debido a que estos no se espera que presenten condiciones de aflojamiento o fatiga debido a vibraciones o a fluctuaciones de carga. La resistencia normal para pernos y piezas roscadas correspondientes a los pernos grupo A (tipo A325) cuando las roscas están excluidas del plano de rosca

Tabla F.2.10.3-2
Resistencia Nominal para Pernos y Piezas Roscadas, MPa

Descripción de los conectores	Resistencia Nominal a tensión F_u (MPa)	Resistencia Nominal a Cortante en Conexiones Tipo Aplastamiento F_{uv} (MPa) ^(a)
Pernos A307	310 ^(b)	188 ^{(b),(c)}
Pernos Grupo A (tipo A325), con roscas incluidas en los planos de corte	620	372
Pernos Grupo A (tipo A325), cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	620	457
Pernos Grupo B (tipo A490), con roscas incluidas en los planos de corte	780	457
Pernos Grupo B (tipo A490), cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	780	579
Piezas roscadas que satisfacen los requisitos del numeral F.2.1.3.4, con roscas incluidas en los planos de corte	$0.75F_u$	$0.450F_u$
Piezas roscadas que satisfacen los requisitos del numeral F.2.1.3.4, cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	$0.75F_u$	$0.563F_u$

- (a) Para conexiones de extremo que tengan un patrón de perforaciones con una longitud mayor que 965 mm, F_{uv} se reducirá a un 83.3% de los valores tabulados. La longitud del patrón de perforaciones es la máxima distancia paralela a la línea de la fuerza medida sobre la línea de centros de los pernos.
- (b) Para pernos A307, los valores tabulados se reducirán en un 1 por ciento por cada 1.6 mm por encima de los 5 diámetros de longitud en el agarre.
- (c) Se aceptan roscas en los planos de corte.

F.2.10.3.2 Tamaño y condición de uso de las perforaciones

Tabla F.2.10.3-3
Dimensiones Nominales de las Perforaciones
Pernos con diámetro en pulgadas

Diámetro del Perno mm (pulg.)	Dimensiones de las Perforaciones			
	Perforación estándar mm	Perforación agrandada mm	Ranura corta (Ancho x largo) mm	Ranura Larga (Ancho x largo) mm
12.7 (1/2")	14.3	15.9	14.3 x 17.5	14.3 x 31.8
15.9 (5/8")	17.5	20.6	17.5 x 22.2	17.5 x 39.7
19.1 (3/4")	20.6	23.8	20.6 x 25.4	20.6 x 47.6
22.2 (7/8")	23.8	27.0	23.8 x 28.6	23.8 x 55.6
25.4 (1")	27.0	31.8	27.0 x 33.3	27.0 x 63.5
≥ 28.6 (≥ 1 1/8")	d + 3.2	d + 7.9	(d + 3.2) x (d + 9.5)	(d + 3.2) x (2.5 x d)

F.2.10.3.3 Espaciamiento mínimo. La distancia entre centros de perforaciones estándar, agrandadas o de ranura no podrá ser menor que 2 2/3 veces el diámetro nominal del perno, d, se recomienda usar como mínimo 3d.

$$\text{Espaciamiento mínimo} = 3 * (12.7) = \mathbf{38.1 \text{ mm}}$$

F.2.10.3.4 Distancia mínima al borde. La distancia del centro de una perforación estándar a cualquier borde de la parte conectada, en cualquier dirección, no será inferior al valor aplicable en la tabla F.2.10.3-4 o F.2.10.3-4M. La distancia del centro de una perforación agrandada o de ranura a un borde de la parte conectada no será inferior a la requerida para la perforación estándar más el incremento aplicable, C₂ de la tabla F.2.10.3-5 ,o, F.2.10.3-5M.

Tabla F.2.10.3-4
Distancia Mínima al Borde^(a), del centro de una perforación estándar^(b) al borde de la parte conectada
Pernos con diámetro en pulgadas

Diámetro del Perno mm (pulgadas)	Distancia mínima al borde mm
12.7 (½")	19.1
15.9 (5/8")	22.2
19.1 (¾")	25.4
22.2 (7/8")	28.6
25.4 (1")	31.8
28.6 (1 1/8")	38.1
31.8 (1 ¼")	41.3
mayor que 31.8 (1 ¼")	1.25 x d

- a) Se permiten distancias al borde menores que las dadas en esta tabla si se satisfacen las provisiones aplicables de los numerales F.2.10.3.10 y F.2.10.4, sin embargo no se permiten distancias menores que (1) diámetro del perno sin aprobación del diseñador estructural.
- b) Para perforaciones agrandadas o de ranura, véase la tabla F.2.10.3-5.

Tabla F.2.10.3-5
Valores del Incremento de la distancia al borde C₂
Pernos con diámetro en pulgadas

Diámetro Nominal del Conector mm (pulg.)	Perforaciones Agrandadas mm	Perforaciones de ranura		
		Ranura Perpendicular al Borde		Ranura Paralela al Borde
		Ranuras Cortas mm	Ranuras Largas ^(a)	
≤22.2 (≤7/8")	1.6	3.2	0.75d	0
25.4 (1")	3.2	3.2		
≥28.6 (≥1 1/8")	3.2	4.8		

(a) Cuando la longitud de la ranura es menor que el máximo permisible (véase la tabla F.2.10.3-3), se permite reducir el valor de C₂ en la mitad de la diferencia entre las longitudes máxima y real de la ranura.

F.2.10.3. Máximos valores de espaciamiento y distancia al borde. La distancia máxima del centro de cualquier perno al borde más próximo de las partes en contacto será igual a 12 veces el espesor de la parte conectada, sin exceder 150mm.

Distancia máxima del centro de cualquier perno al borde más próximo=
 $12 * 6,35 = 76,2 \text{ mm}$

F.2.10.3.6 Resistencia de diseño a tensión y cortante de pernos y partes roscadas

Para pernos de alta resistencia apenas ajustados o totalmente tensionados, la resistencia será:

$$\Phi R_n$$

$$\Phi = 0.75$$

$$R_n = F_n A_b$$

Ab = área nominal del perno antes de roscar, mm²

Fn = resistencia nominal a tensión F_{nt} (620 MPa), o a cortante, F_{nv} (457MPa), dada en la tabla F.2.10.3-2

$$R_{nt} = 620 * \pi * \frac{12,7^2}{4} = 78539.65 \text{ N}$$

$$R_{ut} = 0.75 * 78539.65 = 58904.74 \text{ N} \cong 58.9047 \text{ kN}$$

$$2.0011 \text{ kN} < 58.9047 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

$$R_{nv} = 457 * \pi * \frac{12,7^2}{4} = 57891.3295 \text{ N}$$

$$R_{ut} = 0.75 * 57891.3295 = 43418.49 \text{ N} \cong 43.4185 \text{ kN}$$

$$57891.3295 \text{ kN} < 43.4185 \text{ kN} \quad \text{OK}$$

F.2.10.3.8 Pernos de alta resistencia en conexiones de deslizamiento crítico

$$\text{Resistencia de diseño} = \Phi R_n$$

$\Phi = 1.00$, Para perforaciones estándar o de ranura corta perpendicular a la .dirección de la carga.

$\Phi = 0.85$, Para perforaciones agrandadas o de ranura corta paralela a la .dirección de la carga.

$\Phi = 0.70$, Para perforaciones de ranura larga.

$$\text{Resistencia nominal: } R_n = \mu D_u h_f T_b n_s$$

μ = coeficiente promedio de fricción para superficies clase A o B, tomado de los casos a continuación, u obtenido de ensayos.

$\mu = 0.30$ para superficies clase A (superficies de acero sin pintar libres de escamas de laminación, superficies tratadas con chorro y revestidas con recubrimiento clase A o superficies galvanizadas por inmersión en caliente y procesadas para darles rugosidad.

$\mu = 0.50$ para superficies clase B (superficies de acero tratadas con chorro sin pintar o superficies tratadas con chorro y revestidas con recubrimiento clase B).

$D_u = 1.13$ factor de seguridad por pretensionamiento

T_b = Tensión mínima del perno Tablas F.2.10.3-1

$h_f = 1.0$, cuando se añaden pernos para distribuir las cargas en platinas de relleno.

$h_f = 1.0$, si no se añaden pernos y se usa una platina.

$h_f = 0.85$, no se añaden pernos y se usan 2 o más platina

n_s = número de planos sobre los cuales debe producirse el deslizamiento para que la conexión deslice.

$$R_n = 0.3 * 1.13 * 1 * 53000 * 2 = 35934 N$$

$$R_u = 0.75 * 35934 = 26950 N \cong 26.9505 kN$$

F.2.10.3.10 Resistencia al aplastamiento en las perforaciones con pernos

R_n se calcula como sigue: ϕR_n donde $\Phi = 0.75$

a) Para un perno en perforación estándar, agrandada o de ranura corta, independientemente de la dirección de la carga, o en perforación de ranura larga paralela a la dirección de la fuerza de aplastamiento:

(i) Cuando la deformación alrededor de la perforación, bajo cargas de servicio es una consideración de diseño:

$$R_n = 1.2L_c t F_u \leq 2.4 d t F_u$$

(ii) Cuando la deformación alrededor del orificio no es una consideración de diseño:

$$R_n = 1.5L_c t F_u \leq 3.0 d t F_u$$

En donde

d=diámetro nominal del perno, mm

F_u=resistencia mínima a tensión del material, mm

L_c=distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde de la conexión considerada y el borde de la conexión adyacente, o el borde del material, mm

t= espesor del material conectado

$$R_n = 1,2 * 40 * 6,35 * 253 = 77114 N \cong 77.114 kN$$

$$R_n \leq 2,4 * 12,7 * 6,35 * 408 = 78967,6 N \cong 78.967 kN$$

$$77.114 MN \leq 78.967 kN \quad OK$$

F.2.10.3.7 Esfuerzos combinados a cortante y tensión en conexiones tipo aplastamiento

La resistencia de diseño a tensión de un perno sometido a una combinación de esfuerzos de tensión y cortante se calculará de acuerdo con los estados límite de rotura por tensión y por cortante:

$$\Phi R_n$$

$$\Phi = 0.75$$

$$R_n = \Phi F'_{nt} A_b$$

F'_{nt} = resistencia nominal a tensión por unidad de área, modificada para incluir los efectos del esfuerzo cortante.

$$F'_{nt} = 1,3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\Phi F_{nv}} F_v \leq F_{nt}$$

F_{nt} = resistencia nominal a tensión por unidad de área de la tabla F.2.10.3-2, MPa

F_{nv} = resistencia nominal a cortante por unidad de área de la tabla F.2.10.3-2, MPa

f_v = resistencia requerida a cortante , MPa.

La resistencia de diseño a cortante de los conectores será mayor o igual que la resistencia requerida a cortante, f_v . Cuando la resistencia requerida, f , ya sea por cortante o por tensión, sea menor o igual que el 30% de la resistencia de diseño correspondiente no se requerirá verificar los efectos de esfuerzos combinados.

Resistencia nominal a cortante

El análisis anterior para el caso de diseño no es necesario hacerlo debido a que la resistencia requerida, f , ya sea por cortante o por tensión, es menor al 30% de la resistencia de diseño.

F.2.10.3.9 Esfuerzos combinados de cortante y tensión en conexiones de deslizamiento crítico.

$$R_n = k_{sc} \mu D_u h_f T_b n_s$$

$$k_{sc} = 1 - \frac{T_u}{D_u T_b n_b}$$

nb = número de pernos que soportan la tensión aplicada

Tb = mínima tensión en el perno, según tablas F.2.10.3-1

Tu = fuerza de tensión debida a combinaciones de cargas mayoradas.

$$k_{sc} = 1 - \frac{793}{1.13 * 53000 * 2} = 0.9934$$

$$R_n = 0.9934 * 0.3 * 1.13 * 1 * 53000 * 2 = 35696.1 N \cong 35.6961 KN$$

Conexión con soldadura

F.2.10.2.2.1 Soldadura de filete

F.2.10.2.2.1. Área efectiva El área efectiva de una soldadura de filete será la longitud efectiva multiplicada por la garganta efectiva. Para soldaduras de filete en agujeros y ranuras, la longitud efectiva será la longitud efectiva será la longitud del eje de la soldadura medida a lo largo de la línea media del plano de la garganta

Tabla F.2.10.2-3

Mínimo espesor efectivo de garganta para soldaduras acanaladas de penetración parcial

Espesor de la parte más delgada a unir, mm	Mínimo Espesor Efectivo de Garganta ^(a) , mm
Hasta 6.4 inclusive	3
mayor que 6.4 a 12.7	5
mayor que 12.7 a 19.1	6
mayor que 19.1 a 38.1	8
mayor que 38.1 a 57.2	10
mayor que 57.2 a 152.4	13
mayor que 152.4	16

El mínimo espesor de la garganta es de 3mm debido a que el espesor de las placas metálicas es de 6.35mm. Y la longitud efectiva es de 120 mm.

F.2.10.2.2 Limitaciones El tamaño de una soldadura de filete no deberá ser menor que el tamaño requerido para transmitir la fuerzas calculadas ni menor que el mínimo según la tabla F.2.10.2-4

**Tabla F.2.10.2-4
Tamaño Mínimo de Soldaduras de Filete**

Espesor de la parte más delgada a unir, mm	Tamaño Mínimo de la Soldadura de Filete ^(a) mm
Hasta 6.4 inclusive	3
mayor que 6.4 a 12.7	5
mayor que 12.7	6
mayor que 19.1	8

^(a) Dimensión del lado de la soldadura de filete. Debe aplicarse en una sola pasada.
Nota: Véase el numeral F.2.10.2.2 para el máximo tamaño de soldaduras de filete.

F.2.10.2.4 Resistencia de diseño La resistencia a diseño de una soldadura, ϕR_n , será el menor entre los valores obtenidos para la resistencia del material base, determinada de acuerdo con los estados limites de rotura por tensión y rotura por cortante y para la resistencia del metal de la soldadura, determinado para el estado limite de rotura con R_n calculado como sigue:

Para el metal base:

$$R_n = F_{nBM} A_{BM}$$

Para el metal de la soldadura:

$$R_n = F_{nw} A_{we}$$

Donde:

F_{nBM} = Resistencia nominal por unidad de área para el metal base, MPa

F_{nw} = Resistencia nominal por unidad de área para el metal de la soldadura, MPa

A_{BM} = Área de la sección transversal del metal base, mm²

A_{we} = Área efectiva de la soldadura, mm²

$$R_n = F_{nBM}A_{BM} = 253 * 120 * 6.35 = 192786 \text{ N} \cong \mathbf{197.786 \text{ kN}}$$

$$R_n = F_{nw}A_{we} = 412,5 * 120 * 3 = 148500 \text{ N} \cong \mathbf{148.5 \text{ kN}}$$

F.2.10.2.6 Requisitos para la selección de los electrodos

Tabla F.2.10.2-6
Casos Básicos de Tabla 3.1 de AWS D1.1

Metal Base	Metal de aporte compatible
A36 t ≤ 19.1 mm	Electrodos 60 & 70 ksi
A36 t > 19.1 mm	SMAW: E7015, E7016, E7018, E7028 Otros procesos: Electrodos 70 ksi
A572 (Gr. 50 & 55)	
A913 (Gr. 50)	
A588*	
A992	
A1011	
A1018	
A913 (Gr. 60 & 65)	Electrodos 80 ksi

*Para situaciones donde se requiera resistencia a la corrosión y color similar al metal base véase AWS D1.1, Sección 3.7.3

Notas:

- (a) Los electrodos deberán satisfacer los requerimientos de AWS A5.1, A5.5, A5.17, A5.18, A5.20, A5.23, A5.28 y A5.29.
- (b) En juntas con metales base de diferentes resistencias usar ya sea un metal de aporte compatible con el metal base de mayor resistencia o un metal de aporte compatible con el metal base de menor resistencia y que produzca un bajo depósito de hidrogeno.

ANEXO G. Detalles del diseño de la cubierta en madera con estructura laminar.

Figura 1 A7. Vista de la geometría de la cubierta semicircular.

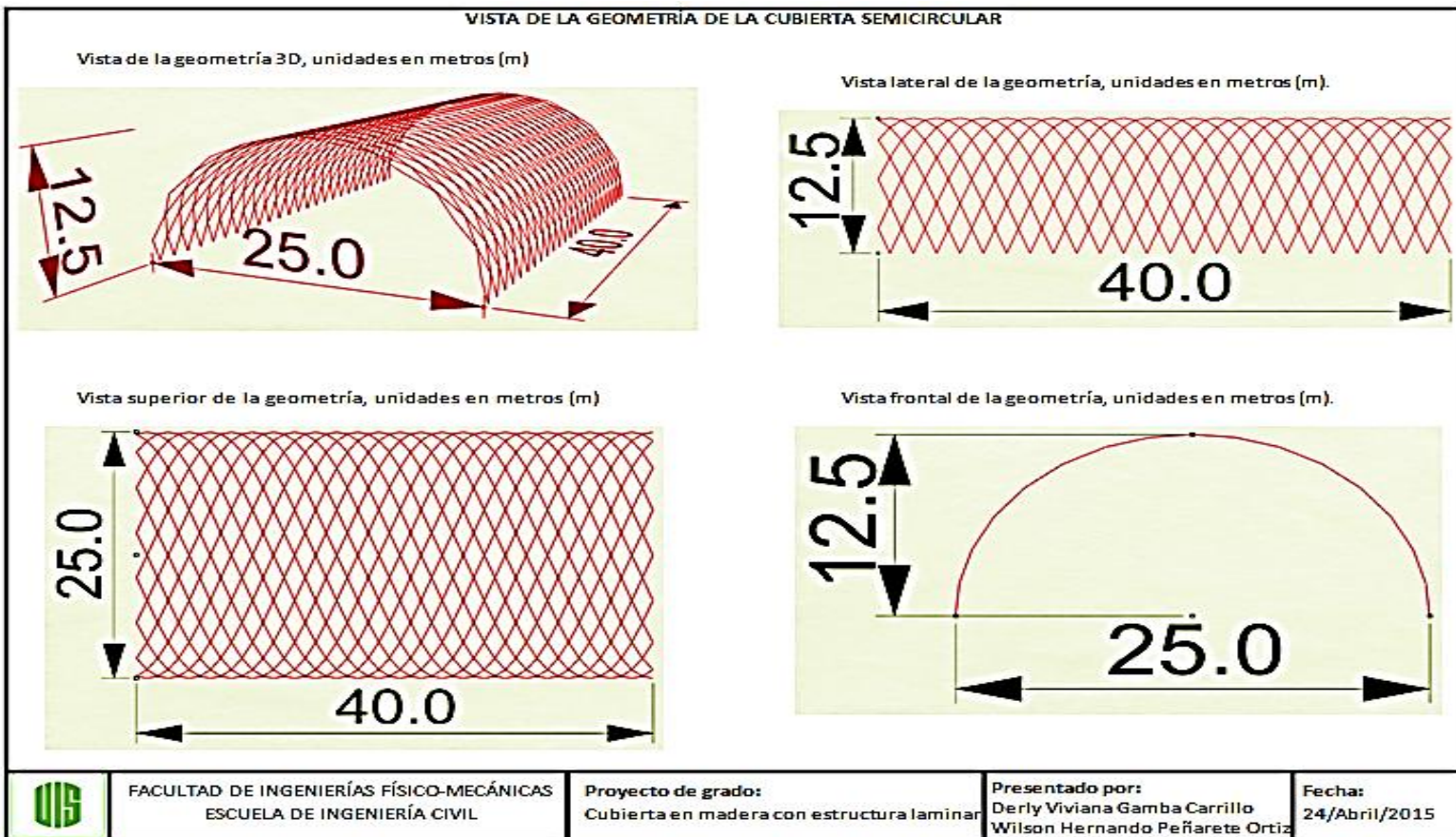


Figura 2 A7. Detalles de los elementos en madera, 196 elementos de cada tipo.

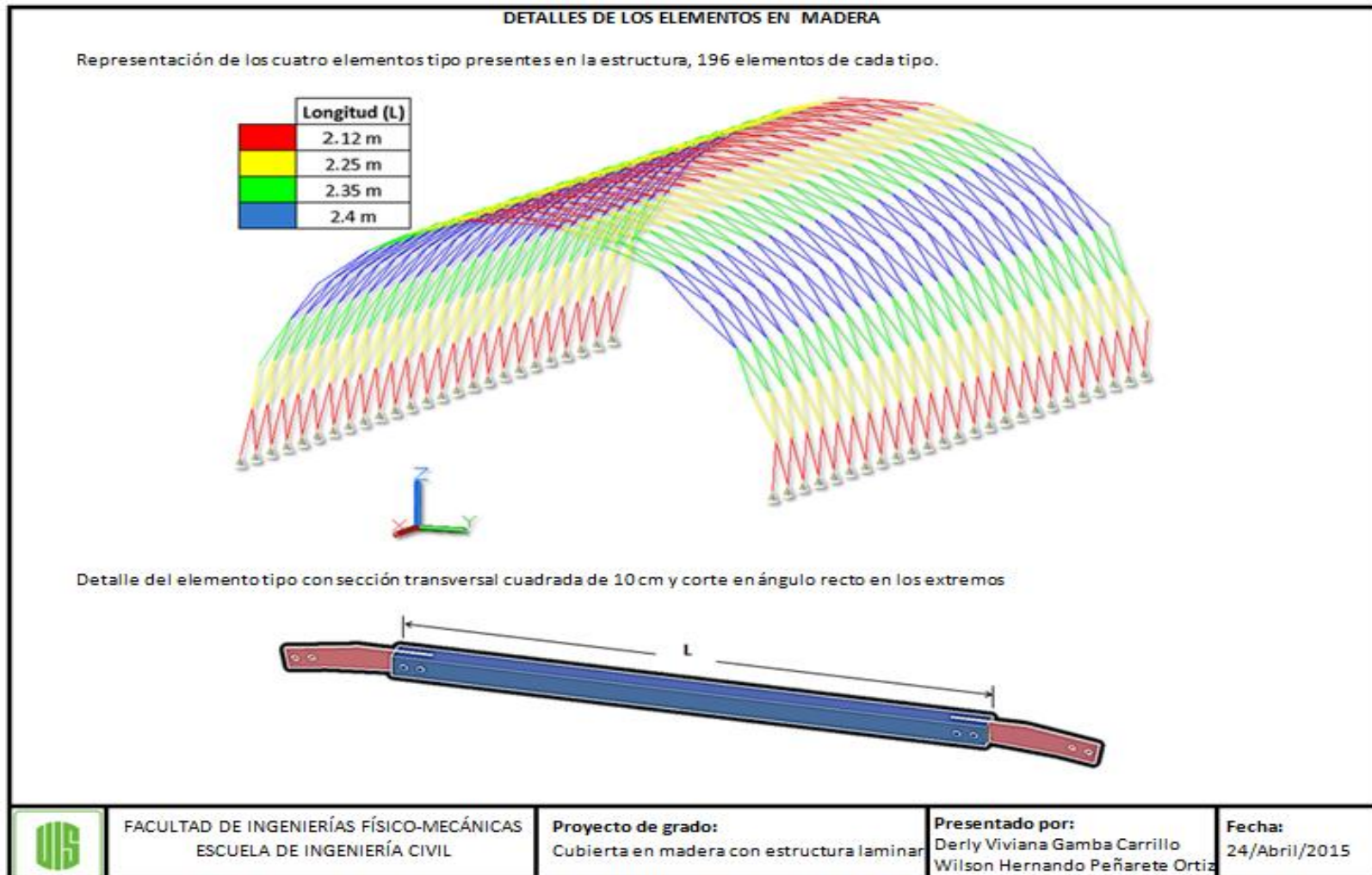


Figura 3 A7. Detalle de la conexión, 375 conexiones tipo y 50 conexiones tipo en los apoyos.

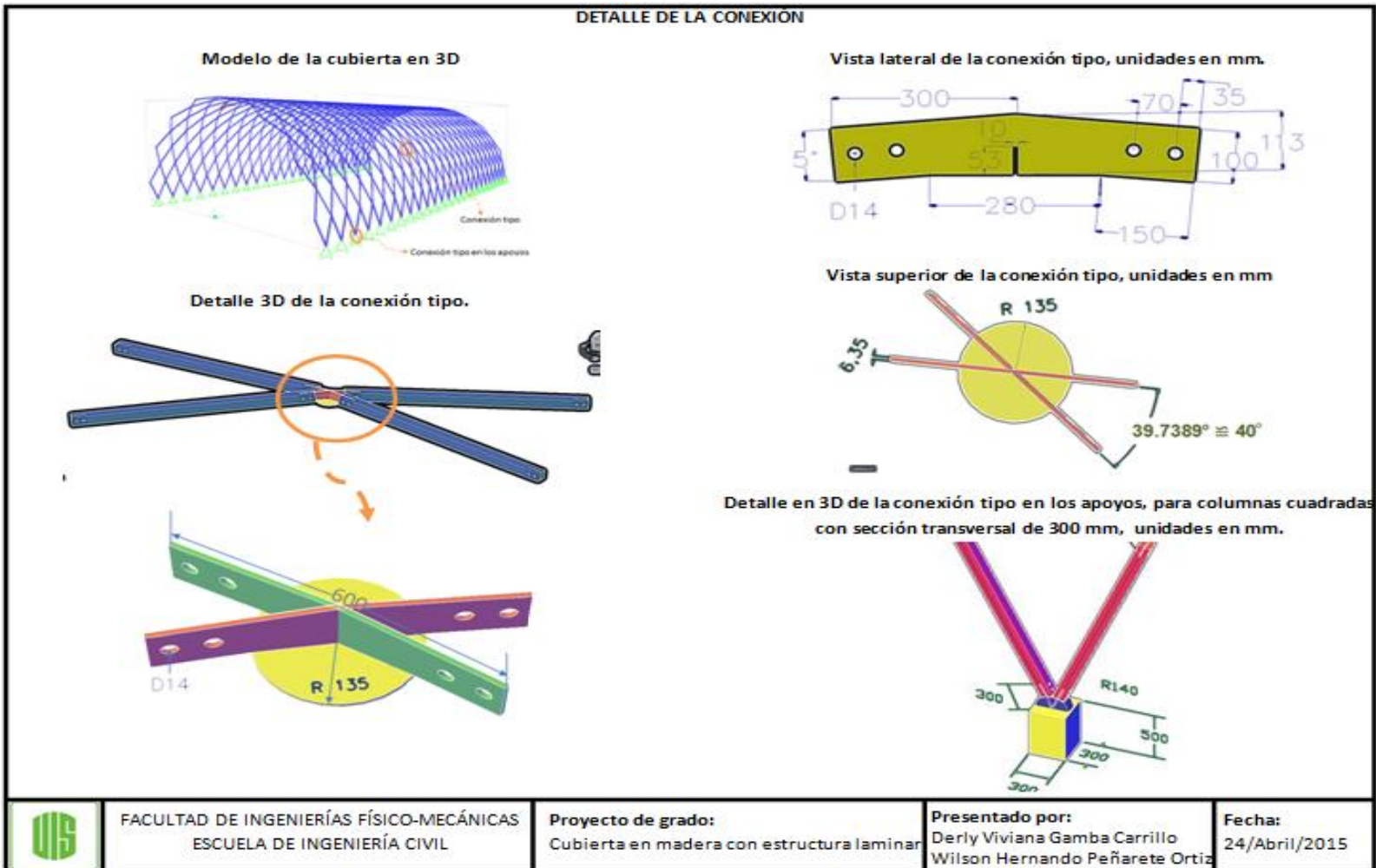


Figura 4 A7. Procedimiento de diseño de la cubierta

