

**EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DE FIBRAS
SINTÉTICAS POR FIBRAS VEGETALES EN VIGAS
HUECAS SOMETIDAS A CARGAS DE CUBIERTA**

DANIEL ALEJANDRO CHAVARRÍA GUTIÉRREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Fredy Andrés Mercado Navarro



**UNIVERSIDAD EIA
PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2016**

Dedicado a mi familia, su apoyo fue, es y será siempre lo más importante para mí.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento:

A Dios por todas las bendiciones recibidas y por darme la oportunidad de estudiar en esta magnífica institución.

A mi familia porque siempre recibí de ellos el apoyo que necesitaba para cumplir mis metas.

Al Director de este trabajo de grado, Ing. Fredy Mercado, pues sin él esto no hubiera sido posible, su disposición a ayudar, corregir y enseñar durante todo el desarrollo de este fue fundamental.

A la profesora María del Pilar Duque por sus consejos y enseñanzas a lo largo de todo el pregrado.

Al personal de Laboratorios EIA por prestarme todas las herramientas durante el trabajo de campo.

A mi novia porque siempre estuviste ahí en los momentos más difíciles.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. PRELIMINARES	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos del proyecto	16
1.2.1 Objetivo General	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Marco de referencia	16
1.3.1 Antecedentes	16
1.3.2 Materiales compuestos.....	17
1.3.3 Matriz: polímero termofijo	18
1.3.4 Refuerzo: fibras vegetales	19
1.3.5 Resultados de caracterizaciones mecánicas realizadas en investigaciones anteriores.....	24
1.3.6 Simulación por el método de elementos finitos (FEM).....	24
1.3.7 Ecuación de equilibrio, matriz de rigidez, formulación cinemática	26
1.3.8 Modelos numéricos de materiales	27
1.3.9 Edificaciones Industriales	29
1.3.10 Definición de cargas.....	30
1.3.11 Control de deformaciones.....	33
1.3.12 Proceso de fabricación	34
2. METODOLOGÍA	35
2.1 Etapa 1: Determinación del Estado de desarrollo	35

2.2	Etapa 2: Selección de los elementos que conforman el material compuesto a modelar y geometrías de diseño.....	35
2.2.1	Dimensiones de la nave industrial y de la correa-viga.....	35
2.2.2	Selección de materiales que conforman el material compuesto a modelar .	35
2.3	Etapa 3: Simulación de la viga de material compuesto.....	35
2.3.1	Configuración de cargas	35
2.3.2	Simulación computacional	36
2.4	Evaluación de alternativas de construcción.....	36
2.5	Construcción, instrumentación y prueba del modelo a escala para comparar con la simulación	36
3.	DESARROLLO DEL TRABAJO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
3.1	Descripción estructural de la nave industrial	37
3.2	Dimensiones de la viga hueca - correa	37
3.3	Compuesto de fibra vegetal, fibra sintetica y matriz polimerica	38
3.4	Análisis de cargas	39
3.4.1	Definición de presión por viento	39
3.4.2	Fuerzas de viento en correas y revestimientos.....	41
3.4.3.	Análisis inicial (para escoger el perfil)	42
3.4.4.	Combinaciones de carga	44
3.4.5.	Control de deformaciones - Máximas deformaciones permitidas por la ASCE 46	
3.5	Modelación por elementos finitos (FEM)	46
3.5.1	Software	46
3.5.2	Definición virtual de la geometría	46
3.5.3	Selección de rutina de cálculo y tipo de análisis	47

3.5.4	Modelo y propiedades del elemento finito para discretización o mallado de geometría.....	47
3.5.5	Selección de propiedades de los tejidos de fibra de natural y fibra de vidrio.....	48
3.5.6	Definición del objetivo de sustitución.....	49
3.5.7	Teoría de falla del material compuesto	49
3.5.8	Definición del tamaño de malla a usar	50
3.5.9	Condiciones de borde	52
3.6	Factor de seguridad	53
3.7	Proceso de construcción de la viga o correa.....	54
3.7.1	Técnicas para construcción de la viga o correa. Moldeo manual y VARTM.....	55
3.8	Porcentaje de refuerzp.....	62
3.9	Ensayo a flexión y simulación de este.....	63
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	66
4.1.	Simulaciones estructurales – correa de cubierta	66
4.1.1.	Simulación de correa de cubierta con condiciones de borde simplemente apoyada.....	67
4.1.2.	Simulación de correa de cubierta con Condiciones de borde sobre arandela sin factor de seguridad.....	67
4.1.3.	Simulación de correa de cubierta con Condiciones de borde sobre arandela con factor de seguridad.....	68
4.2.	Ensayo a flexión.....	68
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	74
	BIBLIOGRAFÍA.....	76

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Comparación entre propiedades de fibras vegetales y fibra de vidrio E. Fuente: (Shah, Schubel, & Clifford, 2012)	13
Tabla 2. Composición química de algunas fibras vegetales comunes. Fuente: (Faruk & Sain, 2013)	20
Tabla 3. Factor de Importancia. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)	32
Tabla 4. Relaciones deflexión-luz máximas permitidas según ASCE. Fuente: (American Society of Civil Engineers, 2013).....	34
Tabla 5. Parámetros de velocidad del viento. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)	39
Tabla 6. Combinaciones de diseño para correa.	45
Tabla 7. Propiedades utilizadas en la simulación. Fuente: (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015)	48
Tabla 8. Relaciones y resultados usados en análisis.	50
Tabla 9. Resultados simulaciones con condiciones de borde de viga simplemente apoyada sin factor de seguridad.....	67
Tabla 10. Resultados con condiciones idealizadas sin factor de seguridad.	67
Tabla 11. Resultados con condiciones idealizadas con factor de seguridad.	68
Tabla 12. Deformaciones y esfuerzos en la dirección X. Cálculo de porcentaje de error.	71

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Configuración de un material compuesto polimérico reforzado con fibras. Fuente: (Liu, Zwingmann, & Schlaich, 2009)	18
Ilustración 2. Flujo de procesos de extracción de fibras y elaboración del compuesto. Fuente: (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014)	22
Ilustración 3. Conceptos básicos del método de elementos finitos. Fuente: (Carnicero, 2003)	25
Ilustración 4. Elemento de cáscara. Fuente: (Bathe, 1996).....	28
Ilustración 5. Definición de los ejes de ortotropía. Fuente: (Mercado Navarro, Frecuencias naturales del elemento de cáscara MITC4 en materiales compuestos, 2016)	29
Ilustración 6. Capas del compuesto laminar. Fuente: (Kussmaul, 2014)	29
Ilustración 7. Elementos de edificaciones industriales. Fuente: (Labein Tecnalia, 2008)..	30
Ilustración 8. Velocidades básicas de viento en Colombia. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)	31
Ilustración 9. Geometría de la correa.	38
Ilustración 10. Distribución en planta de las correas sobre la cubierta.	42
Ilustración 11. Distribución en planta de correas sobre la cubierta.	43
Ilustración 12. Distribución de fuerzas sobre la correa.	44
Ilustración 13. Ejes de la correa.	45
Ilustración 14. Geometría de la viga simulada.	47
Ilustración 15. Punto de esfuerzos máximos en la correa.	50
Ilustración 16. Análisis convergencia.	51
Ilustración 17. Condiciones de borde sobre arandela y simplemente apoyadas. Descripción gráfica.....	52

Ilustración 18. Detalle de conexión entre correa, portacorrea y cercha de apoyo.	
Ilustración 19. Condiciones de borde sobre arandela, tratando de simular efecto arandela y pernos.....	53
Ilustración 20. Molde de madera.	55
Ilustración 21. Componentes VARTM	56
Ilustración 22. Circuito de vacío de Universidad EIA.	56
Ilustración 23. Montaje de lámina para primer acercamiento con proceso VARTM.	57
Ilustración 24. Molde tubular.....	58
Ilustración 25. Molde de madera, con tres entradas de resina.....	59
Ilustración 26. Molde de acero, justo antes de la infusión.	59
Ilustración 27. Molde de acero envuelto en papel bond para facilitar desmoldeo.	60
Ilustración 28. Proceso previo a impregnación con resina. Molde envuelto en capas de refuerzo.	60
Ilustración 29. Molde listo para impregnación. Primera construcción por moldeo manual.	61
Ilustración 30. Primera viga construida mediante moldeo manual.	61
Ilustración 31. Segunda viga construida mediante moldeo manual.	62
Ilustración 32. Galgas extensiométricas usadas.....	63
Ilustración 33. Montaje del ensayo.	63
Ilustración 34. Montaje, detalle aplicación de la carga.....	64
Ilustración 35. Detalle instrumentación en el fondo de la viga.....	64
Ilustración 36. Viga ensayada a flexión en modelo computacional.	65
Ilustración 37. Deformación (deflexión) de la correa. Composición: 8V-2L. Con factor de seguridad. Deflexión bajo carga viva de cubierta (Lr).....	68
Ilustración 38. Componentes de las deformaciones.	69
Ilustración 39. Deformaciones medidas por galgas extensiométricas.....	70
Ilustración 40. Ubicación y nomenclatura de galgas.....	70

Ilustración 41. Deformaciones de la viga simulada en el ensayo. 72

Ilustración 42. Esfuerzos de la viga simulada en el ensayo. 72

RESUMEN

De acuerdo con las tendencias actuales en el diseño y construcción de estructuras, se investigan nuevos materiales con propósitos nuevos o iguales, como lo son los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales. Estos materiales poseen buenas propiedades específicas, es decir son materiales livianos pero al mismo tiempo son materiales resistentes, además los tejidos de refuerzo de fibras vegetales poseen ventajas adicionales como alta disponibilidad, y bajo costo frente a las fibras sintéticas como la de carbono.

Desafortunadamente en Colombia, debido al desconocimiento en las propiedades y técnicas de diseño con materiales no se han concebido grandes avances en su uso como base para elementos estructurales usados en el campo de la ingeniería civil.

Este trabajo de grado se enfocó en un elemento tipo correa, el cual es un componente y revestimientos de la estructura (no pertenece al sistema principal resistente a fuerzas de viento), de una nave o edificación industrial típica ubicada en el Valle de Aburrá. Se configuró este elemento en un material compuesto polimérico reforzado con fibras sintéticas y vegetales, se calcularon las diferentes cargas a las que está sometido (vivas, muertas y viento), se determinaron las condiciones máximas para la falla por servicio y por resistencia de la correa, y se sustituyó la mayor cantidad de capas de tejidos de fibras sintéticas por tejidos de fibras de lino tratado. Se simuló la correa, mediante el Método de Elementos Finitos, frente a las condiciones mencionadas y se determinó que, teniendo en cuenta un factor de seguridad, se pueden sustituir dos capas de tejidos de fibra de vidrio por capas de tejidos de fibra de lino, para conformar la viga junto con la matriz polimérica. Cabe aclarar que todos los procedimientos anteriores se hicieron siguiendo los lineamientos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10).

Se construyó una viga reforzada con 6 capas de tejidos de fibra de lino y 4 capas de tejidos de fibra de vidrio, mediante la técnica de moldeado manual. La cual se instrumentó Este ensayo fue simulado por el Método de Elementos Finitos, los resultados de las deformaciones y los esfuerzos fueron analizados y comparados con el ensayo físico, al hacer esta operación se obtuvieron porcentajes de error entre el 10% y el 38%.

Palabras clave: Fibras vegetales, materiales compuestos, resina de poliéster, vigas, Método de Elementos Finitos.

ABSTRACT

According to current trends in the design and construction of structures, new materials with new or same purposes are investigated, as polymer composites reinforced with vegetable fibers. These materials have good specific properties, ergo materials are lightweight but at the same time are resistant materials, and the vegetable reinforcement fabrics have additional advantages such as high availability, and low cost compared to synthetic fibers such as carbon.

Unfortunately, there has not been an advance in the field of composite materials in Colombia due to the lack of knowledge on the properties and design techniques of this kind of materials which, in consequence, reduces even more the advances on structural elements used in civil engineering applications.

This work focused on a girder-type element, which is a component of the structure (not part of the main system resistant to wind forces), of an industrial building located in the Valle de Aburrá (Antioquia). This element was manufactured as vegetable and synthetic fiber reinforced polymer composite. Different loads to which it is subjected (live, dead and wind) were calculated, the maximum service conditions and resistance were determined, and a study was done to replace as many layers of glass fibers by untreated flax fibers in the composite. The girder or beam was simulated using the Finite Element Method. The result of the analysis results in a substitution of two layers of glass fibers by flax fibers, of a total number of 10. All the above procedures were done following the guidelines of the Colombian Earthquake Resistant Building Regulations (NSR-10).

A beam reinforced with 6 layers of woven flax fibers and 4 layers of woven glass fibers was manufactured using hand lay-up molding technique. Then, a three point beam deflection test was done, where strains were measured using gauges attached to the sides and bottom of the beam. Then, a Finite Element Analysis was done using the same load and approximated boundary conditions, and the strains and stresses results were compared against the measured data from the laboratory test. Error results stay between 10% and 38%.

Key words: Vegetable fibers, composite materials, polyester resin, beams, Finite Element Method.

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales son materiales cuyas propiedades físicas específicas son para resaltar. Las relaciones resistencia/peso o resistencia/densidad son consideradas buenas, no para todas las fibras vegetales, su disponibilidad, su bajo costo económico y tener una característica ecológica, al ser un material renovable, lo ponen en la órbita de los investigadores en materiales y elementos estructurales.

Las fibras vegetales presentan varias ventajas técnicas, económicas y ecológicas sobre las fibras sintéticas para ser empleadas como refuerzo de materiales compuestos con matriz polimérica, estas ventajas se pueden ver ejemplificadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** donde se presenta una comparación entre las propiedades de las fibras vegetales y la fibra de vidrio tipo E.

Tabla 1. Comparación entre propiedades de fibras vegetales y fibra de vidrio E. Fuente: (Shah, Schubel, & Clifford, 2012)

	Propiedades	Fibras vegetales	Fibra de vidrio E
Económicas	Producción anual global (Toneladas)	31000000	4000000
	Distribución para polímeros reforzados con fibras (Toneladas)	Moderado (40000)	Alto (600000)
	Costo materia prima (£/kg)	Bajo ($\approx 0,5-1,5$)	Bajo (1,3)
Técnicas	Densidad (g/cm^3)	Baja ($\approx 1,35-1,55$)	Alta (2,66)
	Rigidez a la tracción (GPa)	Moderada ($\approx 30-80$)	Moderada (73)
	Resistencia a la tracción (GPa)	Baja ($\approx 0,4-1,5$)	Moderada (2-3,5)
	Deformación unitaria en tracción (%)	Baja ($\approx 1,4-3,2$)	Baja (2,5)
	Rigidez específica a la tracción (GPa/g/cm^3)	Moderada ($\approx 20-60$)	Baja (27)
	Resistencia específica a la tracción (GPa/g/cm^3)	Moderada ($\approx 0,3-1,1$)	Moderada (0,7-1,3)
Ecológicas	Consumo energía para producción (MJ/kg de fibra)	Bajo (4-15)	Moderado (30-50)
	Fuente renovable	Si	No
	Reciclable	Si	Parcialmente
	Biodegradable	Si	No
	Tóxico (al inhalarse)	No	Yes

El interés principal para desarrollar aplicaciones de este tipo de materiales se debe principalmente a dos factores: (a) preocupaciones en la disposición de los materiales compuestos poliméricos no reciclables y (b) preocupaciones en el continuo uso de materiales basados en recursos del petróleo (como lo son la mayoría de los actuales polímeros o compuestos) (Pickering, 2008). A pesar de que los materiales compuestos

reforzados con fibras vegetales tienen el potencial para no producir este tipo de preocupaciones el consumo de estos materiales por la industria en aplicaciones estructurales ha sido limitado. (Pickering, 2008)

Los usos de los materiales compuestos con matriz polimérica se han visto primordialmente en el sector automotriz donde estas han reemplazado a las fibras de la madera en el refuerzo de matrices termoestables para componentes interiores en las puertas y en los paneles instrumentales. Otros sectores se han visto influenciados por estas fibras como por ejemplo el sector de la construcción e infraestructura, en paneles para techos y geotextiles, el sector deportivo, en raquetas de tenis, canoas y cascos, en el sector mobiliario y bienes de consumo, en empaquetaduras, sillas, mesas y tableros y finalmente en el sector que se ocupa de los tanques de almacenamiento, en el drenaje del agua y el transporte de ésta. En muchas de estas aplicaciones se utilizaron las fibras vegetales primordialmente por ser livianas, baratas y ecológicas, y donde representaron un rol estructural pequeño o ninguno en absoluto (Shah, Schubel, & Clifford, 2012).

En ámbitos como la fabricación o construcción de vehículos también se han implementado estos materiales, el claro ejemplo es la empresa Lotus Cars, que construyó paneles con compuestos reforzados con cáñamo (Lotus Cars, s.f.). Se han conocido implementaciones también en el sector de mobiliarios, fachadas y paneles (Shah, Schubel, & Clifford, 2012) pero no se conoce su comportamiento si se utilizan como parte de una cubierta cuyas solicitaciones principales son las cargas de viento, cargas vivas y cargas muertas.

En este documento se encontrará una reseña acerca del Estado de Desarrollo de los materiales compuesto poliméricos reforzados con fibras, sus ventajas, proyecciones y puntos de vista de diferentes investigadores. Se hablará acerca del Método de los Elementos Finitos y sus consideraciones, pues se simulará una correa (viga), en materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras, perteneciente a una cubierta de una nave industrial, y se estimará cuantas capas de tejido de fibras sintéticas se pueden sustituir por capas de tejidos de fibra de lino no tratado.

Se trabajaron dos formas de construir una viga hueca, técnica de resina asistida por vacío y técnica de molde manual, construyendo un elemento de estos por la última técnica especificada, además se realizará un ensayo a flexión sobre la viga construida.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras han venido surgiendo como uno de los materiales modernos más prometedores, adecuados y eficientes (Codispoti, Oliveira, Olivito, Lourenco, & Fangueiro, 2015) para reemplazar los metales convencionales y las aleaciones. Estos materiales han ganado mucha de atención en los últimos años para numerosas aplicaciones estructurales (Chand & Fahim). Son desarrollados a partir de matrices termoplásticas y termoestables y con fibras sintéticas y vegetales como refuerzo.

En el sector de la construcción se requieren materiales que no solo satisfagan los requerimientos de diseño exigidos por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) sino que a su vez mantengan una relación de beneficio-costos alta, permitan disminuir efectos negativos sobre el medio ambiente, generen cambios benéficos en los sistemas constructivos y sobre todo que estén hechos de recursos que tengan una gran disponibilidad, como por ejemplo las fibras vegetales (Cadena & Bula Silvera, 2002).

Se cree que llegar a tener todos los beneficios mencionados en el párrafo anterior es difícil, puesto que la demanda de un material que cumpla con la mayoría de estos requisitos es inferior a la de los materiales convencionales, de forma que los primeros se encarecen considerablemente (Roca Ramón & Casals Casanova, 2005).

Los investigadores han encontrado que los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales pueden tener aplicaciones a gran escala en sectores como el automotriz. Un ejemplo de ello es el fabricante Mercedes Benz, el cual incorporó a su línea de vehículos clase E este material en los paneles interiores de las puertas. Lotus Cars ha incursionado en el campo de los compuestos con su vehículo deportivo Lotus Eco Elise, el cual tiene componentes interiores compuestos por fibras de cáñamo (Lotus Cars, s.f.). En el sector agrario, se han implementado en cestas de peces, coladores de arroz, y en el sector comercial su uso se ha dado en mobiliarios (sillas, mesas, etc). Como material de construcción se ha utilizado en particiones, cielos falsos y construcciones ligeras (Chand & Fahim).

El problema es que no se conoce su comportamiento en elementos estructurales sometidos a flexión pura, como lo son las vigas huecas (correas) que se pueden presentar en una cubierta de una edificación industrial ubicada en regiones donde la velocidad del viento sea menor o igual a 42 metros por segundo, como Medellín, ni se conoce la posibilidad de que la correa (viga), construida en este material híbrido, pueda cumplir con las limitaciones y restricciones que se manejan en NSR-10, ASCE-7 y otras normatividades que rigen los diseños en ingeniería civil.

Ahora, es vital, como se enuncio en párrafos anteriores, encontrar nuevas alternativas para hacer de la construcción un sector sostenible sin que se sacrifiquen las propiedades técnicas y mecánicas de las estructuras. Por esta razón lo que se quiere realizar con este trabajo de grado es determinar si los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales pueden cumplir las funciones estructurales de una viga hueca sometida a cargas estáticas típicas para una cubierta ubicada en regiones de viento donde la velocidad de este sea menor o igual a 42 m/s como la ciudad de Medellín de cumpliendo con la norma NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la factibilidad técnica para la utilización de vigas huecas fabricadas en un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras sintéticas y fibras vegetales, como elemento estructural sometido a cargas estáticas de cubierta mediante simulación numérica empleando el Método de los Elementos Finitos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Conformar un elemento estructural tipo viga, en materiales compuestos, mediante la selección de una fibra sintética, una fibra vegetal, una matriz polimérica y su geometría, considerando el desempeño estructural y mecánico de esta clase de materiales.
- Establecer la relación de fibra vegetal y sintética en una matriz polimérica que aseguren el comportamiento mecánico de un elemento tipo viga en una cubierta, según lo estipulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente mediante la modelación por elementos finitos con elementos tipo cáscara, para las fibras seleccionadas en el objetivo específico anterior.
- Comparar los resultados de un modelo de elementos finitos de una viga hueca sometida a cargas de flexión, con los resultados de un ensayo experimental sobre un elemento estructural.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Antecedentes

La aplicación de las fibras vegetales como refuerzo de materiales poliméricos empezó básicamente en la industria automotriz y en la producción de elementos no estructurales. En 1986 se publicó un estudio donde se reportó qué compuestos de coco y poliéster habían sido utilizados como material para carcasas de proyectores, de estabilizadores de voltaje, buzones de correo, cascos y cubiertas (Ticoalu, Aravinthan, & Cardona, 2010); a esto se le adicionan los casos anteriormente descritos en este trabajo en la sección correspondiente al planteamiento del problema.

En aplicaciones estructurales y aplicaciones para infraestructura, los materiales compuestos con fibras vegetales han sido utilizados para desarrollar elementos que cargan o soportan solicitaciones estructurales como vigas, tejas, paneles multipropósito, tanques de agua y puentes peatonales. Una de las vigas construidas en compuestos con fibras vegetales fue una viga en forma de I, la cual fue creada a partir de un tejido de jute y una resina basada en aceite de soya. En Australia, la norma (AS 42533-2006) especifica que para que un polímero reforzado pueda ser utilizado como un elemento de teja de cubierta, este, tiene que demostrar una resistencia al impacto de 1.96J y una resistencia a la tensión mínima de 50 MPa sin agrietarse ni presentar agujeros. Bajo estas consideraciones se han desarrollado elementos tipo teja en fibras de sisal con resina natural extraída de la cáscara de la nuez. LOC Composites Pty Ltd desarrolla y produce paneles en materiales compuestos poliméricos que pueden ser utilizados en construcción en paredes, cubiertas, pisos y puertas cortafuego (Ticoalu, Aravinthan, & Cardona, 2010).

La Universidad de Nottingham, en Reino Unido, con su grupo de investigación dedicado a los materiales para generación de energía eólica, en conjunto con el Grupo de Investigación en Materiales Compuestos Poliméricos encontró, con el diseño y la construcción de aspas para generadores fabricadas en compuestos, que la fibra de vidrio E, que se utiliza como refuerzo estructural de una matriz polimérica de poliéster en pequeños generadores eólicos, puede ser reemplazada adecuadamente por fibras de lino (Shah, Schubel, & Mike, 2012). Un caso similar se encuentra en la Escuela de Ingeniería de Antioquia donde el grupo de investigación MAPA, desarrolla un proyecto de investigación enfocado en la sustitución de fibras sintéticas por fibras vegetales autóctonas usadas como refuerzo de materiales compuestos empleados en la elaboración de aspas de aerogeneradores de eje vertical (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014).

1.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras

Los materiales compuestos están conformados mediante uniones no químicas de dos o más elementos, dando cabida a otras características o propiedades específicas de cada conjunto. En los materiales compuestos reforzados con fibras se deben considerar dos partes fundamentales: la matriz y el refuerzo, de acuerdo con el uso y las cargas a las que puedan estar sometidos. La matriz es el elemento responsable de las características físicas y químicas, además de la distribución de los esfuerzos al material que actuará como refuerzo. En ciertos casos, sirve como protección del refuerzo a la intemperie, es decir a la humedad, al fuego, a los rayos ultravioleta, etc. El refuerzo es el material encargado de acoger todos los esfuerzos de tracción que reciba el material (Botero Jaramillo, Méndez Urquidez, Romo Organista, & González Blandon, 2013). En la Ilustración 1 se puede observar como la resina polimérica (matriz) cubre las fibras de carbono (refuerzo).

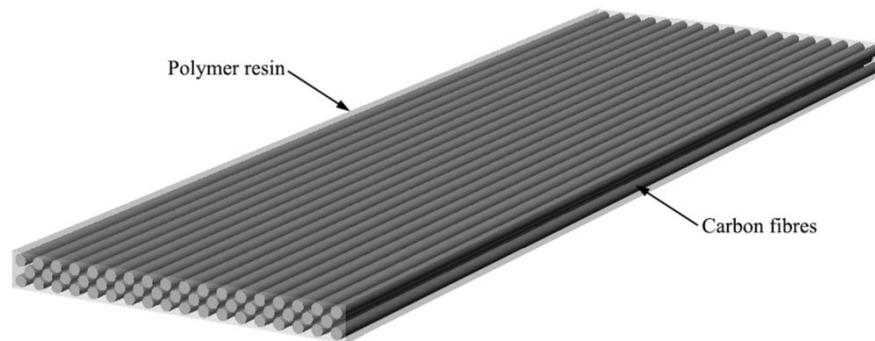


Ilustración 1. Configuración de un material compuesto polimérico reforzado con fibras. Fuente: (Liu, Zwingmann, & Schlaich, 2009)

1.3.3 Matriz: polímero termofijo

En los materiales compuestos reforzados con fibras, las fibras de refuerzo son las encargadas de resistir los esfuerzos a tracción y los de compresión son absorbidos por la matriz. Además, esta última aporta otras características importantes, como son (Faruk & Sain, 2013):

- Mantener las fibras en su lugar y evitar el pandeo de las mismas
- Proteger las fibras de la intemperie y de las condiciones adversas del entorno, lo que a su vez asegura una menor degradación mecánica
- Permite una mejor distribución de las cargas a tracción entre las fibras
- Son las encargadas de la forma y la apariencia del elemento
- Estas son las responsables de la tolerancia al ambiente del compuesto, lo cual también indica que son responsables de la durabilidad de este.

Es importante para una estructura o un elemento estructural asegurar la interacción entre la matriz y las fibras, puesto que esto la hace más resistente a daños. Existen varios tipos de matrices:

1.3.3.1. Poliméricas: se dividen en 2 tipos:

- Polímeros termoestables: se unen químicamente por enlaces cruzados, lo que ofrece una mayor rigidez en cuanto a su estructura y menor capacidad de fluencia. (Mallick, 2007). Son aquellos materiales que pasan de ser materiales solubles, es decir, que se pueden disolver al mezclarse con líquido a otros no solubles ni fundibles (irreversiblemente), mediante la influencia del calor, la luz o agentes químicos. Tienen aplicaciones aeroespaciales y en aeronaves, además de ser utilizadas en química, en eléctrica y en la naval (Juan, 1993).
- Polímeros termoplásticos: se unen por enlaces secundarios débiles, se caracterizan porque parten del estado sólido y mediante la acción del calor, dichos enlaces se rompen y el material fluye, convirtiéndose en uno deformable o elástico. Al enfriarse, el material se solidifica y puede volver a su estado original

(Mallick, 2007). Estos polímeros son buenos para aplicaciones de temperatura moderada y con fibras discontinuas.

Generalmente las propiedades mecánicas de las matrices termoestables son más altas que las termoplásticas, es decir, su módulo de elasticidad, su resistencia a la tracción y a la compresión, por otro lado las matrices termoplásticas tienen mejores propiedades relacionadas con la tenacidad y las cargas de impacto.

1.3.3.2. Metálicas: adecuadas para aplicaciones de alta temperatura.

1.3.3.3. Cerámicas: utilizadas también para elementos expuestos a altas temperaturas (Mallick, 2007).

Un material polimérico se refiere a la unión de un gran número de moléculas que se congelan en el espacio ya sea de manera aleatoria u ordenada. Las matrices poliméricas más utilizadas para los materiales compuestos son las termoestables, para las cuales se usan principalmente, fibras de refuerzo continuas o largas (Faruk & Sain, 2013). En contraste, para las termoplásticas, las fibras de refuerzo son cortas y moldeadas por inyección. Las referencias más comunes para las primeras son: poliésteres, epoxis y esterres de vinilo y para las últimas: Nylons, PET, polipropileno, poliestireno, policarbonato (PC).

1.3.4. Refuerzo: fibras vegetales

Las fibras vegetales hacen parte de las naturales, lo cual quiere decir que se han generado a partir de un proceso normal de la naturaleza (Castro Herazo & Palencia Penagos, 2006). Estas han despertado el interés de propios y extraños, no solamente por su gran disponibilidad, puesto que existen más de 700 plantas que pueden producir fibras de esta clase, sino por sus notables propiedades físicas, mecánicas y químicas. (Castro Herazo & Palencia Penagos, 2006).

Las fibras son el refuerzo del material ante los diferentes esfuerzos que este pueda presentar. Usualmente proveen resistencia, al compuesto, mientras que la resina provee la unión de las fibras (Ticoalu, Aravinthan, & Cardona, 2010). *“Se conoce con el nombre genérico de fibras a un amplio conjunto de materiales que tienen en común la característica de poseer un alto valor de la relación longitud-diámetro”* (Castro Herazo & Palencia Penagos, 2006). Un ejemplo de ello son las fibras naturales de origen vegetal como el cáñamo y el yute que tienen valores para estas relaciones del orden de 100 a 1000. El algodón y la lana que sobrepasan fácilmente estos valores con relaciones de 1000 a 3000 y finalmente la seda, que es la fibra natural con mayor relación longitud-diámetro, debido a que se pueden obtener 500 metros de longitud y unas pocas micras de diámetro (Castro Herazo & Palencia Penagos, 2006).

1.3.4.1. Clasificación y composición de las fibras vegetales

Su clasificación más común se da en fibras vegetales blandas y fibras vegetales duras. *“Las blandas como el lino y el ramio, son obtenidas básicamente del floema (del griego*

phlos = corteza), que son los tejidos del sistema vascular de la planta que transportan azúcares y otros productos de la fotosíntesis, son de tallos de dicotiledóneas (plantas con flor) que pueden estar más o menos lignificadas¹, son suaves, elásticas y flexibles". (González, 2002).

Las fibras vegetales duras son aquellas que tienen su origen en las hojas, a esta clasificación pertenecen el fique, abacá, palmas, entre otras. *"Son fibras de hojas monocotiledóneas, cada una es un cordón fibroso o un haz vascular que poseen un alto contenido de lignina y tienen textura rígida"* (Castro Herazo & Palencia Penagos, 2006).

Como se puede observar en la Tabla 2, las fibras vegetales están compuestas de microfibrillas de celulosa dispersadas en una matriz amorfa de lignina y hemicelulosa. La celulosa es la molécula que teóricamente aporta el potencial de resistencia de la fibra. El término se debe a que en la práctica no ha sido posible explotar esta propiedad de la molécula debido a los naturales defectos estructurales de la fibra, defectos en el procesamiento de la fibra y las incompatibilidades químicas entre la matriz polimérica y las fibras que impiden la transmisión de los esfuerzos a las fibras (Pickering, 2008). Dependiendo del tipo de fibra vegetal el contenido de celulosa varía en un intervalo aproximado de 60-80% del peso y el contenido de lignina está alrededor del 0-20% del peso de la fibra, mientras que el contenido de humedad puede alcanzar valores hasta del 20% en peso.

Tabla 2. Composición química de algunas fibras vegetales comunes. Fuente: (Faruk & Sain, 2013)

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceras (%)
Bagazo	55.2	16.8	25.3	-
Lino	71	18.6-20.6	2.2	1.5
Kenaf	72	20.3	9	-
Jute	61-71	14-20	12-13	0.5
Cáñamo	68	15	10	0.8
Ramio	68.6-76.2	13-16	0.6-0.7	0.3
Sisal	65	12	9.9	2

1.3.4.2. Factores que afectan las propiedades físicas de las fibras vegetales

Las propiedades de las fibras vegetales son variadas. Estas se pueden ver afectadas por diferentes factores como, el tipo de fibra, el contenido de humedad y su morfología, es decir, su estructura microscópica. El tratamiento químico a utilizar para disminuir su carácter hidrofílico es un factor importante, al igual que la remoción de ceras, azúcares y el aumento de la cohesión con la matriz, para lo cual, deben ser sometidas a otro procedimiento químico. Además se ven afectadas por el lugar donde las fibras han sido cultivadas, las condiciones del cultivo, la parte de la planta de donde son removidas, el tiempo de crecimiento y el proceso de extracción. (Ticoalu, Aravinthan, & Cardona, 2010)

1.3.4.3. Algunas ventajas del empleo de fibras vegetales como refuerzo de materiales compuestos

En la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica es un ejercicio común alternar fibras de carbono o vidrio, las cuales son rígidas y frágiles con fibras de aramida, que presentan características menos rígidas pero más elasto-plásticas, esta mezcla ayuda a absorber mejor los esfuerzos mecánicos y térmicos. Esto podría llegar a cambiar si se consideran las propiedades de las fibras vegetales en cuestiones como su considerable rigidez y capacidad elasto-plástica debido a su morfología y estructura interna, la cual también admite un mejor acoplamiento entre la interfaz matriz-refuerzo (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014). Sus principales ventajas radican en hechos como que pueden ser cultivadas en periodos de tiempo cortos, aumentando su disponibilidad, pueden llegar a ser un recurso ilimitado y su consumo de energía durante la recolección, reciclaje, refinamiento y remoldeo es reducido respecto a las fibras comunes como la de vidrio (Codispoti, Oliveira, Olivito, Lourenco, & Fanguero, 2015). Por otra parte estas fibras poseen demasiadas propiedades atrayentes para los investigadores, como su bajo costo, baja densidad, propiedades específicas de tensión comparables con las fibras sintéticas como la de vidrio, no son abrasivas con las herramientas para sus tratamientos, no irritan la piel, generan menos riesgos para la salud de las personas que trabajen con estos y su renovabilidad y biodegradabilidad.

1.3.4.4. Extracción de las fibras vegetales y manufactura del material compuesto

Para construir o fabricar el material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras vegetales y sintéticas se debe seguir el siguiente esquema, el cual ha sido utilizado por Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro (2014), en una investigación acerca de la caracterización mecánica de algunos materiales compuestos. Se debe aclarar que en dicha investigación no se procesó la fibra sino que se adquirió ya procesada.

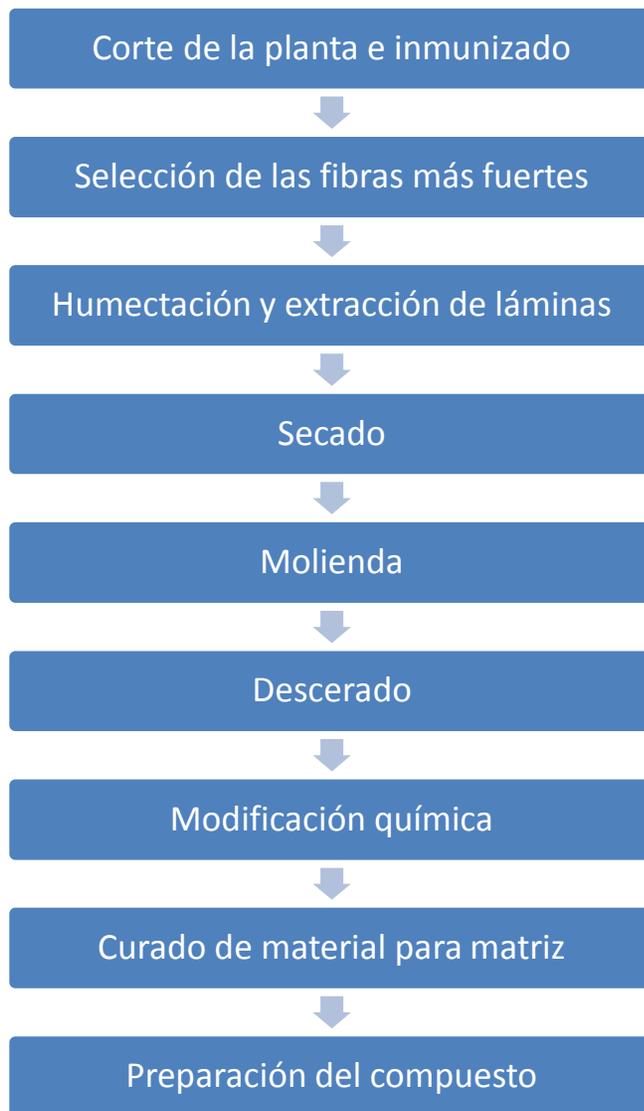


Ilustración 2. Flujo de procesos de extracción de fibras y elaboración del compuesto. Fuente: (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014)

A continuación se detalla cada proceso del esquema anterior:

Corte de la planta e inmunizado

Se corta la planta y se deja en el campo durante determinado tiempo con el fin de que acontezca el inmunizado natural.

Selección de las fibras más fuertes

Existe la posibilidad de que una parte de la planta sea la que contenga las fibras con mayor resistencia a la tracción. En este caso se investiga si este fenómeno ocurre, se examina el resultado y se extrae la fibra con base en el resultado.

Humectación y extracción de láminas

Con el fin de tener una mayor facilidad en el proceso de extracción de las fibras se debe remojar (habitualmente en agua) la parte de la planta que fue seleccionada en el paso anterior durante cierta cantidad de tiempo para luego extraer las fibras (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014).

Secado

Se debe remover el contenido de agua de las fibras, este proceso se puede realizar mediante un horno o estufa.

Molienda

“Si el material fue extraído primero en láminas estas deben ser molidas para destruir la lámina y obtener filamentos. Posteriormente se tamizan para tomar sólo la fracción correspondiente a ciertos números de tamiz”. Esto va a determinar el espesor mínimo de las fibras en los elementos a construir o fabricar. (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014)

Descerado

Este procedimiento se realiza utilizando un extractor con una mezcla de alcoholes durante un tiempo determinado. Posteriormente se deben lavar con agua destilada y secar hasta llegar a un peso constante.

Modificación química

Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro (2014) proponen que: dependiendo del material que se usará como matriz, es posible que se requiera de un tratamiento químico para mejorar las propiedades de las fibras, y remover elementos como la hidroquinona, pectinas, grasas, azúcares y ceras, con lo cual se busca mejorar la adherencia de las fibras a la matriz polimérica. El proceso se realiza con soluciones químicas, controlando concentraciones, temperaturas y tiempos. Luego se lavan con agua destilada y se secan hasta registrar un peso constante. Algunos autores emplean enzimas de tipo hemicelulasas, pectinasas y oxidoreductasas para mejorar las propiedades químicas, morfológicas y térmicas de la superficie de las fibras. Algunos de los siguientes químicos fueron utilizados para el tratamiento de las fibras en dicho estudio: acetato de sodio, ácido acético glacial, fosfato de sodio dibásico, citrato monohidrato de sodio, fosfato monobásico de sodio, ácido cítrico, ácido sulfúrico y carbonato de calcio. El hidróxido de sodio es usado en otros experimentos como el de (George Michael & Bressler, 2014) para el tratamiento de las fibras, además este fue usado por (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015) para alcalinizar y luego ácido acético para neutralizar. Químicos alcalinos, silanos, permanganatos, peróxidos, isocianatos, ácido estérico, cloruro de sodio, triacina y procesos como la acetilación, benzoilación y acrilación también son usados para el tratamiento químico de fibras. (Pickering, 2008)

1.3.5. Resultados de caracterizaciones mecánicas previas sobre fibras y compuestos vegetales

Anteriormente se han realizado ensayos para caracterización mecánica de fibras vegetales y compuestos que se enuncian a continuación.

En los ensayos realizados a las fibras vegetales en hilos (Sisal, cañamo y lino) por parte de (Codispoti, Oliveira, Olivito, Lourenco, & Fangueiro, 2015) se encontró que el lino es la fibra que representa los mayores valores en cuanto a la resistencia a la tracción con un valor para el módulo de elasticidad igual a 5913.6 MPa y un esfuerzo último a la tracción de 198.1 MPa. Estos mismos autores realizaron ensayos de resistencia a la tracción sobre especímenes de tejidos de fibras, con una configuración *plain*. En estos ensayos el jute y el lino sobresalieron con los resultados más altos. (Codispoti, Oliveira, Olivito, Lourenco, & Fangueiro, 2015).

Estos resultados se pueden corroborar con el trabajo de investigación realizado por (Burgueño, y otros, 2004) en donde realizan caracterización mecánica a materiales compuestos. En esta investigación combinan una matriz de poliéster con diferentes tipo de fibras de cañamo y fibras de lino, este tipo de fibras fueron consideradas porque ofrecen las propiedades mecánicas más altas y el tamaño de partículas apropiado para los arreglos que se debían hacer en el laboratorio (Burgueño, y otros, 2004), para los compuestos de poliéster – cañamo se usaron fracciones másicas de refuerzo desde 13% a 25%, mientras que para los compuestos poliéster – lino se usó una fracción másica igual a 33%. Todo esto se realizó con el fin de fabricar vigas y paneles en forma celular y determinar su resistencia a la flexión y deflexión y se compararon con elementos que se utilizan en la industria de la construcción para elementos de cubierta. Los resultados de estos experimentos concluyen que *“estos elementos (vigas y paneles) no solo tienen el potencial para ser componentes principales de una estructura sino que pueden competir con los materiales estructurales convencionales”*. (Burgueño, y otros, 2004)

Luego en una investigación realizada por el Grupo de investigación MAPA perteneciente a la Universidad EIA se logran caracterizar compuestos conformados en su matriz por resina de poliéster y fibras vegetales de algodón, yute y lino; los resultados, una vez más, favorecen al compuesto poliéster-lino el cual demuestra las propiedades mecánicas más altas y concluyen que el lino tratado posee el mayor potencial para ser empleado en la fabricación de compuestos laminares, entre los tejidos vegetales estudiados (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015).

1.3.6. Simulación por el método de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos es un método numérico cuya función es resolver problemas de ingeniería de un alto grado de complejidad. El método es necesario debido a gran cantidad de estos problemas involucran geometrías complejas, no linealidades geométricas y materiales, configuraciones de carga irregulares y determinación de propiedades físicas o químicas de los materiales usados. Mediante este método se pueden realizar análisis sobre estructuras, problemas de transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masa, cálculo de potencial electromagnético, etc (Mitre, 2004).

La solución analítica está dada por valores de alguna incógnita que es válida a lo largo del cuerpo estudiado y por lo tanto, es también válida para cualquier sección transversal de este; estas soluciones analíticas, generalmente requieren de soluciones a ecuaciones diferenciales, que cuando se tienen geometrías o configuraciones de cargas complejas, no son posibles de resolver (Mitre, 2004).

Debido a que el método de elementos finitos es un método numérico, este solo aporta valores aproximados a las soluciones de las diferentes incógnitas, en un número finito de locaciones dentro del cuerpo. Este número finito de locaciones es el número de elementos usados para discretizar (mallar) la pieza, es decir, modelar el cuerpo pero dividido en pequeños cuerpos que cumplen la función cada uno de ser un volumen de control independiente; la forma de resolver los problemas, según la formulación de este método es plantear una serie de ecuaciones simultaneas para cada uno de estos elementos, afectándolos por las condiciones de frontera (cargas, restricciones a los grados de libertad, etc).

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre, como se puede ver en la Ilustración 3 (Carnicero, 2003):

- Dominio: espacio geométrico donde se va a analizar el sistema
- Condiciones de frontera o de borde: cargas, restricciones a los grados de libertad, desplazamientos
- Incógnitas: variables que se desea conocer al realizar el análisis (desplazamientos, esfuerzos, fuerzas, entre otras)

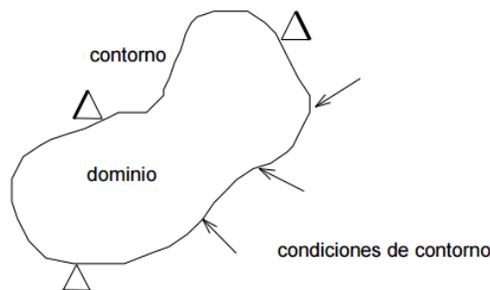


Ilustración 3. Conceptos básicos del método de elementos finitos. Fuente: (Carnicero, 2003)

Así el Método de Elementos Finitos utiliza, para solucionar el problema, el dominio mallado o discretizado en subdominios denominados elementos. “El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (caso bidimensional) o superficies (caso tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide” (Carnicero, 2003). Los elementos se determinan por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí cada elemento. Sobre estos nodos es donde se debe anteponer cada una de las condiciones de frontera que se requieran, además de que también sobre estos, se encuentran las diferentes incógnitas del ejercicio. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, debido a que con base

en estos podremos calcular las acciones mecánicas internas como momentos, fuerzas cortantes o fuerzas axiales. A estas incógnitas se les conoce como grados de libertad de cada nodo del modelo, los cuales me determinan la posición y el estado del nodo.

Planteando la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento del medio continuo para el elemento, y para casos de análisis estructural, las ecuaciones diferenciales que gobiernan son las del principio del trabajo virtual, mediante el cual, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento interno del elemento, mediante funciones de interpolación que emplean el valor que tengan los grados de libertad nodales.

El problema se propone con una configuración matricial y conocidas las matrices que desarrollan la conducta de cada elemento (en el caso de análisis estructural, se conocen las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa). Estas matrices se acoplan y se determinan todas las ecuaciones algebraicas, que al ser resueltas, suministran los valores para los grados de libertad en los nodos. (Carnicero, 2003)

1.3.7. Ecuación de equilibrio, matriz de rigidez, formulación cinemática

El sistema de ecuaciones de equilibrio para un modelo estático lineal es:

$$K * U = R \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde U , es el vector de desplazamientos y rotaciones nodales, este tiene tantas filas como grados de libertad tenga el sistema completo, R es el vector de fuerzas y momentos nodales externos, que debe ser de igual dimensión que el vector U y K es la matriz de $m=1neleKglob(m)=m=1nele t=1n-11-11-11B^T C B |J| dr ds dt \frac{l(r,s)}{a(r,s)}$ Ecuación 2, la cual contiene la matriz de rigidez para un elemento de material compuesto (Mercado Navarro, Frecuencias naturales del elemento de cáscara MITC4 en materiales compuestos, 2016)

$$K = \sum_{m=1}^{nele} K_{glob}^{(m)} = \sum_{m=1}^{nele} \left(\sum_{t=1}^n \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T C B |J| dr ds dt \frac{l(r,s)}{a(r,s)} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde B es la matriz de deformaciones/desplazamientos, allí se tiene en cuenta la geometría del material, la formulación cinemática de un elemento general de cascara degenerado, como es el elemento de Ahmad, Irons & Zienkiewicz, está definida por Ecuación 3 como

$$x_i^l(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k x_i^k + \left(\frac{t}{2} \right) \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{ni}^k \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde $h_k(r, s)$ son las funciones de interpolación correspondientes al nodo k , y se determinan así:

$$h_1 = \left(\frac{1}{4} \right) * (1 + r)(1 + s) \quad h_3 = \left(\frac{1}{4} \right) * (1 - r)(1 - s) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$h_2 = \left(\frac{1}{4} \right) * (1 - r)(1 + s) \quad h_4 = \left(\frac{1}{4} \right) * (1 + r)(1 - s) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde x_i^l son las coordenadas cartesianas de un punto dentro del elemento en el tiempo l , x_i^k son las coordenadas cartesianas globales del nodo k , a_k es el espesor del elemento en la dirección t en el nodo k (el cual no cambia) y V_{ni}^k son las componentes del vector director unitario normal a la superficie media de la cáscara en la dirección t en el nodo k (Mercado Navarro, Frecuencias naturales del elemento de cáscara MITC4 en materiales compuestos, 2016). (Ver Ilustración 4).

Luego la matriz B viene de separar los grados de libertad, en la formulación cinemática ($x_i^l(r, s, t) = \sum_{k=1}^q h_k x_i^k + \left(\frac{t}{2}\right) \sum_{k=1}^q a_k h_k V_{ni}^k$ Ecuación 3) y lo que queda es el aporte de la geometría al sistema de rigidez. La matriz C se llama relación constitutiva, y será mejor explicada en la sección 1.3.8 de este documento, en donde se tienen en cuenta las características y propiedades del material (Mercado Navarro, Frecuencias naturales del elemento de cáscara MITC4 en materiales compuestos, 2016) .

1.3.8. Modelos numéricos de materiales

Para explicar la conducta interna de un material se utiliza un modelo clásico que es denominado relación constitutiva. Esta relación es un tensor de orden 4, con 81 componentes, esta relación constitutiva es el término C de la $\sigma = C\varepsilon$ Ecuación 6, que debido a simplificaciones, operaciones tensoriales sobre el tensor aprovechando los planos de simetría que surgen del grado de simplificación del modelo de material, se convierte en una matriz 6 x 6 obteniendo al final una lista de 36 componentes que definen completamente el modelo más general del material.

$$\sigma = C\varepsilon \quad \text{Ecuación 6}$$

La $\sigma = C\varepsilon$ Ecuación 6 escrita en forma matricial se puede representar como se describe

$$\text{en la} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 7. (Suárez}$$

Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014)

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 7}$$

Uno de los modelos más empleados es el isótropo, con el cual se pueden modelar elementos de acero, debido a que el comportamiento de este es igual en cualquier dirección. A diferencia del anisótropo, donde las propiedades cambian dependiendo de la dirección. Los materiales compuestos reforzados con fibra se pueden modelar bajo el grupo de los anisótropos, y más específicamente, el de los materiales ortótropos. Estos

poseen tres ejes perpendiculares de simetría, pudiéndose determinar su comportamiento conociendo nueve constantes independientes entre sí, como lo son: los módulos de elasticidad E_a, E_b, E_c , los módulos de Poisson $\nu_{ab}, \nu_{bc}, \nu_{ac}$ y los módulos de corte G_{ab}, G_{bc} y G_{ac} . (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014)

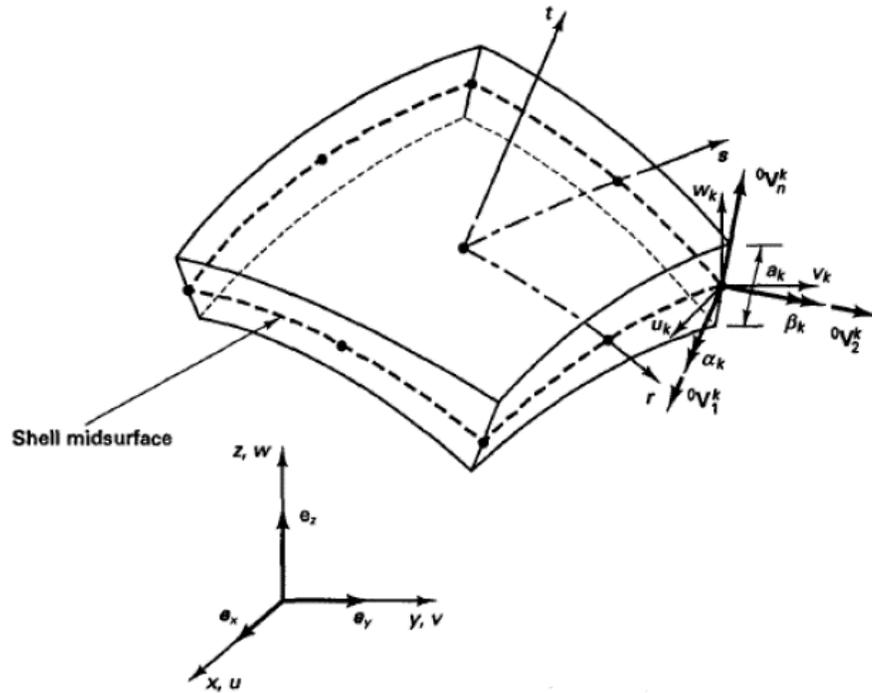


Ilustración 4. Elemento de cáscara. Fuente: (Bathe, 1996)

Los materiales compuestos reforzados con fibras se pueden modelar mediante los elementos finitos tipo cáscara, el cual se puede ver en la Ilustración 4, los cuales poseen la característica de tener espesores muy pequeños o delgados, lo que implica que para el modelo las deformaciones en la dirección del espesor se asumen con valor de cero, esto es posible construirlo agregando capas de materiales con una determinada orientación,

$$\sigma_a \sigma_b \sigma_c \tau_{ab} \tau_{bc} \tau_{ac} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ R_{12} & R_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & R_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & R_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & R_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ 2e_{ab} \\ 2e_{bc} \\ 2e_{ac} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde todos los coeficientes C_{jk} de la matriz constitutiva son iguales a cero y los otros elementos de la matriz están dados a continuación:

$$R_{11} = \frac{S_{22}}{B} = \frac{E_a}{D} \quad R_{22} = \frac{S_{11}}{B} = \frac{E_b}{D} \quad R_{12} = -\frac{S_{12}}{B} = \frac{\nu_{ab}E_a}{D} = \frac{\nu_{ba}E_b}{D}$$

$$R_{44} = G_{ab} \quad R_{55} = kG_{bc} \quad R_{66} = kG_{ac}$$

Ecuación 9

$$B = S_{11}S_{22} - S_{12}^2 = \frac{E_b - E_a\nu_{ab}^2}{E_aE_b^2} = \frac{E_a - E_b\nu_{ba}^2}{E_bE_a^2}$$

$$D = 1 - \nu_{ab}\nu_{ba}$$

Ecuación 10

Ahora se debe aclarar que σ_i es el esfuerzo normal de tracción o compresión del elemento en la dirección local i , τ_{jk} es el esfuerzo cortante del elemento, que tiene como vector normal el eje j , en la dirección del eje local k ; e_i es la deformación del elemento en la dirección del eje local i , e_{jk} es la deformación angular del elemento que es perpendicular al eje local j en la dirección del eje local k . S_{jk} son componentes de la matriz constitutiva inversa y k es el factor de corrección de corte, el cual es igual a 5/6 para materiales compuestos laminares delgados y se usa en modelos que asuman deformaciones por cortante iguales a través del espesor. (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2014)

Como se ve en la Ilustración 5 y en la Ilustración 6, otras variables que considera la modelación de los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras son: la dirección de las fibras (β), está determina en qué dirección deben estar evaluados los módulos de elasticidad y el orden de acoplamiento de las capas de tejido de fibras, las cuales pueden ser de diferentes materiales y estar orientadas en diferentes direcciones.

elemento de cáscara MITC4 en materiales compuestos, 2016)

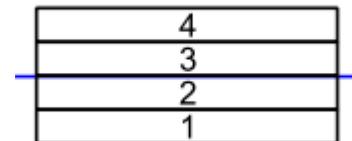
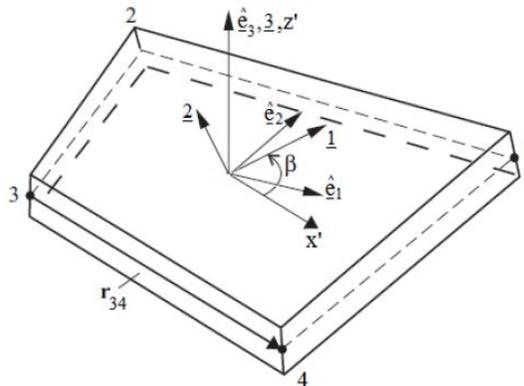


Ilustración 6. Capas del compuesto laminar. Fuente: (Kussmaul, 2014)

Ilustración 5. Definición de los ejes de ortotropía. Fuente: (Mercado Navarro, Frecuencias naturales del

1.3.9. Edificaciones Industriales

En regiones como el Valle de Aburrá existe una densidad empresarial igual a 25 empresas por cada mil habitantes (total de empresas: 79117) este valor es más alto que el registrado por toda la región antioqueña (17). Catorce (14) por ciento de las empresas en Medellín se dedican a la industria es por esta razón que se puede afirmar que el Valle de Aburrá cuenta con numerosas edificaciones industriales (Cámara de Comercio de Medellín, 2011), entiéndase estas como bodegas, talleres, fábricas o estructuras que sean del grupo de uso I o II definido por Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente de 2010 (NSR-10) en la sección A.2.5.11.

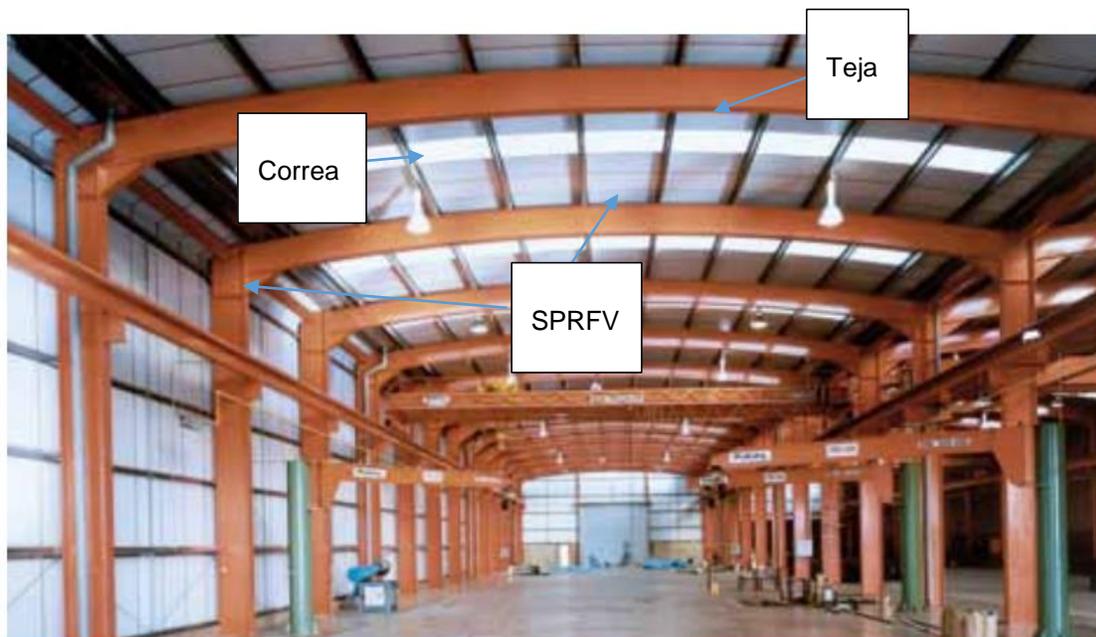


Ilustración 7. Elementos de edificaciones industriales. Fuente: (Labein Tecnalía, 2008)

En este tipo de edificaciones se pueden identificar tres elementos claves en la configuración de cargas que soportará la estructura: el primer elemento es la Teja, la cual es la encargada de recibir directamente las cargas de viento, granizo y viva que tendrá la estructura de cubierta, el segundo elemento (s) es la Correa, la cual es responsable de transmitir todas las cargas anteriormente descritas, además de la carga muerta de teja, al sistema principal resistente a fuerzas de viento (SPRFV), generalmente se usan en perfiles de acero tipo “C”, “CC”, “I” y “Z”, y el tercer elemento es el SPRFV, el cual se encarga de recibir las cargas de las correas, está conformado normalmente por cerchas, celosías, vigas o columnas y pueden estar hechos en concreto o acero.

1.3.10. Definición de cargas

Para analizar el comportamiento de la cubierta de una estructura, es de vital importancia conocer:

- Ubicación.
- Altura.
- Dimensiones de aberturas (puertas, ventanas, etc)
- Tipo de teja.
- Topografía de lugar.
- Pendiente de la cubierta.

Lo primero que se debe hacer, es definir las cargas muertas (D) y vivas (L) a las cuales estará sometida la cubierta. Las cargas muertas corresponden al peso de la teja, de las instalaciones y de la estructura como tal, donde la primera se obtiene del catálogo del fabricante o medir, y las 2 últimas se definen de manera aproximada inicialmente (Restrepo, 2015). El valor de la carga viva depende de la pendiente de la cubierta y está definida en la Norma Sismoresistente de Colombia NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) en la sección B.4.

Luego, se deben analizar las cargas de viento (W) por el método analítico, donde:

1) Se debe hallar la velocidad básica del viento (V_s) y el coeficiente de dirección (K_d), para el lugar en el cual se ubicará la estructura, en la figura B.6.4-1 de la NSR 10.

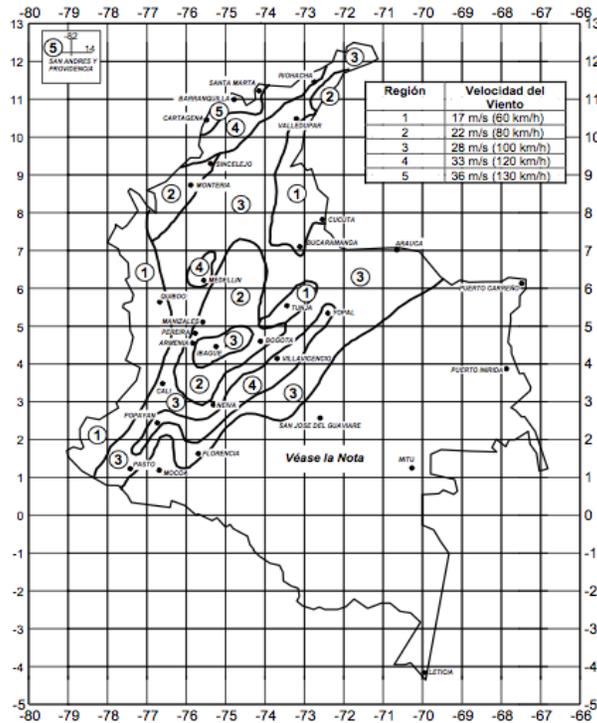


Ilustración 8. Velocidades básicas de viento en Colombia. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

2) Según el tipo de estructura y su grupo de uso, es decir, si es de uso indispensable, de atención a la comunidad, de ocupación especial o normal, definidos en el título A del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente como grupo de uso IV, III, II y I respectivamente y considerando además si la región en la cual se ubica el proyecto es propensa o no a huracanes, se puede determinar en el título B de la misma norma, en la tabla B.6.5-1 el factor de importancia correspondiente.

Tabla 3. Factor de Importancia. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

Categoría	Regiones no propensas a huracanes, y regiones con posibilidad de huracanes de $V = 40 - 45$ m/s	Regiones con posibilidades de huracanes y $V > 45$ m/s
I	0.87	0.77
II	1.00	1.00
III	1.15	1.15
IV	1.15	1.15

3) Se debe verificar con visitas de campo o mediante ayuda de herramientas web como Google Earth el tamaño y la distancia de las obstrucciones que se tienen a lo largo de 4 direcciones a 90 grados una de otra, con la más desfavorable, es decir, la que menor uniformidad en altura presenta es la que se escoge para el análisis de exposición y rugosidad según las secciones B.6.5.6.3 y B.6.5.6.2 respectivamente de la NSR 10.

4) El coeficiente de exposición se representa por K_z y depende de los 2 factores mencionados en el numeral anterior además de la Z , la cual se refiere a la altura de la estructura por encima del nivel del terreno en metros, este valor no debe ser inferior a 9 metros (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) para los cálculos. De acuerdo con la exposición se determinan los valores de la altura nominal de la capa atmosférica (Z_g) y el exponente para ley potencial de la velocidad de ráfaga de 3 segundos (α) en la sección B.6.5.6. Por último se determina la fórmula a utilizar, de acuerdo con el valor de Z y de Z_g , se reemplazan los valores y se halla K_z .

5) Para hallar el factor topográfico (K_{zt}), primero se debe definir el tipo de topografía (loma bidireccional, escarpe, colina axial simétrica) sobre la cual estará apoyada la estructura, segundo, se debe verificar que se cumplan todas las condiciones establecidas en la sección B.6.5.7.1. Si alguna no lo hace, K_{zt} será igual a 1. De lo contrario, se debe calcular de acuerdo a lo establecido en la sección B.6.5.7.

6) El factor de ráfaga depende de la rigidez de la estructura y se determina de acuerdo con la sección B.6.5.8.

7) Para determinar la clasificación de cerramientos, primero se hallan:

- El área de las aberturas (puertas, ventanas) de la cara en estudio (A0)
- El área de total de la cara en estudio (Ag)
- Área de las aberturas totales sin incluir la cara en estudio (A0i)
- Área total sin incluir la cara en estudio (Agi)

Posteriormente, se verifican todas las desigualdades que se encuentran en la sección B.6.5.9. y con base en las que se cumplen, se determina el tipo de cerramiento.

8) El coeficiente de presión interna (GCp) incluye el factor de ráfaga y depende del tipo de cerramiento, del ancho efectivo de la teja y el de la correa, para lo que se debe suponer una separación de estos elementos. Se hallan coeficientes independientes para la teja y para la correa según lo establecido en la sección B.6.5.11.1.

9) Los coeficientes de presión externa (Cp o GCpf) donde el primero no incluye el factor de ráfaga, pero el último sí, se determinan de acuerdo con la sección B.6.5.11.2.

10) Se debe hallar la presión por velocidad de viento (q_z o q_h), según aplique, esta se determina mediante la sección B.6.5.10. Con esta se puede determinar la presión y succión (carga de viento (W)) que se genera tanto para la teja como para la correa, mediante la siguiente ecuación, y sabiendo que se deben discriminar las zonas de estas cargas de viento según lo indica la norma NSR-10 en la sección B.6.5, teniendo en cuenta que para el sistema principal, las presiones mínimas sobre paredes longitudinales no deben ser menores a 400 N/m².

$$W_{\text{succión o presión}} = q_h((GCp) - (GCpi)) \text{ en } \frac{N}{m^2}$$

11) Se debe tener en cuenta que la carga de granizo (G) debe ser considerada para estructuras ubicadas por debajo de los 2000 msnm. Esto se encuentra en la sección B.4.8.3.

12) Teniendo todas las cargas que actúan sobre la cubierta, se escoge la correa que esté sometida al área de más carga y se realizan las combinaciones de carga por los métodos ASD (esfuerzos admisibles, para componentes y revestimientos) y LRFD (método de resistencia, para estructura principal), de acuerdo con las secciones B.2.3 y B.2.4, respectivamente.

1.3.11. Control de deformaciones

Si se consideran y diseñan las correas como simplemente apoyadas en sus extremos, la deflexión máxima (Δ), que esta puede presentar se da en el centro de la luz (l), siempre y cuando esta correa esté sometida a una carga uniformemente distribuida (w). Esta deflexión depende del módulo de elasticidad (E) y de la inercia (I) de la sección transversal, y está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{5 * w * l^4}{384 * E * I}$$

Luego la relación entre la deflexión máxima y la luz de las correas no debe sobrepasar los siguientes valores:

Tabla 4. Relaciones deflexión-luz máximas permitidas según ASCE. Fuente: (American Society of Civil Engineers, 2013)

Miembros de cubierta	Carga Viva de cubierta (Lr)	Carga viva + Carga muerta
Cielos no plásticos	1/360	1/240
Cielos plásticos	1/240	1/180
Sin cielos	1/180	1/120

El trabajo de grado, buscará maximizar el porcentaje de refuerzo de fibras vegetales cumpliendo con el criterio de falla para compuestos seleccionado, con criterio de falla por resistencia y criterio de falla por deflexión.

Nota: se toma la referencia del ASCE (American Society of Civil Engineers, 2013) debido a que la norma NSR-10 de Colombia no especifica ningún control para los elementos tipo correa.

1.3.12. Proceso de fabricación

Para la construcción y fabricación del modelo experimental de la viga hueca con las proporciones óptimas de cada tipo de refuerzo se utiliza la técnica Moldeo Manual la cual consiste en impregnar resinas de polímeros sobre un molde, generalmente de metal, con el refuerzo de fibras previamente puesto sobre el molde. También se puede utilizar la técnica de moldeo por transferencia asistido por vacío (VARTM, por sus siglas en inglés), esta consiste en inyectar resinas de polímeros en un molde sellado al vacío (Song, 2003)

2. METODOLOGÍA

2.3. ETAPA 1: DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE DESARROLLO

En esta etapa se efectuó una revisión en bases de datos, artículos de revistas científicas, memorias de seminarios, conferencias y otros elementos de información que pudieran aportar al conocimiento de temas relacionados con el objeto del trabajo de grado. Sobre estos se desarrolló un análisis para clasificarlos según el tema y así se obtuvo una base de datos con bibliografía técnica a la cual se pudo acceder a lo largo de todo el proyecto y se alimentó con el pasar de los días.

2.4. ETAPA 2: SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL MATERIAL COMPUESTO A MODELAR Y GEOMETRIAS DE DISEÑO.

2.4.1. Dimensiones de la nave industrial y de la correa-viga

Para definir la geometría de la nave industrial se realizaron consultas bibliográficas y las dimensiones de la nave industrial se tomaron con base en especificaciones del experto Luis Horacio Restrepo, quién es especialista en estructuras de la Universidad Nacional de Colombia y ha sido profesor de cátedra en la Universidad EIA, del ingeniero Edison Agudelo, diseñador en la empresa Doblamos S.A, y en base a las recomendaciones de otros documentos.

2.4.2. Selección de materiales que conforman el material compuesto a modelar

Para la selección de los diferentes materiales a modelar, se consultó en bibliografía acerca del tema en artículos científicos, bases de datos y sitios web acerca de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales, aplicaciones en la ingeniería civil y caracterizaciones mecánicas de estos.

2.5. ETAPA 3: SIMULACIÓN DE LA VIGA DE MATERIAL COMPUESTO

2.5.1. Configuración de cargas

Con base en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) se definieron las solicitaciones a las que se verá sometida la viga hueca, es decir se definieron los valores correspondientes de carga muerta (D), carga viva de cubierta (Lr) y carga de viento (W), las cuales dependen del tipo de edificación y de sus características geométricas, además de las respectivas combinaciones adoptadas en NSR-10 para el método de la resistencia (LRFD).

2.5.2. Simulación computacional

Durante esta etapa, después de definir las cargas, geometría y los materiales a usar, se utilizaron las constantes elásticas o las propiedades mecánicas, las cuales son datos de entrada en el modelo de material ortótropo, y se usaron directamente de resultados anteriores; de proyectos del grupo de investigación en materiales y procesos alternativos MAPA, exactamente del proyecto “Estudio numérico y experimental para determinar los porcentajes de sustitución de fibras sintéticas por fibras vegetales autóctonas usadas como refuerzo de materiales compuestos empleados en la elaboración de aspas de aerogeneradores de eje vertical”, perteneciente a la Universidad EIA; que fueron introducidas en el modelo de elementos finitos tipo cascara, de un software CAD, especialmente en Siemens NX® disponible en esta misma institución. Luego, se analizó la sustitución de capas de fibra sintética por capas de fibra vegetal en el material compuesto y la influencia de otras variables como el número de capas, el espesor del laminado, entre otras. Los modelos de elementos finitos ayudaron a estimar el comportamiento mecánico de la estructura mediante el cálculo de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos de tracción, compresión y corte.

Con base en los resultados obtenidos de dichos modelos numéricos, se determinó el porcentaje óptimo o la relación entre fibras vegetales y fibras sintéticas que arroja los mejores resultados y cumple con los criterios establecidos por la normatividad vistos en secciones anteriores.

2.6. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE CONSTRUCCIÓN

Para la construcción o fabricación de la viga hueca, se evaluarán dos alternativas, la primera es la técnica de Moldeo por Transferencia de Resina Asistido (VARTM), para esto se necesita una máquina que se desarrolló en el proyecto de investigación “Adaptación tecnológica del proceso VARTM para fabricar componentes de aerogeneradores” ubicada en Universidad EIA, en esta máquina se hicieron ensayos previos de infusión con el fin de tener experiencia en el proceso, y la segunda alternativa es la técnica de moldeo manual, la cual consiste en impregnación de resina manual. Inicialmente se trabajó con el proceso VARTM pero los resultados de este no fueron exitosos así que se decidió adoptar la técnica de moldeo manual.

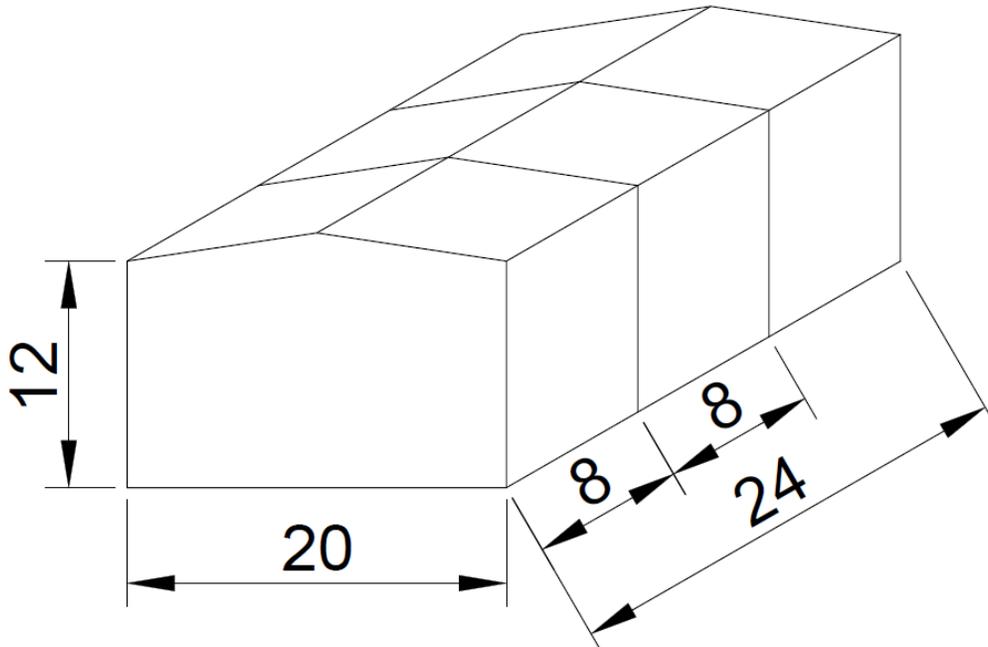
2.7. CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y PRUEBA DEL MODELO A ESCALA PARA COMPARAR CON LA SIMULACIÓN

Se construyó una viga hueca a escala empleando la técnica de Moldeo manual y fue ensayada a flexión según lo establecido por la norma respectiva, que permita la comparación de los resultados obtenidos en la simulación computacional posterior. En este ensayo se midieron deflexiones y deformaciones, mediante galgas extensiométricas. Para esto se necesitó del marco de carga con capacidad de aplicar 500 kgf, el cual tiene su celda de carga, para medir la fuerza aplicada. Este está ubicado en la Universidad EIA. Con base en esta prueba se compararon resultados y se determinó un porcentaje de error, con respecto a los esfuerzos calculados y a las simulaciones numéricas.

3. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.4. DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL DE LA NAVE INDUSTRIAL

La estructura estará ubicada en la ciudad de Medellín como se definió anteriormente, las dimensiones generales de esta se tomaron con base a las opiniones de expertos diseñadores estructurales de naves industriales. Estas personas aportaron con las dimensiones típicas las cuales se dan a continuación. En una nave industrial tradicional el ancho es de 20-30 metros, la altura a la cornisa es de 12 metros, cuenta con una cubierta a dos aguas con una pendiente del 15%, ya que a partir de esta pendiente se considera la carga de granizo como la mitad de lo que se debe considerar en un diseño normal, si la norma lo requiere, los pórticos principales están separados entre 7.5 metros y 10 metros (Mejía, 2015) y (Labein Tecnalia, 2008). Siguiendo estas recomendaciones, para este caso se tomó un ancho de nave industrial igual a 20 metros, una altura de cornisa igual a 12 metros, pendiente de cubierta de 15%, la estructura esta conformada por 4 pórticos separados a 8 metros cada uno y separación entre correas de 1.7 metros, estas dos ultimas medidas fueron tomadas según entrevista con el profesional Edison Agudelo (Agudelo, 2015).



3.5. DIMENSIONES DE LA VIGA HUECA - CORREA

Según las indicaciones del profesional Luis Horacio Restrepo acerca de la geometría típica de una correa, él expresa, según su experiencia, que la altura típica para una correa de una nave industrial es de 220 o 305 mm. Por criterios del autor y director de este

trabajo se tomó la decisión de que la viga tenga una altura de 305 mm para mejorar su capacidad a flexión. El ancho de la viga se tomó igual a 220 mm, esto se hizo con el fin de compararla con los perfiles ACESCO® HR, los cuales tienen geometrías muy similares en vigas cajón o huecas. Las dimensiones de la viga se pueden observar en la siguiente Ilustración 9.

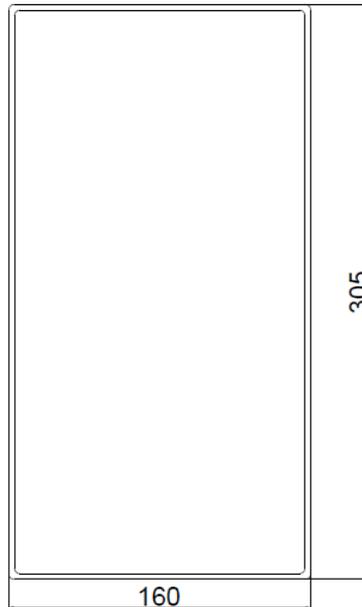


Ilustración 9. Geometría de la correa.

3.6. COMPUESTO DE FIBRA VEGETAL, FIBRA SINTETICA Y MATRIZ POLIMERICA

Teniendo en cuenta la información suministrada en el marco teórico de este trabajo la fibra vegetal escogida es el lino, esta decisión esta soportada en diferentes artículos e investigaciones científicas, como los artículos de caracterizaciones mecánicas de compuestos donde se evalúan las propiedades de varios tipos de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica y al final se concluye que: *“el lino tiene las propiedades más efectivas en términos de resistencia, deformación y rigidez con respecto a las demás fibras ensayadas”* (Codispoti, Oliveira, Olivito, Lourenco, & Fangueiro, 2015). Efectivamente, en trabajos científicos de investigadores colombianos como el efectuado por el grupo MAPA de la Universidad EIA, cuyo nombre es “Estudio Numerico y Experimental Para Determinar los Porcentajes de Sustitución de Fibras Sinteticas por Fibras Vegetales Autoctonas Usadas Como Refuerzo de Materiales Compuestos Empleados en la Elaboración de Aspas de Aerogeneradores”, donde se realizan caracterizaciones mecanicas a compuestos polimericos con matriz de poliester y diferentes fibras como el algodón, el jute y el lino, en este trabajo se concluye que el lino *“posee el mayor potencial, frente al jute y al algodón, para ser empleado en la fabricación de compuestos laminares”* (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015). Se escogió entonces el tejido de lino como fibra vegetal para usar en el

compuesto, la fibra de vidrio por su amplia disponibilidad en el mercado colombiano como fibra sintética y una matriz de poliéster marca Altec®, una matriz de reactividad media, pre-acelerada y con bajo contenido de estireno. Uniendo estos materiales se tiene un material híbrido entre matriz polimérica fibra vegetal y fibra sintética.

3.7. ANALISIS DE CARGAS

Datos:

- Ubicación: Medellín
- Planta: 4 pórticos separados a 8 m
- Correas: viga hueca en material compuesto 305x160x3 mm
- Aberturas: edificio parcialmente cerrado
- Pendiente: 15% = 8,5°

3.7.1. Definición de presión por viento

Para lograr este objetivo, el cálculo de la presión por viento se hizo mediante el método analítico aprobado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) en su sección B.6.5. Los siguientes son los pasos a seguir:

3.4.1.1 Velocidad básica de viento (V_s) y dirección (K_d):

- Medellín pertenece a la región 4, por lo que:

Tabla 5. Parámetros de velocidad del viento. Fuente: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

Elemento	Método de diseño	V_s (km/h)	V_s (m/s)	Fuente
Tejas	ASD	120	33	Fig B.6.4-1
Estructura	LRFD	150	42	

En ambos métodos de diseño el coeficiente K_d se toma igual a 0,85 puesto que el tipo de estructura es un edificio (Tabla B.6.5-4).

3.4.1.2 Factor de importancia (I):

La estructura es de ocupación normal, por lo que pertenece al grupo I. Medellín no es una región propensa a huracanes de más de 162 km/h

Por las consideraciones anteriores $I=0,87$. (Tabla B.6.5-1)

3.4.1.3 Coeficiente de exposición (K_z):

Generalmente, en Medellín casi todas las construcciones o proyectos se encuentran rodeados de obstrucciones de tamaño mayor al de una vivienda unifamiliar como edificios residenciales, instalaciones deportivas y educativas (auditorios), entre otras. Por lo tanto, la rugosidad=B (Sección B.6.5.6-2)

Prevalecen al menos 800 m de rugosidad B, por lo que la exposición también es del tipo B. (Sección B.6.5.6.3)

- Determinación del coeficiente K_z
 - Z : altura por encima del terreno en (m), $Z = 12$ m. Según la nota de la página B-81, el Z no debe ser menor a 9 m, entonces $Z = 12$ m.
 - Z_g : altura nominal de la capa atmosférica. Este valor es igual a 365,8m debido a que la exposición es tipo B. (tabla B.6.5-2)
 - α : exponente para ley potencial de la velocidad de ráfaga de 35, para exposición B $\alpha=7$. (Tabla B.6.5-2)

Luego tenemos que:

$$\text{Si } 4 \leq Z \leq Z_g \rightarrow K_z = 2,01 * \left(\left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\text{Si } Z < 4 \rightarrow K_z = 2,01 * \left(\left(\frac{4}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

En este caso, utilizaremos la $\text{Si } 4 \leq Z \leq Z_g \rightarrow K_z = 2,01 * \left(\left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \right)$ Ecuación 11.

Reemplazando valores tenemos:

$$K_z = 2,01 * \left(\left(\frac{12}{365,8} \right)^{\frac{2}{7}} \right) = 0,757$$

3.4.1.4 Factor topográfico (K_{zt}):

Tipo de topografía: loma bi-direccional, en este caso, $K_{zt} = 1$ puesto que es el caso más desfavorable.

3.4.1.5 Factor de ráfaga (G):

La estructura se considera rígida, por lo que $G=0,85$ (Sección B.6.5.8.1).

3.4.1.6 Clasificación de cerramientos:

Generalmente las naves industriales son estructuras parcialmente cerradas.

3.4.1.7 Coeficiente de presión interna (G_{Cpi}): incluye factor de ráfaga (G)

Por ser una estructura parcialmente cerrada:

$$G_{Cpi} \text{ presión} = +0,55 \quad (\text{Figura B. 6.5.2})$$

$$G_{Cpi} \text{ succión} = -0,55 \quad (\text{Figura B. 6.5.2})$$

3.4.1.8 Determinación carga de viento

Debido a la geometría de la estructura, $h = 13,5$ m.

- Como $h < 9$ m, entonces se cumple que $Kh = Kz$. Se debe notar que 9m es la altura mínima que se debe tomar para utilizar la formula con la cual se halló anteriormente Kz y es la misma para hallar Kz . (Tabla B.6.5-3)
- Teniendo en cuenta $Kh = 0,785$, se puede hallar qh mediante la siguiente expresión:

$$qh = 0,613 * Kh * Kzt * Kd * V^2 * I$$

$$Si: Kh = 0,785; Kzt = 1; I = 0,87; V_{ASD} = \frac{33m}{s}; V_{LRFD} = \frac{42m}{s}$$

$$qh_{LRFD} = 0,613 * 0,785 * 1 * 0,85 * 42^2 * 0,87 = 627 \frac{N}{m^2}$$

- Para edificios bajos, es decir, $h < 18$ m y parcialmente cerrado, se tiene:

$$p = qh * (GCp - GCp) \text{ en } \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

3.7.2. Fuerzas de viento en correas y revestimientos

3.7.2.1. Definición de cargas

Carga muerta (D):

- Teja = 0,1 kN/m²
- Instalaciones = 0,05 kN/m²
- Peso propio correas = 0,02 kN/m²

Total D = 0,17 kN/m²

Carga viva de cubierta (Lr):

Como la pendiente es igual al 15%, entonces:

Total Lr = 0,5 kN/m² (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

3.7.2.2. Coeficientes de presión externa (Gcp)

Área efectiva para las correas (Aef)

Como ya fue definida, la separación (S) de las correas es de 1,7 m. posteriormente, se debe calcular el ancho efectivo (Baf):

$$Baf = \text{Máx} \left(S; \left(\frac{L}{3} \right) \right) = \text{Máx} \left(1,7; \left(\frac{8}{3} \right) \right) = 2,66 \text{ m}$$

Entonces, el área aferente es igual a: $8 \times 2,66 = 21,28 \text{ m}^2$

Con esto, en la figura B.6.5-8C de (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) se pueden determinar así:

- Gcp presión = +0,3 para todas las zonas

- G_{cp} succión = -0,8 para las zonas 1
- G_{cp} succión = -1,2 para la zona 2
- G_{cp} succión = -2 para la zona 3

3.7.3. Análisis inicial (para escoger el perfil)

3.7.3.1. Definición cargas de diseño

Teniendo en cuenta que la cubierta es a dos aguas, se utiliza la figura B.6.5-8C de NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) y la Ilustración 10 y 11 para determinar el valor de a y escoger la correa a analizar posteriormente.

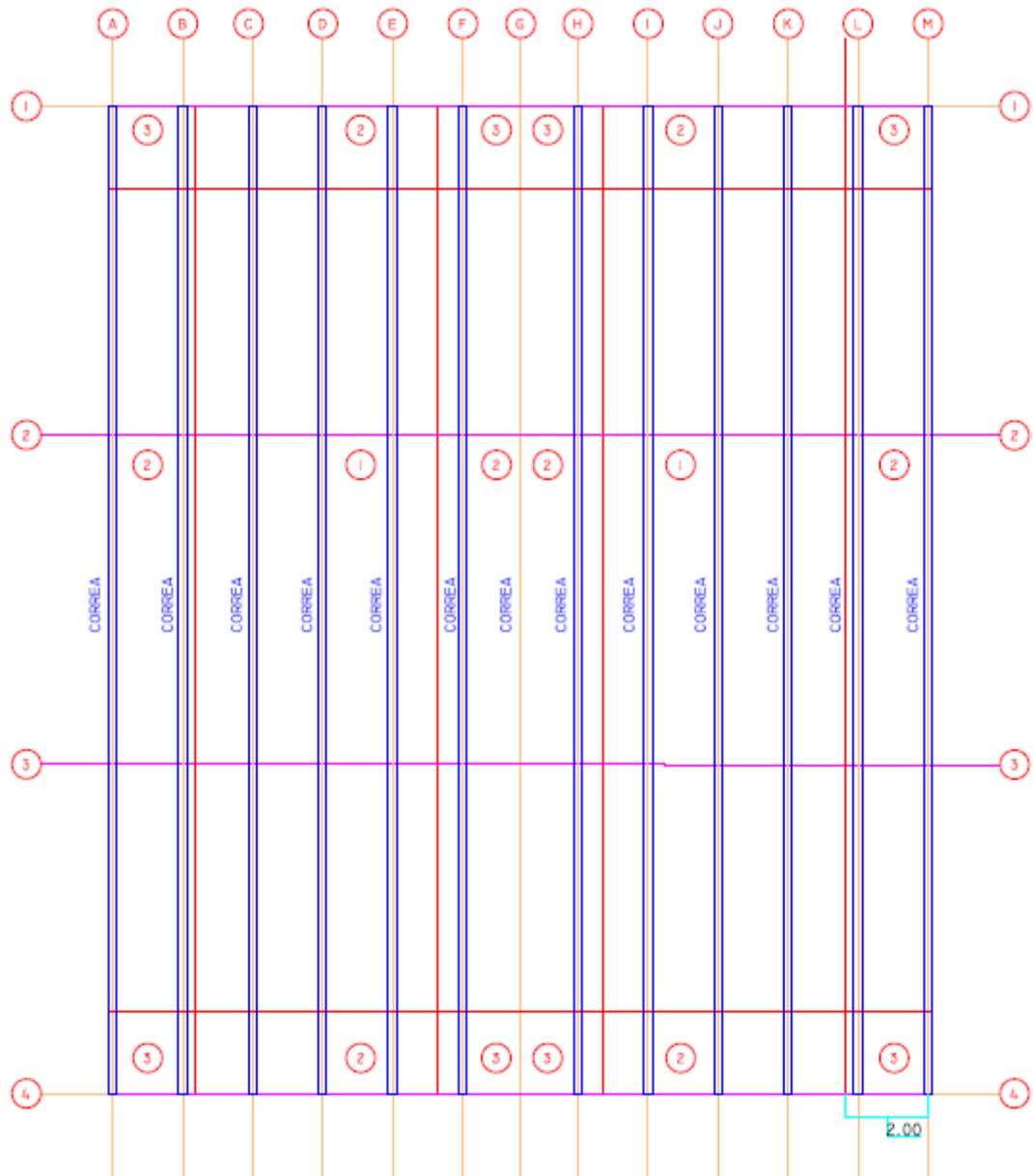


Ilustración 10. Distribución en planta de las correas sobre la cubierta.

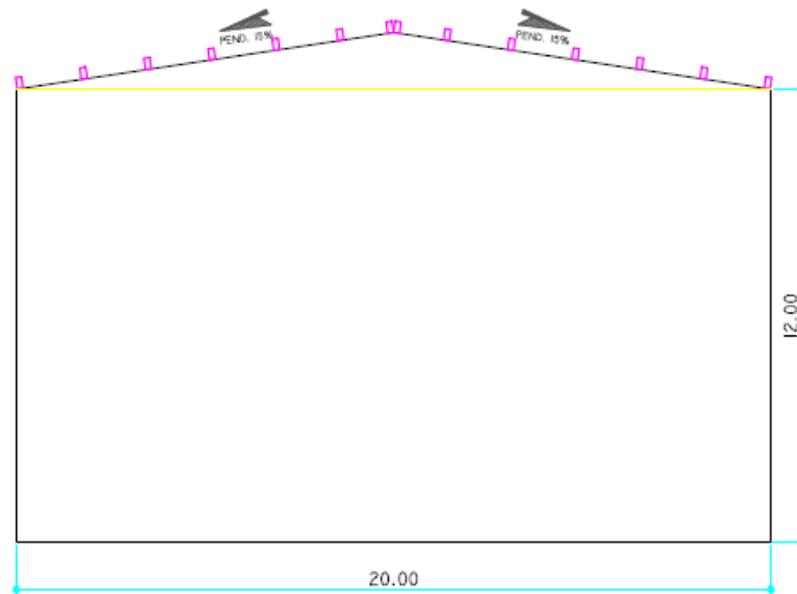


Ilustración 11. Distribución en planta de correas sobre la cubierta.

$$a = \text{Máx} [\text{Min}\{0,1 * (L \text{ ó } B); 0,4h\}; \text{Máx}\{0,04 * (L \text{ ó } B); 1 \text{ m}\}]$$

Donde:

- (L ó B) se refiere a la dimensión horizontal menor, en nuestro caso es B y es igual a 20 m
- h = altura media de la estructura = 12,75 m.

Entonces, reemplazando valores se obtiene:

$$a = \text{Máx} [\text{Min}\{0,1 * 20; 0,4 * 12,75\}; \text{Máx}\{0,04 * 20; 1 \text{ m}\}] = 2 \text{ m}$$

Anteriormente se definió que $qh = 627 \text{ N/m}^2$ y teniendo los G_{cp} , se pueden determinar las presiones para cada zona:

$$P = qh * [G_{cp} - G_{cpi}] \quad \text{Ecuación 13}$$

$$P_{\text{succión zona1}} = 627 * [-0,8 - 0,55] = -846,45 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$P_{\text{succión zona2}} = 627 * [-1,2 - 0,55] = -1097,25 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$P_{\text{succión zona3}} = 627 * [-2 - 0,55] = -1348 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$P_{\text{presión zona}} = 627 * [+0,3 + 0,55] = 532,95 \frac{N}{m^2}$$

Con esta información, se determina que la correa B entre los ejes 4 y 3 es la correa más desfavorable, puesto que se encuentra sometida a las mayores presiones y succiones en zona 3,2 y 1.

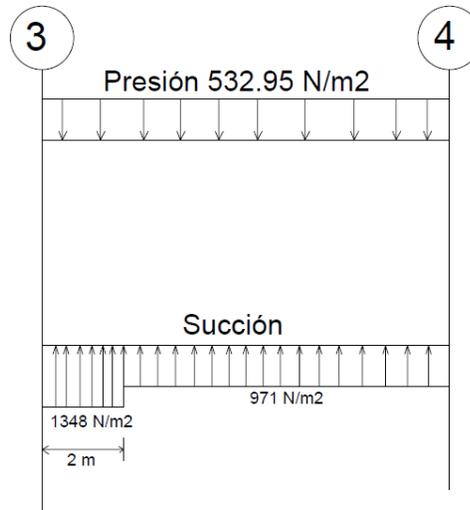


Ilustración 12. Distribución de fuerzas sobre la correa.

De acuerdo a la Ilustración 12 y realizando los promedios correspondientes para las zonas de la correa que están expuestas a varios coeficientes de presión, se obtiene:

- Carga uniforme de presión con la cual se diseñará = 0,532 kN/m²
- Carga uniforme de succión con la cual se diseñará = 1,348 kN/m²

3.7.4. Combinaciones de carga

Primero que todo, se debe descomponer, en componentes de fuerza en direcciones cartesianas globales, tanto la carga muerta como la viva, como se puede ver en la Ilustración 13. Ejes de la correa.

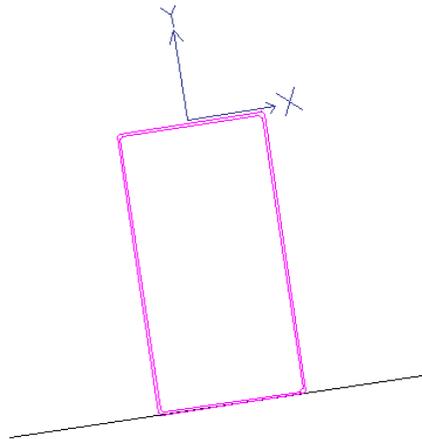


Ilustración 13. Ejes de la correa.

Nota: las componentes en “X” se deben multiplicar por $\text{Sen}(\theta)$ y las de “Y” por $\text{Cos}(\theta)$, siendo θ el ángulo de la cubierta respecto a la horizontal (pendiente).

Entonces, realizando las combinaciones de carga, que se pueden encontrar en el título B de NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) correspondientes y pasando cada una a metro lineal, multiplicando por el ancho aferente de cada correa, para obtener el modelo de viga, se obtiene:

- C1: 1,4D
- C2: 1,2D + 1,6(Lr ó G) + (L ó 0,5Wpresión)
- C3: 1,2D + 0,5(Lr ó G) + L + Wpresión (Wp)
- C4: 0,9D + Wsucción (Ws)

En la Tabla 6 se puede apreciar los resultados de evaluar cada combinación, allí se dan los resultados de evaluar cada carga en las anteriores combinaciones. En base a esta tabla se determinará cual es la combinación más desfavorable (más carga) para la correa.

Tabla 6. Combinaciones de diseño para correa.

Datos Y		Combinación	γ_1	γ_2	γ_3	Wuy (kN/m)
Dy (kN/m)	0,285	C1	1,4	0	0	0,399
Lry (kN/m)	0,84	C2	1,2	1,6	0,5	2,136
Wpy (kN/m)	0,9	C3	1,2	0,5	1	1,662
Wsy (kN/m)	2,29	C4	0,9	0	-1	-2,0335
Datos X		Combinación	γ_1	γ_2	γ_3	Wux (kN/m)
Dx (kN/m)	0,042	C1	1,4	0	0	0,0588
Lrx (kN/m)	0,12	C2	1,2	1,6	0,5	0,2424
Wpx (kN/m)	0	C3	1,2	0,5	1	0,1104
Wsx (kN/m)	0	C4	0,9	0	-1	0,0378

Como se puede observar, la combinación que da como resultado la mayor carga lineal en ambas componentes es la segunda $(1,2D + 1,6(Lr \text{ ó } G) + (L \text{ ó } 0,5W_{\text{presión}}))$.

Para el análisis de deflexiones, las cargas por metro lineal en la dirección y son:

- $Lr = 0,5 * 1,7 * \cos(8,53) = 0,84 \frac{kN}{m}$
- $D = 0,17 * 1,7 * \cos(8,53) = 0,285 \frac{kN}{m}$
- $W_{\text{presión}} = 0,532 * 1,7 = 0,90 \frac{kN}{m}$
- $W_{\text{succión}} = 1,348 * 1,7 = 2,29 \frac{kN}{m}$
- $W_{\text{succión}} - D = 2,29 - 0,289 = 2,00 \frac{kN}{m}$
- $Lr + D = 0,85 + 0,289 = 1,139 \frac{kN}{m}$

3.7.5. Control de deformaciones - Máximas deformaciones permitidas por la ASCE

En la sección 1.3.11 correspondiente al control de deformaciones se puede apreciar en Tabla 4 que las deflexiones permitidas bajo el código ASCE-07 (American Society of Civil Engineers, 2013) correspondiente a Estados Unidos, son las siguientes:

- $Lr = \frac{L}{180} = \frac{8000}{180} = 44,44mm$
- $Lr + D = \frac{L}{120} = 66mm$

3.8. MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS (FEM)

3.8.1. Software

El software con el cual se realizó el análisis por Elementos Finitos fue NX 8.5, como se dijo anteriormente el cual es desarrollado por Siemens©. En este es posible ejecutar análisis estructurales lineales y no lineales, análisis térmicos, análisis de movimientos cinemáticos, análisis de flujo, análisis de fatiga y lo más importante para este proyecto, análisis de materiales compuestos laminados.

3.8.2. Definición virtual de la geometría

Según la geometría definida en párrafos anteriores se hace uso de las herramientas de dibujo en tres dimensiones para así generar su la correa que se puede apreciar en Ilustración 14.

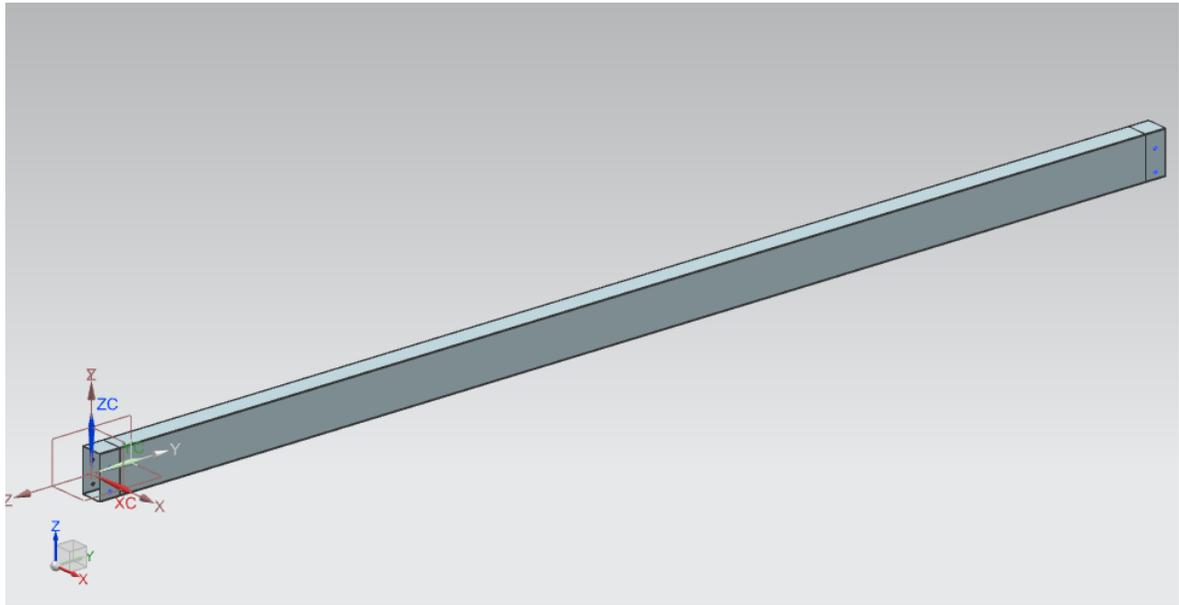


Ilustración 14. Geometría de la viga simulada.

3.8.3. Selección de rutina de cálculo y tipo de análisis

En este caso, se llevó a cabo un análisis estructural, para esto se escogió el solver estructural de NX, el cual posee diferentes tipos de análisis estructurales como el lineal, el no lineal o el dinámico.

Se determinó que el mejor solver era el NX NASTRAN, porque este contiene al elemento CQUAD4, el cual es el elemento lineal útil para compuestos laminares de 4 nodos (Mercado Navarro, Método de elementos finitos, 2015). Como se escogió un análisis estático lineal la solución seleccionada en el programa es 101 Linear Statics – Global Constraints. Todos estos parámetros se determinaron así puesto que se esperaban pequeños desplazamientos con respecto a las dimensiones de la viga.

3.8.4. Modelo y propiedades del elemento finito para discretización o mallado de geometría

Para poder determinar cómo se realizará el análisis por elementos finitos, se debe elegir qué tipo de elemento se va a escoger, pues existen elementos en 0D, 1D, 2D, 3D. En cada uno de estos existen muchas posibilidades, diferenciándose por el número de nodos en los cuales se resuelven las ecuaciones de rigidez. Igualmente se debe tener en cuenta que mientras más nodos más ecuaciones para resolver y mayor costo computacional existirá. Es por esta razón que se optó por elegir un elemento tipo cáscara de 4 nodos (CQUAD4), el cual tiene propiedades interesantes (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015), como las siguientes:

- Realizar modelaciones de diferentes materiales con diferentes capas y diferentes espesores

- Utilizar geometrías no regulares (no rectas)
- Posee un costo computacional mucho más bajo que los elementos con más nodos.

3.8.5. Selección de propiedades de los tejidos de fibra de natural y fibra de vidrio

Las propiedades utilizadas para la conformación del material polimérico reforzado con fibras de vidrio y de lino se pueden encontrar en (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015) y en la Tabla 7. Para realizar la caracterización mecánica de los compuestos, las fibras vegetales fueron sometidas a un tratamiento químico con Hidróxido de Sodio (NaOH); se fabricaron moldes de PVC de alta densidad, con ayuda de laboratorio de Metalmecánica de EIA, para las probetas con dimensiones normalizadas según las normas ASTM para ensayos de tracción, compresión, corte en el plano y corte fuera del plano para materiales compuestos reforzados con fibras. Las probetas fueron fabricadas mediante la técnica de moldeo manual, la resina fue catalizada con un producto MEKP al 1.5% de volumen. Las normas bajo las cuales se caracterizaron los materiales fueron las siguientes:

- ASTM D3039 – Ensayo de tracción.
- ASTM D3410 – Ensayo de compresión.
- ASTM D790-10 – Ensayo de flexión.
- ASTM D3518 – Ensayo de corte en el plano.
- ASTM D7078M-05 – Ensayo de corte fuera del plano.

En la Tabla 7, que se presenta a continuación, se puede observar las propiedades mecánicas del material compuesto resina de poliéster – tejidos de fibra de vidrio y del material compuesto resina de poliéster – tejidos de fibra de lino.

Tabla 7. Propiedades utilizadas en la simulación. Fuente: (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015)

Propiedad	Vidrio	Lino
E1t (MPa)	18280,542	1978,2
E2t (MPa)	18280,542	1903,2
v12t	0,1779	0,2701
G12 (MPa)	1187,62	697,8
G13=G23 (MPa)	1904,512	1174,2
G31=G32 (MPa)	1775,096	1174,2
St1 (MPa)	151,8	25,6833
St2 (MPa)	151,8	19,4333
Ss12 (MPa)	30,253	12,9067
Sc1=Sc2 (Mpa)	95,327	78,955

Ss13=Ss23 (Mpa)	15,103	14,51
-----------------	--------	-------

Dónde E_i es el módulo de elasticidad del compuesto en la dirección i , G_{ij} es el módulo de cortante que tiene como vector normal i en la dirección k , ν_{ij} es el coeficiente de poisson que tiene como vector normal i en la dirección k , St_1 es la resistencia a la tracción en la dirección del eje i , Sc_1 es la resistencia a la compresión en la dirección del eje i , Ss_{ij} es la resistencia al esfuerzo cortante que tiene como vector normal i en la dirección j .

Los tejidos de refuerzo de fibra de vidrio tipo Volam, la cual fue suministrada por la empresa Sumiglass S.A. El tejido de lino contiene 50 X 54 hilos, donde el primer número indica el número de hilos de la urdimbre y el segundo, el número de hilos de la trama por pulgada. Las densidad superficial de los tejidos de las fibras de vidrio, fue calculada por el autor de este documento, y es igual a 236 g/m² y la densidad superficial del tejido de fibra de lino se encuentra en (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015) y es igual a 72 g/m².

3.8.6. Definición del objetivo de sustitución

Entiéndase objetivo de sustitución como la cantidad máxima de capas de fibra de vidrio en una viga hueca, que se pueden sustituir por capas de tejido de lino. Para definir esas cantidades, se tomó como base el espesor máximo del perfil de donde se determinan la geometría transversal, es decir, en base al espesor máximo de un perfil PHR CC 305X80X3 donde el último dígito de la anterior referencia pertenece al espesor del material, así se define como 3mm el espesor de las paredes de la viga hueca.

Teniendo el espesor de la viga, se encontró que los espesores de los compuestos de resina de poliéster-fibra de vidrio y poliéster-fibra de lino son iguales a 0,333 mm y 0,3 mm, respectivamente. Con este dato se asume que para lograr un espesor final de la viga igual al modelo base (PHR) se deben adicionar máximo 10 capas de fibras que actúen como refuerzo del material (fibra de vidrio o tejido de lino). Luego el objetivo de sustitución es remplazar la cantidad máxima entre 10 capas de fibra de vidrio por tejidos de fibras de lino en un material compuesto polimérico sometido a cargas consideradas anteriormente.

3.8.7. Teoría de falla del material compuesto

El criterio de falla usado para pronosticar la falla del material compuesto polimérico reforzado con fibras naturales, en este caso, es el criterio de falla de Hoffman, el cual pertenece a los criterios de falla no asociados con modos de falla, este grupo incluye todos los criterios polinomiales y tensoriales describiendo la superficie de falla como una función de la resistencia del material y no considera que el carácter no homogéneo de los materiales compuesto lleva a diferentes modos de falla de los constituyentes, algunos modos de fallas son: fractura de la fibra, figuración transversal de la matriz, etc (Camanho, 2002). Este criterio brinda la posibilidad de guardar diferentes resistencias a compresión y tensión. Según esto Hoffman agregó términos lineales a la ecuación de Hill.

$$-\frac{\sigma_1^2}{X_c X_t} + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_c X_t} - \frac{\sigma_2^2}{Y_c Y_t} + \frac{X_c + X_t}{X_c X_t} \sigma_1 + \frac{Y_c + Y_t}{Y_c Y_t} \sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} = 1$$

Donde σ_1 y τ_{12} son los esfuerzos en las direcciones principales y X e Y las resistencias a tracción y compresión (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015). Se debe aclarar que el material falla cuando el índice de falla es mayor que 1.

3.8.8. Definición del tamaño de malla a usar

Para definir el tamaño de la malla a utilizar en esta simulación se realizó un análisis de convergencia, es decir, se define una relación inicial entre el tamaño (lado) del elemento (L) y el espesor del material (h), luego de esto se verifica el resultado que tienen los esfuerzos de tracción para la última capa para cada relación (L/h), se grafican estos resultados y se verifica en qué punto esta relación deja de ser una variable significativa en los resultados arrojados por el modelo. La relación inicial (L/h) fue una recomendación del director de trabajo de grado con $L/h=15$. Se tomó como resultado el esfuerzo máximo (σ) en la capa 10 del material, en la

Ilustración 15 se puede observar el punto de máximo esfuerzo, el cual se encuentra ubicado en la superficie inferior de la correa o viga, longitudinalmente está en el centro de la luz, y en un costado (esto porque también existen cargas en la dirección X). En la Ilustración 16 y Tabla 8 se pueden ver los resultados.

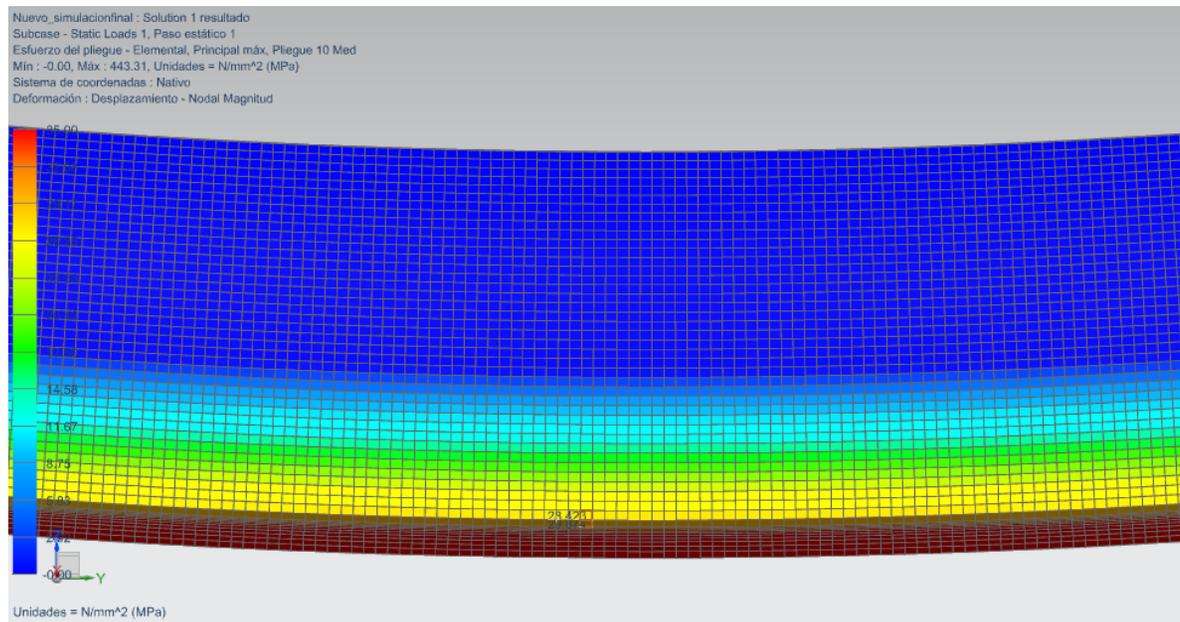


Ilustración 15. Punto de esfuerzos máximos en la correa.

Tabla 8. Relaciones y resultados usados en análisis.

Relación L/h	σ (MPa)
15	32,072
10	31,210

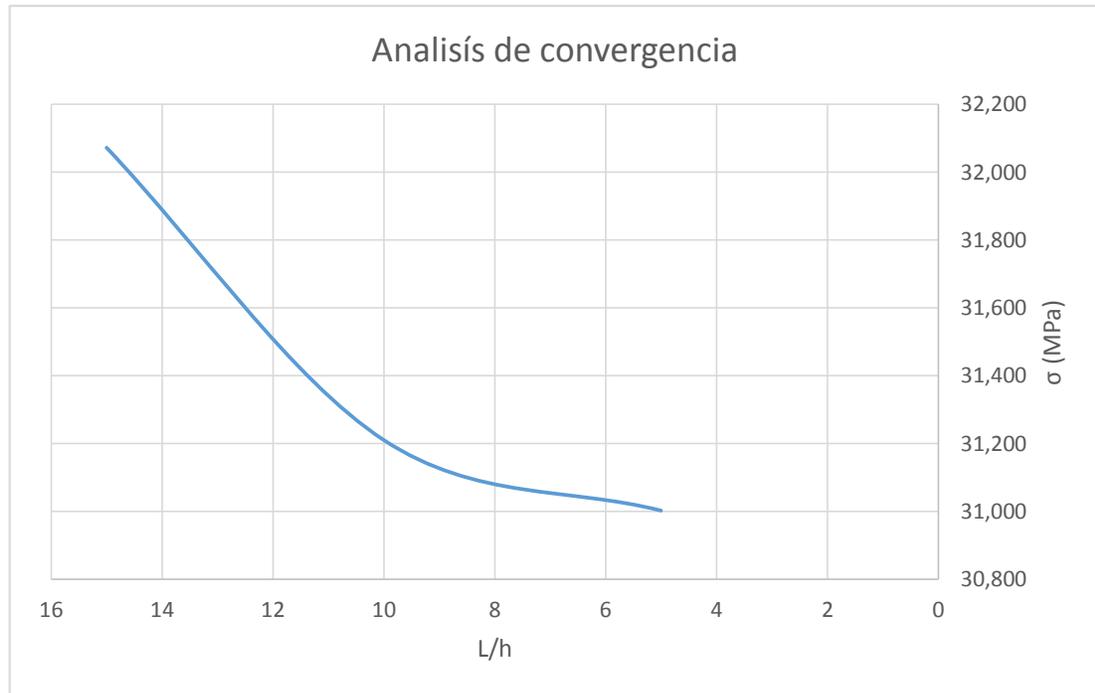


Ilustración 16. Análisis convergencia.

Se aclara que las condiciones de borde que se toman para realizar este análisis, se encuentran en la sección 3.8.9 y se han denominado Condiciones de borde sobre arandela, allí se explica con más detalle, en qué consisten estas condiciones. La relación L/h no pudo ser menor debido a la capacidad del sistema con el que se simuló (Procesador Intel Core i3, Tarjeta de video ATI Radeon), este no soportaba todos nodos que se generaban con tamaños de malla más pequeños. Después de observar los resultados en Ilustración 16 y Tabla 8 y dadas las condiciones que no se prestaban para obtener tamaños de malla más pequeños, se analiza que el tamaño más pequeño con el que se puede trabajar, debe ser el escogido, debido a que se puede notar una suavización de la curva y de la pendiente., así la relación entre la variación de la variable dependiente (esfuerzos máximos) y la variación entre la variable dependiente (relación L/h) es menor.

Otros aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de modelar y mallar un elemento como los que se trabajaron durante este trabajo son: la relación ancho/largo del elemento debe ser cercana a uno, las desviaciones angulares deben ser menor o iguales a 30° a partir de los 90° que tendría un elemento cuadrado. Los desplazamientos deben ser de una magnitud que no supere el orden del espesor. Si los desplazamientos superan al espesor se requiere de un análisis no lineal. (Iberisa, 2016)

3.8.9. Condiciones de borde

Para definir las condiciones de borde del sistema viga, se investigaron diferentes estructuras con estos perfiles como correas, y se examinaron las conexiones de estos elementos a los portacorreas para así definir estas condiciones, se modeló el efecto de los pernos pasantes sobre las paredes laterales de la viga en los apoyos, así las restricciones al movimiento se daban sobre una arandela alrededor del eje de los pernos pasantes conectores entre correas o vigas y portacorreas, estas condiciones de borde se denominará a lo largo del informe como condiciones idealizadas. Como se tenían varios interrogantes sobre cuales debían ser estas condiciones de borde, también se modelo el sistema con condiciones de borde simplemente apoyadas, es decir, solo con restricciones al movimiento en el eje Z, sobre una de línea de nodos ubicados en A. Esto se puede ver claramente en la Ilustración 17, Ilustración 18 e Ilustración 189.

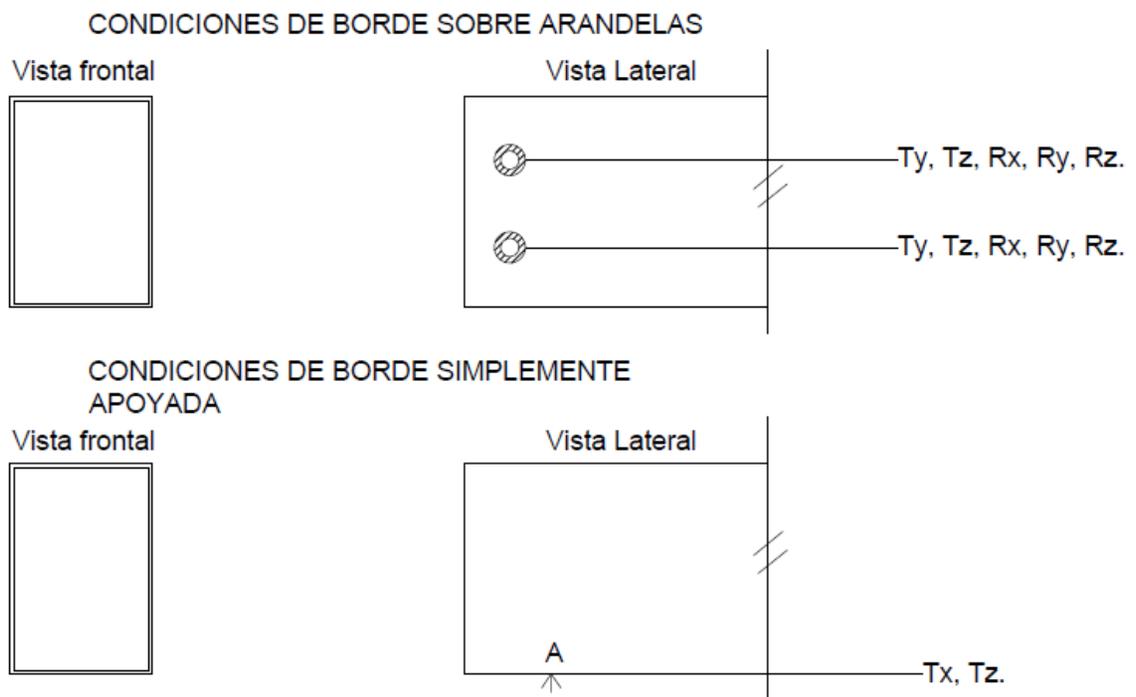


Ilustración 17. Condiciones de borde sobre arandela y simplemente apoyadas. Descripción gráfica.

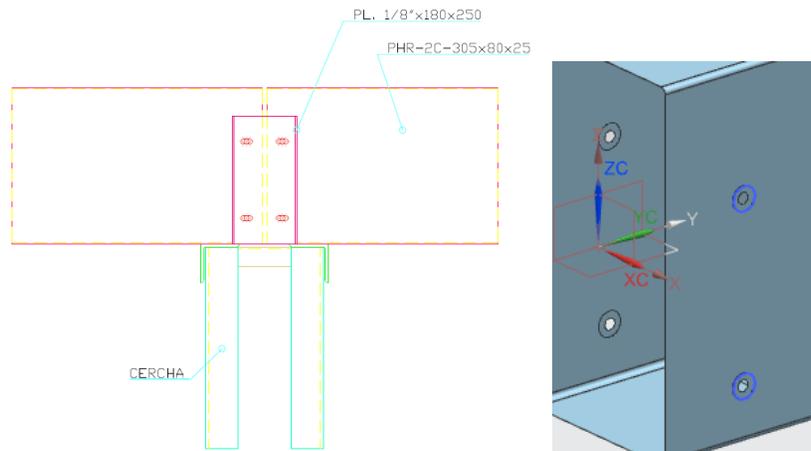


Ilustración 18. Detalle de conexión entre correa, portacorrea y cercha de apoyo. Ilustración 19. Condiciones de borde sobre arandela, tratando de simular efecto arandela y pernos.

En conclusión, las Condiciones de borde sobre arandela contienen las siguientes restricciones sobre las arandelas: traslación en Y y Z (T_y , T_z), rotación en X, Y y Z (R_x , R_y , R_z). Para la cara inferior de la viga traslación en Z (T_z) sobre el apoyo. Las condiciones de borde simplemente apoyadas contienen las siguientes restricciones sobre una línea de nodos perpendicular al punto A: traslación en X y Z (T_x , T_z). La Ilustración 20 enseña la malla en la zona de las arandelas, sobre estos nodos se impusieron las restricciones anteriores.

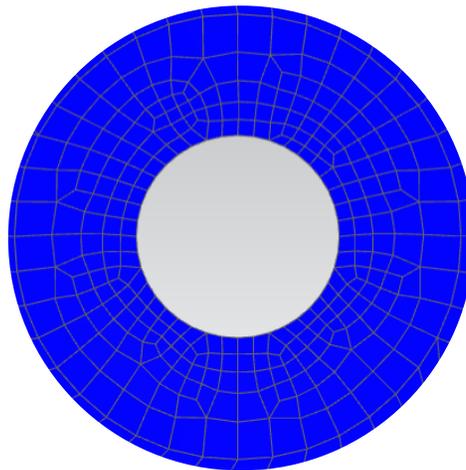


Ilustración 20. Mallado en zona de arandela.

3.9. VERIFICACIÓN DE LAS NORMALES DEL ELEMENTO

Cuando se realiza un análisis de elementos tipo cáscara con materiales compuestos reforzados con fibras, la orientación de las fibras es una de las variables con las que un ingeniero puede optimizar un diseño. Se debe verificar el vector normal a la orientación de las capas, en este caso, los resultados de esta verificación se muestran en la Ilustración

21, allí se ve claramente que los vectores están ubicados perpendicularmente a la superficie del elemento.

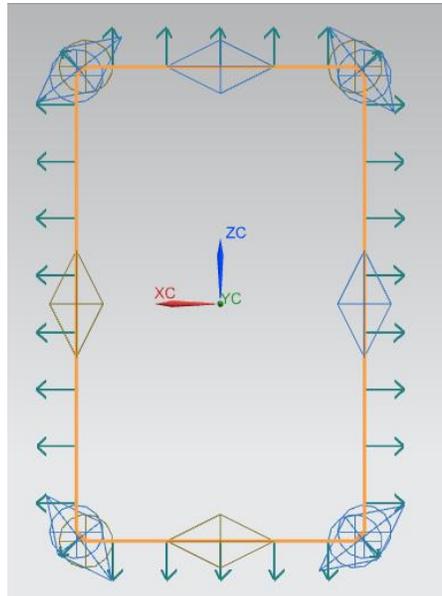


Ilustración 21. Normales del elemento.

3.10. FACTOR DE SEGURIDAD

Todas las resistencias de los materiales compuestos reforzados con tejidos de fibras de lino y vidrio fueron escaladas dividiéndose por un factor de seguridad de 2. Este valor se determinó así con base a lo propuesto por (Mallick, 2007) en su libro “*Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*”. Quién afirma que este es un valor adecuado para el diseño de este tipo de materiales. Con esto se busca adoptar medidas para controlar la incertidumbre que se tiene con las resistencias finales del material. La fórmula para calcular las nuevas resistencias (R_n) incluyendo el factor de seguridad (FS) es:

$$R_n = \frac{S}{FS}$$

Donde

S : Resistencia especificada en la Tabla 7.

3.11. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA O CORREA

Para la construcción de un modelo de viga en materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales y fibras sintéticas se construyeron dos moldes como se puede observar en Ilustración 22 por medio de madera tipo MUF como se observa en Ilustración 22. Las dimensiones iniciales de estos dos moldes eran 0,16 x 0,305 x 1m

cada uno. Así se podría construir una viga de 2m de largo. Los bordes redondeados de la viga se realizaron por medio de molduras denominadas cuarto de bosel, las cuales podían generar los bordes curvos sin ningún problema. Cabe aclarar que la viga se construyó empleando resina de poliéster con referencia Resiglas T, esto se hizo así porque se tenía una reserva de 10 kg de la resina original (Altec) con la cual se realizaron las caracterizaciones mecánicas anteriormente descritas, pero el personal de laboratorios de la Universidad EIA la usó sin consentimiento del autor de este documento ni del director de este trabajo de grado, luego fue complicado conseguir esa referencia y el distribuidor del producto afirmó que esta ya estaba descontinuada. Adicional a esto se utilizaron 6 capas de tejidos de fibras de lino Gazzeta y 4 capas de tejido de fibra de vidrio tipo Volan, las cuales si eran referencias iguales a las utilizadas en (Suárez Castañeda, Restrepo Montoya, & Mercado Navarro, 2015)



Ilustración 22. Molde de madera.

3.11.1. Técnicas para construcción de la viga o correa. Moldeo manual y VARTM.

Inicialmente se había contemplado la posibilidad de construir la viga por medio de la técnica VARTM. Para esta se necesitaban los siguientes materiales además de la resina y los tejidos de fibra

- *Bleeder Lease* tela desmoldante.
- Econolon plástico infusión: bolsa para contener el vacío.
- Cinta AT200Y: cinta que sella al vacío.
- *Green flow* infusión malla tipo angeo: malla para que la resina viaje a través de todo el tejido.

Estos componentes se pueden ver en Ilustración 23.

Typical resin infusion application

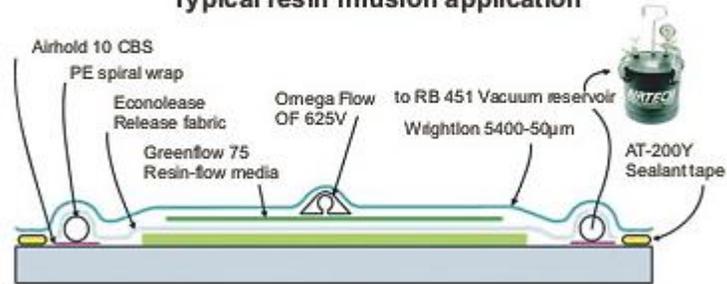


Ilustración 23. Componentes VARTM

Además de los anteriores materiales, se necesitaron diferentes tipos de mangueras y el el circuito de vacío perteneciente a la universidad EIA. El proceso previo a la infusión se describe a continuación:

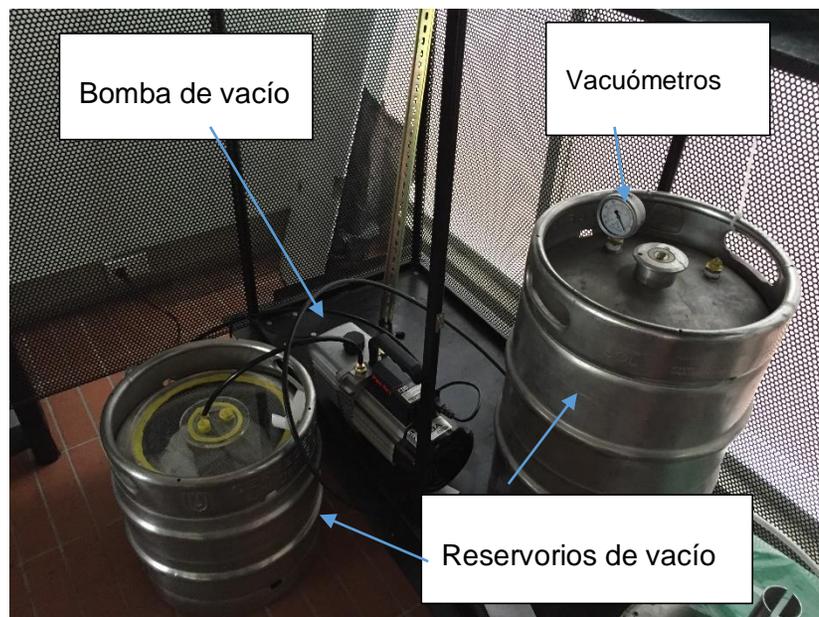


Ilustración 24. Circuito de vacío de Universidad EIA.

Se debe envolver el molde primero en la tela *bleeder lease* desmoldante. Antes de esto se tomaba la precaución de envolver el molde en papel bond tipo recibo para facilitar el desmoldeo del material. Luego se debían poner las capas de refuerzo, después de esto nuevamente se colocaba una capa de *bleeder lease* para asegurar que la pieza no quedara contaminada con ningún otro material. Luego se envuelve la pieza en la malla *Green flow* para asegurar que la resina impregne todos los rincones del refuerzo y que fluya con mayor facilidad. Después de esta se deben realizar las conexiones de entrada y salida de resina y vacío por medio de las mangueras y las cintas AT200Y. Luego se enciende la bomba que genera la presión de vacíos y se debe esperar hasta que la

bomba haya alcanzado la presión de vacío. Se debe apagar la bomba y confirmar que el circuito está bien mirando o chequeando que la presión que muestran los vacuómetros no disminuye conforme pasan los minutos. Si esto sucede se reconoce que ese es el momento para empezar a realizar la infusión y se debe empezar a preparar la resina con la cual se construirá la pieza, si no, se deben encontrar y tapar todas las posibles fugas de aire que se están presentando en el circuito para mantener la misma presión de vacío en todo el circuito.

Para familiarizarse con el proceso VARTM se intentaron construir piezas más pequeñas, comenzando desde realizar infusión a una pequeña lámina, para así crear una placa en material compuesto polimérico reforzado con fibras vegetales y sintéticas, esta se puede ver en la Ilustración 25.



Ilustración 25. Montaje de lámina para primer acercamiento con proceso VARTM.

Con esta experiencia se pudieron conocer algunos impedimentos o posibles dificultades que tenía el proceso.

Una de estas es la consecución de la presión de vacío en el molde, este se convierte en el factor determinante para realizar un proceso VARTM exitoso. Así, se deben evitar al máximo las fugas de aire en los diferentes elementos del circuito de vacío, tanto en tanques, mangueras, moldes, sellos con cintas (uniones) y puntos de entrada y salida de resina. Días después se intenta mantener la presión de vacíos, esta vez sobre un molde tubular tridimensional como el que se puede observar en la Ilustración 26.



Ilustración 26. Molde tubular.

En este molde tubular se empezaron a tener consideraciones acerca de las tapas laterales que se debían adjuntar al molde con el fin de evitar un posible rompimiento de la bolsa o econolon plástico por el roce entre el borde del molde y este plástico, debido a la succión que se genera en el interior del molde

Para controlar este efecto en los moldes grandes se decide entonces colocar un par de tapas de madera laterales. Luego se toma la decisión de tratar de realizar la infusión sobre uno de los moldes de madera como se puede visualizar en Ilustración 27.

Después de realizar todo el proceso previo de la manera más prudente posible, siguiendo todos los requerimientos del experimento y diseñando un experimento que contenía 3 entradas de resina para abarcar todo el territorio y perímetro del molde. Se realiza el ensayo para comprobar que se sostuviera la presión de vacío durante todo el experimento y se empieza a notar que la presión que la bomba genera sobre el molde es tan alta que al cabo de un tiempo este comienza a dar signos de colapso por lo que se decide no continuar con el ensayo y utilizar un molde hecho con acero.



Ilustración 27. Molde de madera, con tres entradas de resina.

El próximo ensayo que se realizó fue entonces la realización del proceso VARTM sobre un molde de acero con dimensiones más pequeñas de 5cm x 5cm x 100 cm (Ilustración 28) en esta oportunidad se realizan todos los procesos previos y se logra la presión de vacío para realizar la infusión con la bomba que tiene EIA, pero realizando la infusión la resina se empieza a solidificar y tapona todas las entradas de resina, además se visualiza que la resina no fluye debido a que la presión de vacío tapona todos los posibles caminos para que esta circule e impregne las capas de refuerzo.

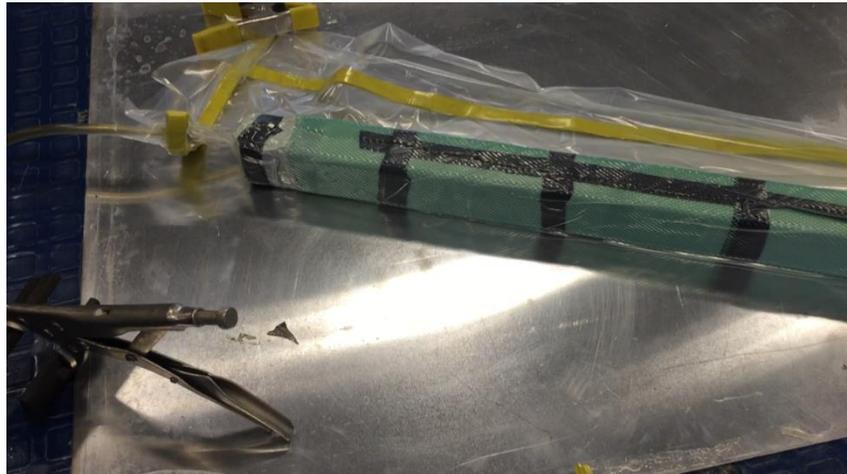


Ilustración 28. Molde de acero, justo antes de la infusión.

Después de obtener resultados negativos en todas las pruebas utilizando el proceso VARTM, y con el nuevo inconveniente de no conseguir más materiales, por cuestiones de

importación, para este último proceso, se decide construir la viga utilizando moldeo manual. El proceso previo es similar al anterior pero ya la impregnación de la resina se debía hacer manual, en la Ilustración 29 se observa el molde envuelto en papel bond para después poner las diferentes capas de refuerzo como se visualiza en Ilustración 30. Se construye una primera viga sobre un molde de acero con dimensiones iguales a 80mm x 130mm x 1000mm en esta viga se envolvieron las 10 capas primero y se impregnó la resina por ultimo con el montaje que se ve en Ilustración 31. Los resultados de esta viga no fueron satisfactorios puesto que la resina no alcanzó a impregnar las 10 capas de refuerzo.



Ilustración 29. Molde de acero envuelto en papel bond para facilitar desmoldeo.



Ilustración 30. Proceso previo a impregnación con resina. Molde envuelto en capas de refuerzo.



Ilustración 31. Molde listo para impregnación. Primera construcción por moldeo manual.

Se realizó entonces un segundo intento de construcción, pero esta vez se cambió el método constructivo. Se cortaron primero las 10 capas de refuerzo (6 capas de tejidos de fibra de lino Gazzeta y 4 capas de tejidos de fibra de vidrio Volan), se envolvió el molde de acero en varias capas de papel bond, similar a lo que se ve en Ilustración 29, luego se ponía una capa de *bleeder lease* y se sellaba este por medio de cinta aislante. Luego se ponía la primer capa del tejido de lino, previamente cortada con las dimensiones necesarias para cubrir todo el perímetro del molde, después de fijar esta capa se empezó a preparar la resina de poliéster, catalizando al 1.5% del peso, el catalizador utilizado es Peroxido de Metil Etil Cetona (MEKP) por recomendación del director de este trabajo de grado, y justo después de envolver una capa de refuerzo sobre el molde de acero, se impregnaba con directamente con brochas y rodillos, teniendo especial cuidado para que los tejidos no quedaran con ondulaciones. Así las 6 capas interiores de la viga correspondían a tejidos de fibras de lino y las 4 restantes a tejidos de fibra de vidrio. Se dejó curar este espécimen un día. Con este proceso se obtuvo finalmente la viga construida en materiales poliméricos reforzados con fibras (de vidrio y de lino).



Ilustración 32. Primera viga construida mediante moldeo manual.

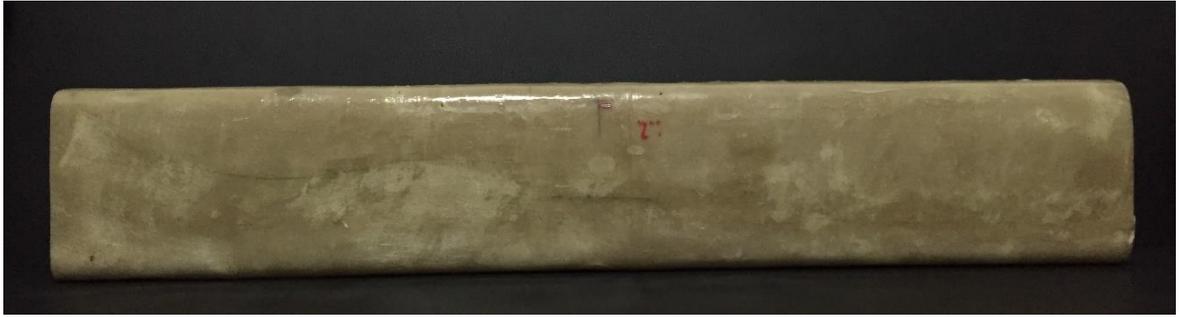


Ilustración 33. Segunda viga construida mediante molde manual.

3.12. PORCENTAJE DE REFUERZO

Se determinó el porcentaje de refuerzo en la viga, con base a la densidad superficial de los tejidos de refuerzo que se encuentra en la sección 3.8.5. al perímetro (P) de la sección transversal de la viga, a la longitud (L) y al masa final (W) de la viga. Así el porcentaje de refuerzo (ρ) de la viga es:

$$\rho = \frac{\text{Masa de los tejidos de fibras}}{W} * 100$$

$$\rho = \frac{\text{Masa de los tejidos de fibra de vidrio} + \text{Masa de los tejidos de fibras de lino}}{W} * 100$$

$$\rho = \frac{P * 6 * 72 * L + P * 4 * 236 * L}{W} * 100$$

Donde:

$$P = 0.08m * 2 + 0.13m * 2 = 0.42m$$

$$L = 0.756m$$

$$W = 1750 g$$

$$\rho = 24.96\%$$

Nota: se multiplicó por 6 y por 4, ya que estos son el número de capas de cada tejido en la viga.

3.13. ENSAYO A FLEXIÓN Y MODELACIÓN DE ESTE

Ya con la viga construida el próximo paso a realizar era el ensayo a flexión con el fin de poder tener una referencia en el comportamiento de este tipo de elementos bajo esfuerzos flexión.

El primer ítem a definir en el ensayo era la luz libre de la viga, para esto el autor del presente trabajo se basó en la norma INV 415-07 y ASTM C293 (INVIAS, 2007) y (ASTM, 2015) las cuales son las normas para ensayo a flexión en vigas de concreto cargadas sobre el punto medio de la luz. En estas normas se especifica que la luz libre debe ser al menos tres veces el peralte o altura de la viga. Luego se encuentra en la norma ASTM D198 (ASTM, 2015), la cual es la norma para probar maderas en tamaños estructurales. En esta norma se especifica que la relación entre la luz y la altura del peralte debe estar en un rango de 5-12. Por consiguiente se define una luz libre de 64 cm para el ensayo a flexión.

Se instrumenta la viga con galgas extensiométricas para propósito general (ver Ilustración 34), esto se realizó porque en ensayos previos se ha podido constatar que las mediciones de deformación son las mismas que con galgas para compuestos y porque estas se encuentran disponibles en los laboratorios de la Universidad EIA, con el fin de medir deformaciones y con ayuda de un equipo de profesionales se toman los datos de estas deformaciones, así como el dato de la fuerza máxima aplicada y la deflexión máxima.



Ilustración 34. Galgas extensiométricas usadas.



Ilustración 35. Montaje



Ilustración 36. Montaje, detalle aplicación de la carga.

La localización de la instrumentación de las galgas se da con base a los resultados de las simulaciones previas, los cuales demostraron que estos puntos eran los de mayores esfuerzos y por recomendación de (Daniel & Abot, 2000) , es por esto que ahí es donde se decide ubicar las galgas como se puede apreciar en Ilustración 37.

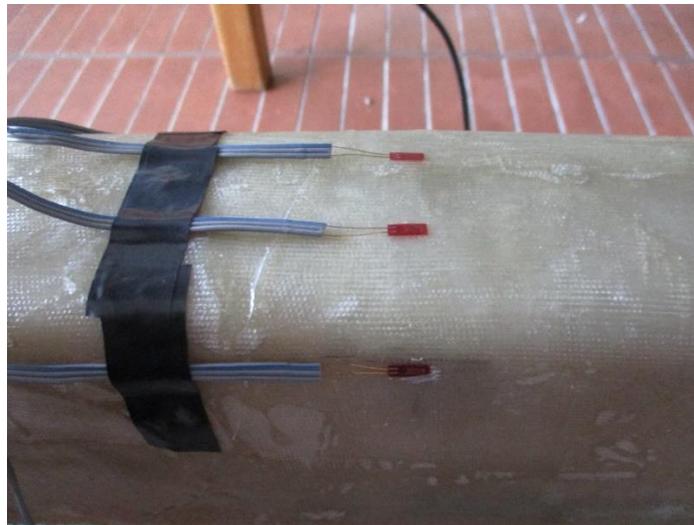


Ilustración 37. Detalle instrumentación en el fondo de la viga.

El siguiente paso era entonces llevar el ensayo al software para la modelación por elementos finitos. Allí se definió la geometría de la viga construida (ver Ilustración 38), que se puede encontrar en secciones anteriores (3.11.1), se le asignaron las propiedades de los materiales que la constituían (6 tejidos de fibras de lino, y 4 capas de tejidos de fibras de vidrio), orientados en la dirección de la viga (0°) y se chequearon los desplazamientos (deflexiones), deformaciones y esfuerzos para el caso de carga del ensayo. Se aclara que las condiciones de borde impuestas sobre el modelo son parecidas a las condiciones de

borde que se han denominado en este documento “condiciones de borde simplemente apoyadas”

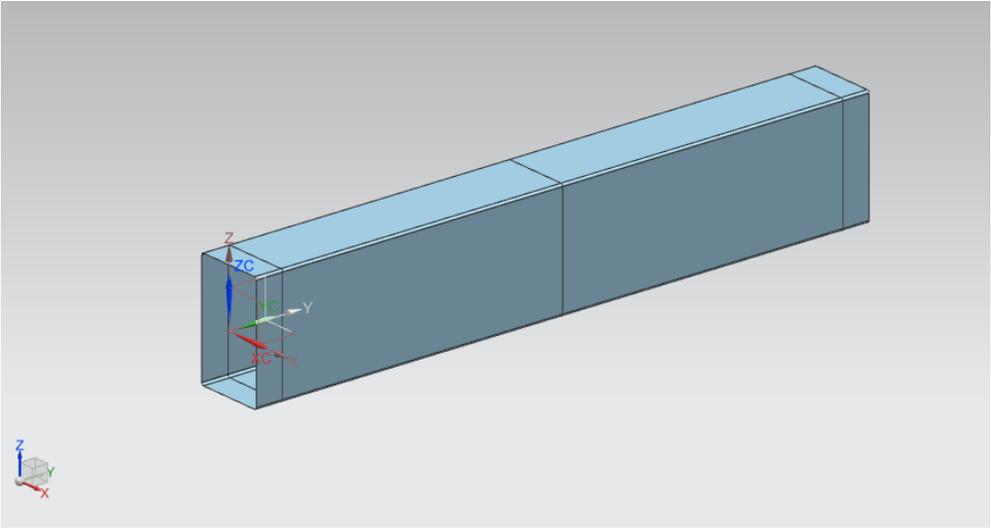


Ilustración 38. Viga ensayada a flexión en modelo computacional.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Todo el procedimiento del capítulo anterior se realizó con el fin de tener las herramientas necesarias para entrar al software de simulación por elementos finitos y simular las cargas estáticas sobre la viga – correa, además de chequear desplazamientos, deformaciones y tensiones según ensayo a flexión. Los resultados se muestran a continuación.

4.1. SIMULACIONES ESTRUCTURALES – CORREA DE CUBIERTA

En la, Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas sobre una correa de cubierta con 8 metros de luz, sometida a las cargas calculadas y con las condiciones de borde especificadas en cada literal. En cada una de estas simulaciones, se buscó encontrar cuantas capas de tejidos de fibra de vidrio se podían sustituir por capas de tejidos de fibra de lino. En estas tablas se encontrarán los siguientes datos:

- **Composición Material:** en esta columna se tiene en cuenta cuantas capas de tejidos de fibra de vidrio y cuantas capas de fibra de lino tiene el material simulado. La notación es XV-YL, donde X es el número de capas de tejidos de fibra de vidrio y Y es el número de capas de tejidos de fibra de lino, que contiene el material.
- **Índice de falla máximo de la capa:** en esta columna se tiene en cuenta el cálculo del índice de falla según la teoría de Hoffman, la cual se encuentra en la sección 3.8.7 de este documento, aquí se muestra si el material falla (índice mayor a 1) bajo las diferentes cargas amplificadas (cargas ultimas) que se calcularon en la sección 3.7.4 . Cabe recordar que si este índice es menor que uno el material falla.
- **Índice de falla máximo de la unión:** en esta columna se presenta la relación entre el esfuerzo cortante máximo y la tensión de corte interlaminar, la cual se puede observar en la Tabla 7 con el nombre de Ss13 y Ss23. Indica un estado de esfuerzos en el cual, la unión entre la matriz y la fibra falla si este índice es mayor a uno.
- **Deflexión Lr+D:** en esta columna se encuentra la deflexión presentada por la correa en el centro de la luz, bajo la combinación de cargas de servicio (sin amplificar), es decir, carga viva de cubierta (Lr) más carga muerta (D). Se debe recordar que esta deflexión no debe ser mayor a 66.66mm (American Society of Civil Engineers, 2013).
- **Deflexión Lr:** en esta columna se encuentra la deflexión presentada por la correa en el centro de la luz, cuando esta está sometida solamente a carga viva de cubierta (Lr) en el estado de servicio (sin amplificar). Se debe recordar que esta deflexión no debe ser mayor a 44.44mm (American Society of Civil Engineers, 2013).

4.1.1. Simulación de correa de cubierta con condiciones de borde simplemente apoyada.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de las simulaciones para la correa de cubierta de 8 metros de largo, con condiciones de borde simplemente apoyada y sin tener en cuenta el factor de seguridad. Bajo estas consideraciones no se podrían sustituir capas de tejidos de fibra de vidrio por tejidos de fibra de lino, ya que ninguna composición del materia cumple la condición de deflexión máxima para carga viva de cubierta (L_r) más carga muerta (D), es decir la deflexión que se presenta con una composición de material 10V (83.71 mm) es mayor a la permitida (66.66 mm). Es importante anotar que el material no falla (índices menores a uno) pero la correa no cumple deflexiones.

Tabla 9. Resultados simulaciones con condiciones de borde de viga simplemente apoyada sin factor de seguridad.

RESULTADOS - CONDICIONES SIMPLEMENTE APOYADA			
Composición Material	Índice de falla máximo de la capa	Índice falla máximo de la unión	Deflexión L_r+D (mm)
10V	0.647	0.033	83.71
9V-1L	0.758	0.037	91.59
8V-2L	0.947	0.039	101.6
7V-3L	1.136	0.04	112.98

4.1.2. Simulación de correa de cubierta con Condiciones de borde sobre arandela sin factor de seguridad.

En la Tabla 10 se muestran los resultados de las simulaciones para la correa de cubierta de 8 metros de largo, con Condiciones de borde sobre arandela (simulando efecto de los pernos pasantes y las arandelas) y sin tener en cuenta el factor de seguridad. Con estas especificaciones se pueden sustituir 6 capas de tejidos de fibras de vidrio por 6 capas de tejidos de fibra de lino, es decir con una composición del material 4V-6L, el índice de falla máximo es igual a 0.609 y las deflexiones para las dos condiciones de servicio (carga viva de cubierta más carga muerta, viva de cubierta) son menores a los límites permitidos por (American Society of Civil Engineers, 2013).

Tabla 10. Resultados con condiciones idealizadas sin factor de seguridad.

RESULTADOS - CONDICIONES SOBRE ARANDELA				
Composición Material	Índice de falla máximo de la capa	Índice falla máximo de la unión	Deflexión L_r+D (mm)	Deflexión L_r (mm)
10V	0.219	0.028	30.3	22.41
9V-1L	0.249	0.031	33.02	24.38
8V-2L	0.356	0.027	36.44	26.91
7V-3L	0.329	0.036	40.11	29.62
6V-4L	0.371	0.031	44.87	33.13
5V-5L	0.456	0.033	51.92	38.34

4V-6L	0.609	0.036	60.13	44.4
3V-7L	-	-	71.51	-

4.1.3. Simulación de correa de cubierta con Condiciones de borde sobre arandela con factor de seguridad.

En la Tabla 11 se evidencian los resultados de las simulaciones de la correa de 8 metros de largo, con Condiciones de borde sobre arandela y teniendo en cuenta el factor de seguridad. Con estas direcciones se pueden sustituir 2 capas de tejidos de fibra de vidrio por dos capas de tejidos de fibras de lino, es decir con una composición del material 8V-2L, los índices de falla son menores a uno, las deflexiones bajo las cargas de servicio son menores a las permitidas. En la Ilustración 39 se muestra la deflexión de la correa, con composición 8V-2L, cuando está sometida a carga viva de cubierta (Lr).

Tabla 11. Resultados con condiciones idealizadas con factor de seguridad.

RESULTADOS - CONDICIONES SOBRE ARANDELA CON FS				
Composición Material	Índice de falla máximo de la capa	Índice falla máximo de la unión	Deflexión Lr+D (mm)	Deflexión Lr (mm)
4V-6L	1.2	0.047	-	-
5V-5L	1.111	0.041	-	-
6V-4L	1.05	0.04	-	-
7V-3L	0.885	0.039	73.6	60.8
8V-2L	0.746	0.039	36.03	26.91

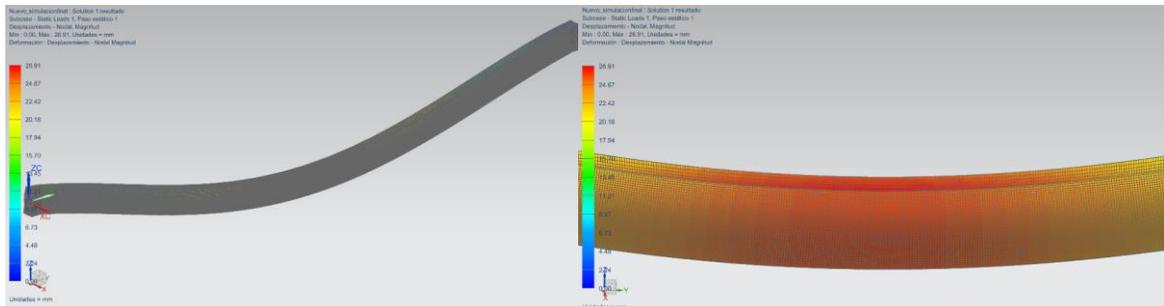


Ilustración 39. Deformación (deflexión) de la correa. Composición: 8V-2L. Con factor de seguridad. Deflexión bajo carga viva de cubierta (Lr).

4.2. ENSAYO A FLEXIÓN

La viga fue instrumentada con galgas extensiométricas en la dirección X, que se muestra en la Ilustración 41, la máxima fuerza que se pudo obtener en el marco de carga es igual a 521kgf con una deflexión medida en campo igual a 20mm. Las deformaciones en las galgas extensiométricas arrojaron los resultados que se pueden ver en la Ilustración 42. Cabe aclarar que las galgas L1 y L2 están ubicadas un centímetro por encima del fondo

de la viga. Y las galgas B1 y B2 están ubicadas en el fondo de la misma como se puede observar en la siguiente Ilustración 43.

4.2.1. Comprobación de las reacciones en el modelo.

Para los modelos de este trabajo de grado, se comprobó que las reacciones en los apoyos de la viga fueran iguales a las cargas externas aplicadas en la Ilustración 40 se puede ver la comprobación de esto para la viga del ensayo a flexión. En la columna T3, la cual corresponde a la traslación en el eje local 3 (eje global Z) se puede observar el valor de -5.21×10^6 milinewton, equivalente a 5210 N o 521 kgf.

SUBCASE/ DAREA ID	LOAD TYPE	T1	T2	T3	R1	R2	R3
1	FX	0.000000E+00	----	----	----	0.000000E+00	0.000000E+00
	FY	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00	----	0.000000E+00
	FZ	----	----	-5.210000E+06	-1.823500E+09	0.000000E+00	----
	MX	----	----	----	0.000000E+00	----	----
	MY	----	----	----	----	0.000000E+00	----
	MZ	----	----	----	----	----	0.000000E+00
TOTALS		0.000000E+00	0.000000E+00	-5.210000E+06	-1.823500E+09	0.000000E+00	0.000000E+00

Ilustración 40. Total de reacciones para modelo de ensayo.

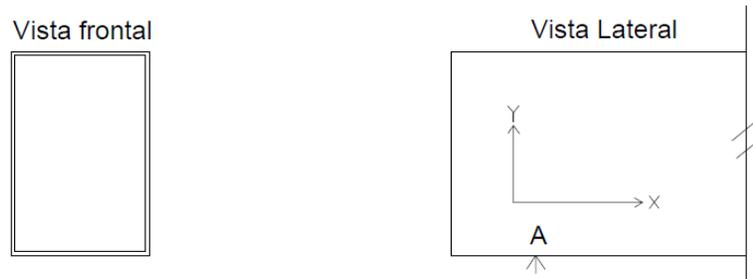


Ilustración 41. Componentes de las deformaciones.

En la Ilustración 42 se observa que las deformaciones máximas en cada galga son: en L1, 0.001774 mm/mm; en L2, 0.001327 mm/mm; en B1, 0.001206 mm/mm y en B2, 0.001242 mm/mm (Ver Tabla 12). La curva no es una curva suave debido a que la forma de aplicar la carga era mediante un gato hidráulico accionado por fuerza humana entonces cada cresta de la curva es debido a la fuerza aplicada en el gato. Las curvas caen justo después de aplicar la carga debido a que el pistón del cilindro hidráulico permitía el retorno y no conservaba la presión hidráulica. Se puede observar que las galgas B1 y B2, las cuales estaban ubicadas en la base de la viga (ver Ilustración 43), presentan comportamientos muy similares lo que es normal pues se encuentran ubicadas sobre el mismo nivel y sobre una superficie recta. Mientras que las galgas L1 y L2, que estaban ubicadas simétricamente en los laterales de la viga, presentan comportamientos similares pero los valores no son tan parecidos, esto puede tener origen en que las paredes laterales de la viga no era perfectamente paralelas entre sí por defecto en la fabricación con moldeo manual, también puede deberse a defectos como inclusión de aire, deslaminación asimétrica de capas, errores por asimetría en la aplicación de la carga o a la manifestación de una inclinación de las paredes laterales de la viga debido a que es

posible el desplazamiento relativo entre la parte superior e inferior. Se observa que las galgas L2, B1 y B2 podían tener deformaciones antes de realizar el ensayo, esto se debe a que estas son muy sensibles y en la manipulación durante la instrumentación se pudieron cometer algunos errores.

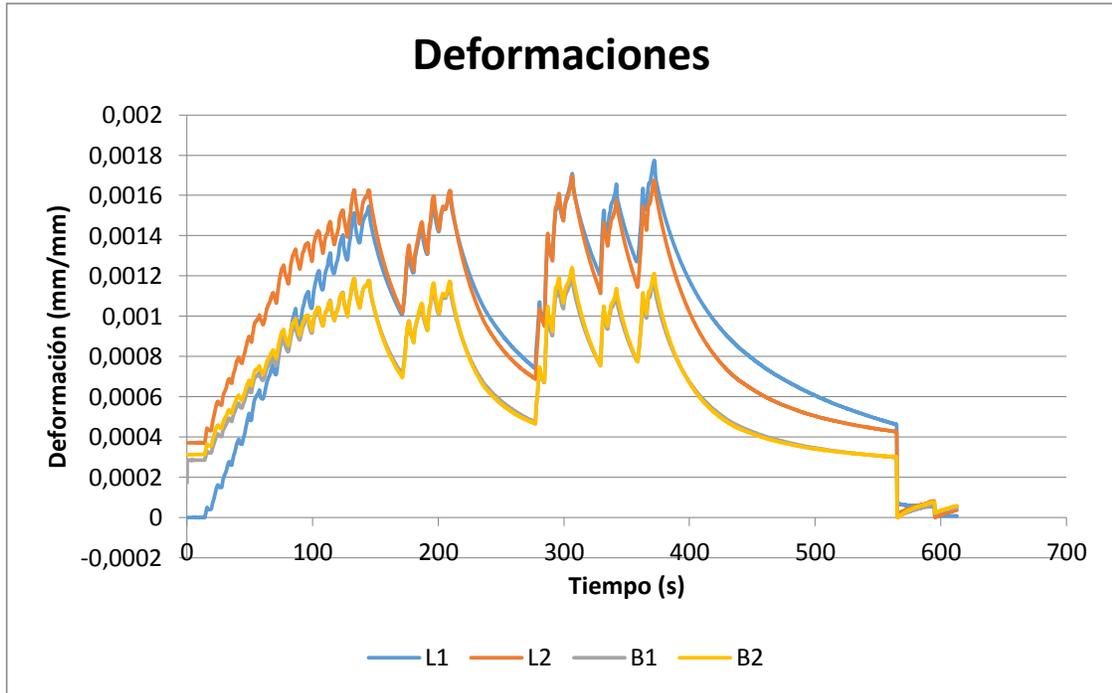


Ilustración 42. Deformaciones medidas por galgas extensiométricas.



Ilustración 43. Ubicación y nomenclatura de galgas.

Los datos de las deformaciones tomadas por las galgas y resultantes de la simulación del ensayo se muestran en la Tabla 12. Allí se calcularon los diferentes porcentajes de error, con resultado máximo de 78%. Mediante la siguiente ecuación

$$\%Error = \frac{\text{Resultado Simulación} - \text{Resultado ensayo}}{\text{Resultado simulación}} * 100$$

Donde *Resultado Simulación* indica el resultado arrojado por el software para cada variable (deflexión, deformación o esfuerzo) y *Resultado ensayo* indica el resultado arrojado por el ensayo a flexión realizado para cada variable (deflexión, deformación o esfuerzo).

La Ilustración 44 muestra cómo se distribuyen estas deformaciones a lo largo de la viga. En esta misma tabla se puede observar los esfuerzos, calculados a partir de las deformaciones del ensayo, mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_{11} = E_{11}e_{11}$$

Donde E_{11} es igual al módulo de elasticidad bajo esfuerzos de tracción en la dirección 1 (Et1) para el tejido de fibras de vidrio, el cual se puede encontrar en la Tabla 7 y es igual a 18280 MPa y e_{11} es la deformación tomada por la galga extensiométrica correspondiente. Igualmente en la Tabla 12 se observaron los esfuerzos resultados de la simulación. Con estos datos se calculó el porcentaje de error con un porcentaje de error máximo igual a 38%. La Ilustración 45 muestra la distribución de esfuerzos a lo largo de la viga.

Tabla 12. Deflexión, deformaciones y esfuerzos en la dirección X. Cálculo de porcentaje de error.

Deflexión			
	Simulación (mm)	Ensayo (mm)	% Error
	10	17	78
Deformaciones			
Galga	Simulación (mm/mm)	Ensayo (mm/mm)	% Error
L1	0.001964	0.001774	10
L2	0.001964	0.001327	32
B1	0.001832	0.001206	34
B2	0.001832	0.001242	32
Esfuerzos			
Galga	Simulación (MPa)	Ensayo (MPa)	% Error
L1	36.077	32.42872	10
L2	36.077	24.25756	33
B1	35.720	22.04568	38
B2	35.720	22.70376	36

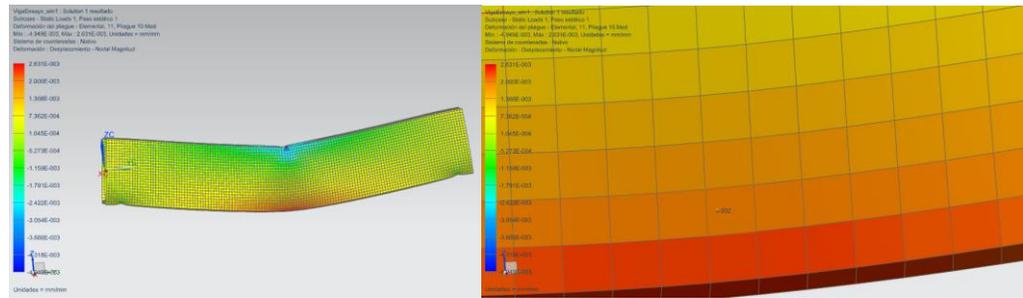


Ilustración 44. Deformaciones de la viga simulada en el ensayo.

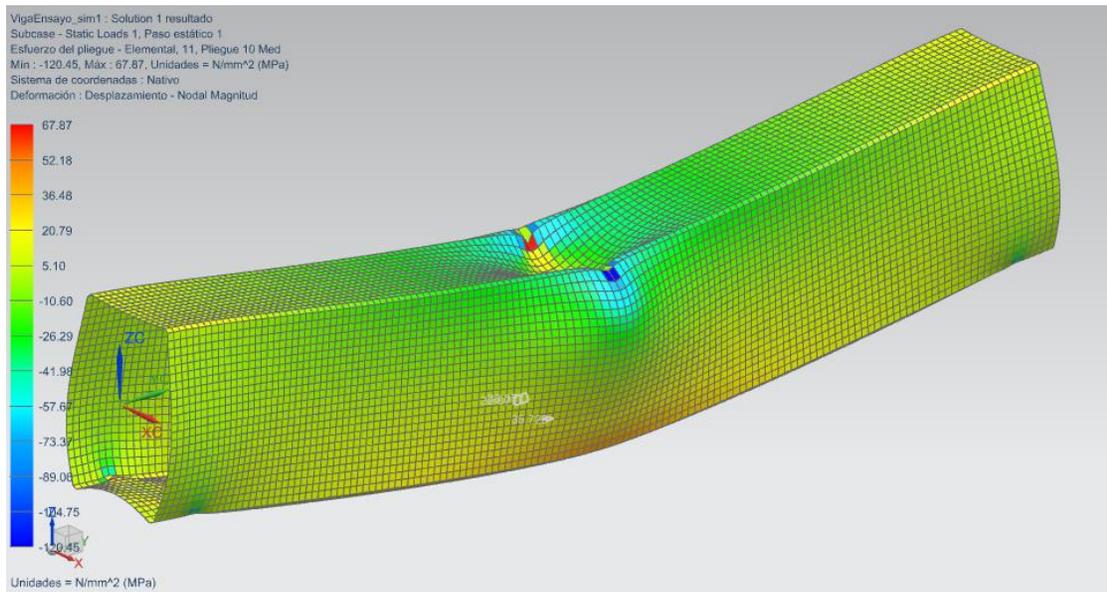


Ilustración 45. Esfuerzos de la viga simulada en el ensayo.

Los porcentajes de error en cada una de las variables (deformación y esfuerzos) varían desde 10% hasta 38%, para la variable deflexión se encuentra un error del 78%. Esto se debe a la incertidumbre que se tiene con la construcción y fabricación de la viga, pues con la técnica de moldeo manual no se puede asegurar que no queden espacios con aire entre la matriz y el refuerzo, las imperfecciones físicas en esta son notorias, también se debe a que la resina usada para fabricar la viga (Resiglas T) y la resina con la que se hicieron las caracterizaciones mecánicas (Resina Altec H834R) son diferentes. Otro factor que conduce al error es la forma en la que se aplican las cargas y condiciones de frontera en el modelo pues se aplicó la carga, distribuida en dos nodos, algo que es cercano a la realidad pero aun así no se alcanza a simular completamente el contacto entre el cilindro que aplica la carga y la viga.

Se debe aclarar que los índices de falla de la viga ante esta sollicitación son menores a uno (0.003) en la parte inferior central de esta, es decir la viga no falla bajo el criterio de Hoffman. Para lograr un índice de falla superior a uno con las mismas condiciones de borde se necesita una carga aproximada a las 10000 N, así la deformación unitaria en la

superficie inferior de la viga es igual a 0.004 mm/mm, la cual es mayor a la del concreto a compresión (0.003) y a la del acero en fluencia (0.0021).

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Con la realización de este trabajo de grado, y considerando lo expuesto en párrafos anteriores se puede concluir que:

- Bajo la mirada de los análisis lineales es factible utilizar fibras vegetales como refuerzo de materiales poliméricos según los resultados presentados en la Tabla 11. De igual manera por las consideraciones que se presentaron en el marco teórico de este documento, sección 3.8.8, y según el análisis de deflexiones presentado en el capítulo Discusión de resultados (ver capítulo 4), los desplazamientos obtenidos son mayores al espesor del elemento, por esta razón un análisis lineal como el que se hizo en este trabajo no es suficiente para tomar decisiones acertadas acerca del comportamiento estructural de la viga o correa. Por otro lado aunque la comparación entre el ensayo a flexión real y el simulado haya aportado porcentajes de error considerables se ha explicado cuales pueden ser las posibles causas de error como las imperfecciones desde la fabricación por moldeo manual, el uso de una resina diferente a la caracterizada, no linealidades geométricas, del material y de la carga y aplicación de condiciones de frontera idealizadas. Por esto se recomienda realizar análisis que tengan en cuenta no linealidades geométricas, no linealidades del material y no linealidades de las carga, para así reducir la incertidumbre que se tiene en la simulación.
- Existen muchas variables que juegan a la hora de simular un material compuesto reforzado con fibras por el Método de Elementos Finitos, tales como la orientación de las capas de refuerzo, la secuencia de superposición de capas de refuerzo, el espesor de las capas de refuerzo, la geometría, las fracciones de refuerzo de fibras en el compuesto (másicas o volumétricas), la orientación del material de la capa, el modelo de material empleado y la formulación del elemento específico usado para las simulaciones. Se recomienda para trabajos de grado posteriores, realizar análisis de sensibilidad de los modelos frente a estas variables.
- La correcta definición de las condiciones de borde, y la correcta definición de las cargas son acciones importantes dentro de la simulación por el Método de Elementos Finitos, pues como se observó los resultados de los diferentes análisis realizados en este documento cambiaron dependiendo de si las condiciones de borde del modelo eran simplemente apoyadas o si eran condiciones de borde sobre arandela. Es importante revisar detalles como la convergencia de la malla, comprobar las reacciones en el modelo y la orientación de los vectores normales de los elementos, pues estos inciden en los resultados de la integración que genera la matriz de rigidez.
- La construcción por moldeo manual de estos elementos es un proceso que todavía se puede mejorar mucho puesto que toma tiempo realizarla y genera imperfecciones en este. Se debe buscar la manera de reducir las imperfecciones que presentan elementos construidos mediante la técnica de moldeo manual para así volver estos materiales, unos materiales eficientes a la hora de competir en el

campo del desempeño estructural y en el campo económico con otros materiales utilizados en el campo de ingeniería civil. El proceso VARTM puede ser la solución para construir piezas con menores grados de imperfecciones debido a que con el proceso de moldeo manual la pieza está expuesta en gran cuantía a los errores que humanos que se puedan cometer durante la preparación de las capas, la preparación de la superficie o la impregnación de resina.

- Los elementos tipo cáscara presentan algunas ventajas frente a otros tipo de elementos, debido a que es conveniente usarlos para modelar estructuras laminares, delgadas o gruesas. Brindan resultados muy confiables y pueden modelar modelos de materiales ortótropos teniendo especial cuidado en definir adecuadamente la dirección de los ejes locales del material pues este se comporta diferente frente a las diferentes acciones mecánicas en las diferentes direcciones ortogonales. Además presentan un costo computacionales menor

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo, E. (24 de Agosto de 2015). (A. E. Valencia, Entrevistador)
- American Society of Civil Engineers. (2013). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Portland: American Society of Civil Engineers.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá: GRAMA.
- ASTM. (2015). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM. (2015). *Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*. West Conshohocken: ASTM.
- Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall.
- Bonet, G., Bottero, C., & Fontana, M. (s.f.). *Estructuras materiales compuestos: procesos de fabricación*. Recuperado el 08 de Junio de 2015, de <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Clase%20%20-%20Procesos%20de%20fabricacion.pdf>
- Botero Jaramillo, E., Méndez Urquidez, B., Romo Organista, M., & González Blandon, C. (2013). Desarrollo de un material compuesto ultraligero para construir la plataforma de una mesa vibratoria. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 595-611.
- Buezo, M. C. (2003). *NTP 641: Fibras minerales artificiales y otras fibras diferentes del amianto*. España: Instituto nacional de seguridad e higiene.
- Burgueño, R., Quagliata, M. J., Mohanty, A. K., Mehta, G., Drzal, L. T., & Misra, M. (2004). Load-bearing natural fiber composite cellular beams and panels. *Composites: Part A*, 645-656.
- Cadena, C., & Bula Silvera, A. (2002). Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. *Ingeniería & Desarrollo*, 8-9.
- Camanho, P. P. (2002). *Failure Criteria for Fiber-Reinforced Polymer Composites*. Porto: Universidade do Porto.
- Cámara de Comercio de Medellín. (2011). *Empresas sólidas, base de crecimiento sostenible*. Medellín.
- Carnicero, A. (2003). *Introducción al método de los elementos finitos*. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.

- Castro Herazo, C., & Palencia Penagos, A. (2006). *Evaluación de la influencia de diferentes condiciones de tratamientos superficiales sobre el comportamiento de fibras de fique*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Chand, N., & Fahim, M. (s.f.). *Tribology of natural fiber polymer composites*. Cambridge: WOODHEAD PUBLISHING LIMITED.
- Codispoti, R., Oliveira, D., Olivito, R. S., Lourenco, P. B., & Fanguero, R. (2015). Mechanical properties of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. *Composites Part B*, 74-83.
- Daniel, I. M., & Abot, J. L. (2000). Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams. *Composites Science and Technology*, 2455-2463.
- Faruk, O., & Sain, M. (2013). Biofiber reinforced polymer composites for structural applications. *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering*, 18-53.
- George Michael, M., & Bressler, P. (2014). *Surface and thermal characterization of natural fibres treated with enzymes*. Industrial Crops and Products.
- González, A. M. (2002). *Morfología de Platas Vasculares*. Recuperado el 20 de Marzo de 2015, de Uso de las Fibras e Importancia Económica: www.biologia.edu.ar/botanica/tema12/12-5uso.htm
- Iberisa. (16 de Junio de 2016). *Unión mediante soldaduras Punto-aPunto*. Obtenido de Iberisa: www.iberisa.com/soporte/femap/soldadura_punto_a_punto.htm
- INVIAS. (2007). *RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO, MÉTODO DE LA VIGA SIMPLE CARGADA EN EL PUNTO CENTRAL*. Bogotá: Invías.
- Juan, X. R. (1993). *Estudio de la eficiencia de sistemas químicos de iniciación del curado de resinas de poliéster insaturado*. Barcelona: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- Kussmaul, R. (2014). *Simulation of fiber reinforced composites*. Zurich: Eidgenössische Technische Hochschule.
- Labein Tecnalía. (2008). *Edificación Industrial, la guía para arquitectos, diseñadores y constructores*. Amsterdam: Euro-Build.
- Liu, Y., Zwingmann, B., & Schlaich, M. (2009). *Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures—A Review*. Berlin: Institute of Civil Engineering, Technische Universität Berlin.
- Lotus Cars. (s.f.). *Lotus Eco Elise*. Recuperado el 08 de Junio de 2015, de <http://www.lotuscars.com/engineering/eco-elise>

- Mallick, P. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*. Boca Raton: CRC Press.
- Mercado Navarro, F. (09 de Marzo de 2015). Método de elementos finitos. (D. Chavarría Gutiérrez, Entrevistador)
- Mercado Navarro, F. (2016). *Frecuencias naturales del elemento de cáscara MITC4 en materiales compuestos*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Ministerio de Hacienda. (2011). *Portal de Transparencia Económica*. Recuperado el 08 de 02 de 2015, de Ejecución Presupuestal: www.pte.gov.co
- Mitre, A. J. (2004). *Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil "Tubolare SAND CAR" de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos*. Santa Catarina Mártir: Universidad de las Américas Puebla.
- Pickering, K. (2008). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Boca Raton: Woodhead Publishing Limited.
- Restrepo Mejía, L. (24 de Agosto de 2015). (D. A. Gutiérrez, Entrevistador)
- Restrepo, L. H. (5 de Marzo de 2015). Ejemplo de cargas de Viento. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Roca Ramón, X., & Casals Casanova, M. (2005). *Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos avanzados en la construcción de edificios industriales*. Barcelona: Escola Técnica Superior d' Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
- Shah, D. U., Schubel, P. J., & Clifford, M. (2012). Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study. *ELSEVIER*.
- Song, X. (2003). *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification*. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Suárez Castañeda, J. L., Restrepo Montoya, J. W., & Mercado Navarro, F. A. (2014). *ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LOS PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS POR FIBRAS VEGETALES AUTÓCTONAS USADAS COMO REFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS EMPLEADOS EN LA ELABORACIÓN DE ASPAS DE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL*. Envigado: Grupo de Investigación MAPA EIA.
- Suárez Castañeda, J., Restrepo Montoya, J., & Mercado Navarro, F. (2015). *Caracterización mecánica de compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales*. Envigado: Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Ticoalu, A., Aravinthan, T., & Cardona, F. (2010). *A review of current development in natural fiber composites for structural and infrastructure applications*. Toowoomba: Centre of Excellence in Engineered Fiber Composites.