



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA**

**CAMPO DE CONOCIMIENTO TECNOLOGÍAS**

**MATERIAL COMPUESTO PARA ARQUITECTURA A BASE DE UNA MATRIZ DE CARTÓN Y UN  
REFUERZO DE TEJIDO DE FIBRAS DE CARBONO 12K TWILL:**

**ESTRUCTURAS LIGERAS DE GRAN CLARO**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE**

**MAESTRO EN ARQUITECTURA**

**PRESENTA**

**ARQ. ARTURO EMMANUEL DÍAZ GARCÍA**

**TUTOR**

**M. EN ING. PERLA R. SANTA ANA LOZADA**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR**

**DR. EN ARQ. ALBERTO MUCIÑO VÉLEZ**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM**

**DRA. EN ARQ. GEMMA LUZ SYLVIA VERDUZCO CHIRINO**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM**

**DR. MIKHAIL ZOLOTUKHIN**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES, UNAM**

**MTRO. EN ARQ. JORGE RANGEL DÁVALOS**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.**

**OCTUBRE 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**UNAM**  
**POSGRADO**

The logo of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), featuring a central shield with a map of Mexico, flanked by two eagles, and topped with a banner that reads "UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO".

INSTITUTO  
DE INVESTIGACIONES  
HISTÓRICAS



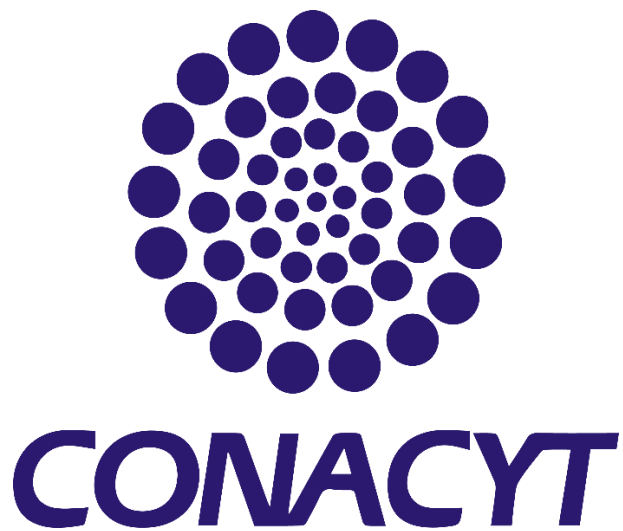






*Mi gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, por haberme brindado mi formación académica y la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría*





*Mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado el apoyo económico que me permitió desarrollar la presente investigación*



*De manera especial agradezco a mi directora de tesis, la Mtra. en Ing. Perla Santa Ana Lozada, por su enseñanza, apoyo, dirección y paciencia, para el desarrollo del proyecto de investigación y mis estudios de Maestría*

*Mi gratitud al Mtro. en Arq. Juan Manuel García Garduño por su invaluable apoyo, motivación y consejo durante mis estudios de Maestría*



*Agradezco al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales, al Dr. Alberto Muciño Vélez, a la Dra. Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino y a mis compañeros de laboratorio, por haberme facilitado el uso de sus espacios y equipos de trabajo*

*Mi gratitud al Dr. Mikhail Zolotukhin por su enseñanza, apoyo y consejo en el desarrollo del proyecto de investigación*



*Agradezco al Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural y a la Dra. Ilse García Villalobos, por haberme facilitado el uso de sus espacios y equipos de trabajo*

*Gracias al Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos, al Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz y al Mtro. en Arq. Arturo Valeriano Flores por su apoyo*



*Mi agradecimiento a la Universidad Politécnica de Cataluña, al Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales y al Dr. Lluís Gil Espert, por haberme recibido y facilitado el uso de sus espacios y equipos de trabajo*





## **DEDICATORIAS**

*A Dios, por estar siempre a mi lado*

*A mis padres, **Olivia** y **Arturo** por todo su amor, apoyo y buen ejemplo*

*A **Teresa Paulina**, la mejor hermana, gracias por todo tu apoyo*

*A mi cuñado **César**, por ser como un hermano para mí*

*A **Estefanía**, por todo su cariño, apoyo y compañía*

*A **Oscar Santillán**, mi amigo y compañero*

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por mi formación académica*

*A la profesora y directora de esta tesis, la **Mtra. en Ing. Perla Santa Ana Lozada**, mi gratitud siempre*

*Al **Mtro. en Arq. Juan Manuel García Garduño**, mi gratitud siempre*

*A mi familia, amigos y colegas*

*A mis **profesores** del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, mi reconocimiento*



*“Me gustaría que mi arquitectura inspirase a la gente a usar sus propios recursos, a moverse en el futuro”*

*Tadao Ando*



## Índice

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
Materiales compuestos en la Construcción.....	2
Fundamentación de la investigación.....	4
Planteamiento de la investigación.....	5
Hipótesis .....	7
Objetivos.....	7
<b>Capítulo I: Materiales en Arquitectura .....</b>	<b>9</b>
1.1. Concepto de estructura de un material.....	11
1.2. Propiedades de los materiales .....	12
1.3. Propiedades físicas y mecánicas de los materiales .....	13
1.4. El proceso y rendimiento en la producción de materiales .....	17
1.5. Clasificación general de los materiales.....	18
Materiales metálicos y aleaciones metálicas.....	18
Materiales cerámicos.....	19
Materiales poliméricos.....	20
Materiales compuestos en Arquitectura.....	23
Materiales fibrosos.....	24
<b>Capítulo II: El cartón .....</b>	<b>28</b>
2.1. Origen del cartón.....	29
2.2. Definición – composición.....	30
2.3. La estructura de la madera – tipos de fibras.....	32
2.4. El proceso de manufactura del cartón.....	36

Obtención de materia prima.....	37
Elaboración de la pasta – proceso de pulpado. ....	39
Proceso de Blanqueo.....	42
La transformación de la pulpa de celulosa en cartón.....	44
Recubrimientos agregados al cartón (laminados).....	48
2.5. Tipos de cartón.....	49
Cartón plegable (Folding Boxboard - FBB). ....	50
Cartón sólido blanqueado (Solid Bleached Sulphate - SBS).....	50
Cartón sólido no blanqueado (Solid Unbleached Board–SUB, Solid Unbleached Sulphate– SUS). .....	51
Cartón de fibras recicladas (White Lined Chipboard – WLC). ....	51
Cartón para líquidos (Liquid Packaging Board – LPB).....	52
2.6. Propiedades generales del cartón .....	54
Gramaje (Norma ISO 536).....	56
Espesor (Norma ISO 534).....	56
Densidad y volumen (Norma ISO 534). ....	57
Estabilidad dimensional y contenido de humedad (Norma ISO 287).....	57
Resistencia al desgarramiento (fuerza de rasgado).....	58
Rigidez. ....	58
Blancura, brillo, lustre y opacidad (Propiedades secundarias, (Pro Carton)). ....	59
2.7. Propiedades mecánicas del cartón.....	59
Elasticidad.....	61
Resistencia a la tensión y alargamiento. ....	61
Resistencia a la compresión. ....	61
Resistencia de unión entrecapas (Prueba TAPPI 569).....	62
Dirección de máquina. ....	63

<b>Capítulo III: Las fibras de carbono .....</b>	<b>65</b>
3.1. Origen de las fibras de carbono.....	66
3.2. Definición, actualidad y clasificación por propiedades .....	69
3.3. Procesamiento de las fibras de carbono .....	72
Estabilización.....	73
Carbonización.....	73
Tratamiento de la superficie.....	74
Revestimientos.....	74
3.4. Estructura, tipos y propiedades generales de las fibras de carbono .....	75
3.5. Resinas epóxicas .....	77
Tipos de resinas epóxicas comerciales.....	80
Agentes de curado para resinas epóxicas.....	80
Propiedades de las resinas epóxicas curadas.....	81
Adhesivos epóxicos.....	82
3.6. Recubrimientos epóxicos.....	83
<b>Capítulo IV: Materiales compuestos .....</b>	<b>84</b>
4.1. Definición.....	84
4.2. Matriz – Fase dispersa.....	85
4.3. Refuerzo – Fase continua.....	87
Teoría de las fibras de refuerzo.....	89
4.4. Interface .....	91
4.5. Procesos de fabricación de los materiales compuestos.....	92
Molde abierto.....	92
Molde cerrado.....	95
4.6. Propiedades mecánicas de los materiales compuestos.....	97



4.7. Ensayos y evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos .....	98
Ensayo a esfuerzos de tensión.....	99
Ensayo a esfuerzos de flexión.....	99
Ensayos de impacto.....	100
Ensayos a esfuerzos de compresión.....	101
<b>Capítulo V: Material compuesto de cartón y fibras de carbono .....</b>	<b>102</b>
5.1. Consideraciones de diseño – Ensayos de propiedades mecánicas, hídricas y deteriorativas ....	103
5.2. Definición de variables dependientes e independientes.....	104
5.3. Selección de materiales.....	106
Cartón: Cartón sólido no blanqueado (SUS).....	106
Tejido de fibras de carbono de alta resistencia 12K. ....	107
Resina epóxica. ....	108
5.4. Proceso de manufactura .....	108
5.5. Propiedades físicas y mecánicas del material compuesto.....	110
5.6. Comportamiento esperado del material compuesto y su aplicación en Arquitectura.....	111
<b>Capítulo VI: Protocolo de experimentación .....</b>	<b>113</b>
6.1. Variables de experimentación.....	113
6.2. Normativa.....	115
6.3. Fichas técnicas de materiales .....	116
Cartón Kraft (cartón sólido no blanqueado SUS) – Matriz (fase continua).....	116
Fibras de carbono 12 K, marca Quintum – Refuerzo (fase dispersa). ....	118
Resina epóxica– Resina epóxica Q2 (aglomerante en interfaces). ....	118
Resina epóxica – Resina epoxi FV (aglomerante en interfaces).....	119
6.4. Muestreo de especímenes de prueba.....	120

6.5. Especificaciones de ensayos y especímenes de prueba .....	123
Normas de ensayos mecánicos.....	123
Normas para propiedades hídricas y deteriorativas. ....	133
6.6. Manufactura de especímenes de prueba.....	138
<b>Capítulo VII: Elaboración de ensayos y análisis de resultados .....</b>	<b>140</b>
7.1. Ensayos mecánicos a esfuerzos de compresión – EC1, EC2.....	140
Resultados de Variable 1 – Especímenes de prueba EC1-CA-n, EC2-CA-n. ....	140
Resultados de Variable 2 – Especímenes de prueba EC1-CR-n, EC2-CR-n.....	149
Resultados de Variable 3 – Especímenes de prueba EC1-CF-n, EC2-CF-n.....	157
Análisis comparativo de variables – Ensayo a esfuerzos de compresión .....	167
7.2. Ensayos mecánicos a esfuerzos de tensión – ET1, ET2 .....	171
Resultados de Variable 1 – Especímenes de prueba ET1-CA-n, ET2-CA-n.....	172
Resultados de Variable 2 – Especímenes de prueba ET1-CR-n, ET2-CR-n. ....	180
Resultados de Variable 3 – Especímenes de prueba ET1-CF-n, ET2-CF-n. ....	188
Análisis comparativo de variables – Ensayo a esfuerzos de tensión .....	200
7.3. Propiedades mecánicas del material compuesto .....	224
7.4. Ensayo de envejecimiento ante la intemperie - Norma ASTM G154-06 .....	211
Etapa 1: Caracterización previa y proceso de programación.....	211
Etapa 2: Proceso y finalización de ciclo en cámara de intemperismo. ....	216
Etapa 3: Caracterización posterior al ensayo y análisis de información.....	217
Etapa 4: Análisis de resultados. ....	222
7.5. Ensayo de absorción de humedad - Norma ASTM D570-98 .....	224
Etapa 1: Preparación de muestras y programación de ensayo. ....	224
Etapa 2: Procedimiento de ensayo y análisis de resultados. ....	225

<b>Capítulo VIII: Aplicación del material compuesto en Arquitectura – Caso de estudio.....</b>	<b>229</b>
8.1. Caso de estudio “Gimnasio para artes marciales”.....	225
8.2. Diseño estructural de armaduras con material compuesto.....	235
8.3. Análisis de resultados.....	251
<b>Capítulo IX: Conclusiones .....</b>	<b>253</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>263</b>
<b>Fuentes de información .....</b>	<b>264</b>
<b>Apéndice A: Especificaciones técnicas de ensayos con base en normativa ASTM .....</b>	<b>267</b>
<b>Apéndice B: Proceso de manufactura de especímenes de prueba a detalle, muestreo EC1, ET1272</b>	
<b>Anexo I: Estancia de investigación en LITEM, UPC .....</b>	<b>283</b>

## Introducción

La necesidad de construir estructuras de gran claro como pabellones itinerantes y refugios emergentes, debido a desastres naturales o situaciones de emergencia, resulta en el uso de un sistema constructivo ligero, fácilmente transportable, compuesto por elementos estandarizados y que pueda ser montado en breves periodos de tiempo; ejemplo de ello, son las estructuras espaciales tridimensionales.

El diseño e investigación de los sistemas de estructuras espaciales tridimensionales ha permitido la construcción de edificaciones de gran complejidad en proyectos a diversa escala, basados en la geometría de poliedros, ofreciendo los siguientes beneficios ante los sistemas estructurales tradicionales, como el concreto reforzado o la losacero:

- **Ligereza:** Los sistemas estructurales espaciales son elaborados a partir de materiales que poseen una buena relación resistencia mecánica - baja densidad, lo que permite la reducción del peso total de la edificación y la simplificación de la cimentación.
- **Estandarización de elementos:** Al poseer un bajo número de componentes con dimensiones similares y formas unificadas, se reduce el costo y tiempo de ensamble.
- **Posibilidad de conformar sistemas estructurales con capacidad de fácil transportabilidad y desmontabilidad.**
- **Estabilidad:** Los elementos estructurales trabajan de manera conjunta, lo que permite una distribución uniforme de las cargas.

A nivel internacional, se han desarrollado diversos tipos de sistemas constructivos aplicados para refugios en zonas de desastre y para edificaciones itinerantes; los cuales van desde el uso de materiales orgánicos como el bambú hasta edificaciones que poseen materiales de alta tecnología.

Una propuesta innovadora para la creación de refugios itinerantes fue desarrollada en 1995 por el arquitecto Shigeru Ban, tras el terremoto en la ciudad de Kobe, Japón. Los refugios basados en una estructura portante de tubos de cartón, con dimensiones de 52 m<sup>2</sup> tuvieron un costo menor a los dos mil dólares, los cuales estaban aislados del exterior y soportaban condiciones de lluvia, humedad y fuego. Igualmente podían ser fácilmente desmontables y reciclables. Este proyecto marcó una pauta en el desarrollo de la vivienda emergente y en el uso de los sistemas constructivos tradicionales, abriendo la posibilidad de utilizar materiales de origen orgánico como materiales constituyentes para elementos estructurales. A partir de este proyecto, Shigeru Ban replicaría los sistemas basados en cartón, para la

creación de diversos refugios en zonas de desastre, adaptando cada uno según las condiciones climatológicas del sitio.

Durante las últimas décadas, Shigeru Ban ha desarrollado proyectos a gran escala dónde se plantea el uso de tubos de cartón como elementos estructurales, principalmente enfocados a ser obras temporales; pero con el debido mantenimiento y tratamiento del material, también se proponen como edificaciones con una vida útil relativamente larga. Tras rigurosas investigaciones sobre ingeniería estructural, de tratamientos especiales y de pruebas estructurales del material, se han creado sistemas a base de cartón que garantizan la estabilidad, seguridad, funcionalidad y el confort que cada entorno requiere.

Existen otras investigaciones dónde se plantean estructuras de tubos de cartón para la creación de edificaciones, como: el proyecto de una pequeña escuela por Buro Happold, la “Public Farm One” por WORK Architecture Company – LERA, los “Portals to an Architecture” de Steve Preston y el “Brunkebergstrong 2014” por Guringo (Bank, 2016).

El uso de sistemas constructivos basados en cartón va en aumento, debido a su buen comportamiento mecánico-estructural, su baja densidad, al potencial estético y al ser un material con características sustentables, como puede ser el proceso de reciclaje. Actualmente el desarrollo de tecnología del cartón en Arquitectura va enfocado en la producción de edificaciones con una vida útil relativamente larga y con el incremento de sus capacidades estructurales. Debido a esto surge la necesidad de investigar el mejoramiento de los procesos de producción del cartón o de investigar materiales de refuerzo que puedan ser agregados al cartón, creando materiales compuestos, para extender su vida útil y mejorar sus propiedades mecánicas.

### **Materiales compuestos en la Construcción**

Un material compuesto se produce al unir dos o más materiales (metálicos, cerámicos, polímeros). Su objetivo principal es lograr una combinación de propiedades que no posee un material aislado e incorporar las mejores características de los materiales que lo componen.

La aplicación de los materiales compuestos en el sector de la Construcción en comparación con otras áreas no ha sido tan generalizada. Mucho se debe al conservadurismo histórico de los sistemas constructivos y al uso de los materiales tradicionales como el concreto, acero y madera.

El uso de los materiales compuestos en la Arquitectura se incrementa día a día, principalmente por el incremento de las propiedades mecánicas de los materiales, el ahorro significativo de peso en las estructuras y la capacidad de poder crear formas geométricamente complejas. Su uso habitual ha sido como elementos secundarios en elementos estructurales, como medios de refuerzo, o en grandes estructuras autoportantes como cúpulas. Sus características generales son: alta resistencia a esfuerzos mecánicos, estética, ligereza, resistencia a ambientes corrosivos, durabilidad, flexibilidad de diseño, estabilidad dimensional, comportamiento dieléctrico y resistencia a temperaturas elevadas. Actualmente la investigación y desarrollo de los materiales compuestos, requiere la obtención de elementos con mayores prestaciones a un costo menor, así como el uso de los materiales reciclables y las fibras naturales.

Uno de los materiales compuestos más utilizados en la industria, desde finales del siglo XX, ha sido la fibra de carbono con resina epóxica. La aplicación de las fibras de carbono en la Construcción ha sido para la reparación, rehabilitación y refuerzo de edificios que presentan patologías o que han sido ejecutados bajo premisas de cálculo erróneas. Este método se refiere al uso de láminas de fibras de carbono, para fortificar a los elementos estructurales en las zonas con mayor carga a esfuerzos de tensión; teniendo en consideración que la capacidad de refuerzo del carbono es unidireccional en el sentido de las fibras. Los lugares habituales dónde se aplican este material como refuerzo son: las vigas, en caras inferiores para incrementar su resistencia a esfuerzos de flexión o en caras laterales para la resistencia a esfuerzos cortantes; en muros para mejorar su resistencia a la flexión y cortante; en columnas y losas otorgando mayor rigidez y resistencia mecánica. Usualmente estas láminas son adheridas a los elementos estructurales por medio de resinas epóxicas (Cucarella, 2017). Debido a las características técnicas de las fibras de carbono, existen numerosos procesos de manufactura y tipos de tejido, con diversas capacidades de resistencia mecánica y composición química, según las propiedades que se busquen destinar al material.



*Figura 1. CABKOMA Strand Rod. Sistema antisísmico basado en fibras de carbono.*

Una aplicación reciente en la producción arquitectónica fue el desarrollo de una fibra de carbono termoplástica llamada “CABKOMA Strand Rod”, Figura 1, material compuesto por fibras de carbono recubiertas con fibras sintéticas e inorgánicas revestidas con una resina termoplástica. El arquitecto Kengo Kuma utilizó dicho material en la sede de la compañía como refuerzo sísmico, siendo reconocido como el sistema antisísmico más ligero del mundo. Un rollo de 158 metros de CABKOMA Strand Rod pesa doce kilogramos, siendo una quinta parte del peso de un alambre metálico con la misma resistencia, (Overstreet, 2016).

### **Fundamentación de la investigación**

El desarrollo e implementación de los materiales compuestos ha cambiado la forma de vida del ser humano, al facilitar y hacer más eficiente la producción de objetos de la vida diaria, que van desde un zapato, celulares, automóviles, etc. Una de las ventajas de la aplicación de estos materiales en la Arquitectura, es que la mayoría ya han sido probados en otras disciplinas; un ejemplo, es el desarrollo de materiales compuestos de fibra de carbono inicialmente en la industria aeroespacial, que pasó a la

aeronáutica, a la industria automotriz, deportiva y finalmente observamos ejemplos notables de su aplicación en la Arquitectura.

Por otra parte, el uso de la geometría tridimensional en las estructuras ha permitido la creación de obras con características admirables, como librar grandes claros, su ligereza frente a los sistemas tradicionales, su construcción en periodos breves de tiempo y con la posibilidad de desmontabilidad y reúso. Los elementos utilizados en estas estructuras se caracterizan por ser ligeros, resistentes a esfuerzos de compresión – tensión y de ser producidos de manera estandarizada; compuestos de materiales como el aluminio, acero, madera, bambú e inclusive algunos polímeros. También existen notables ejemplos del uso del cartón en estos sistemas, arquitectos como Shigeru Ban han aprovechado el potencial de este para realizar construcciones a bajo costo y en tiempo récord, como módulos de vivienda y pabellones; probando así la eficiencia del cartón como material de construcción en estructuras ligeras.

### **Planteamiento de la investigación**

La investigación plantea el desarrollo de un nuevo material compuesto a base de una matriz de cartón (fase continua) reforzada con fibras de carbono (fase dispersa), para la elaboración de elementos estructurales ligeros, aplicados en sistemas estructurales espaciales de gran claro.

Actualmente, el cartón es un material ampliamente utilizado, primordialmente en el mercado de envases. Su aplicación principal en la industria de la Construcción es como cimbra, teniendo por ejemplo los sonotubos. En años recientes, arquitectos como Shigeru Ban han investigado las propiedades del cartón para utilizarlo como material en elementos estructurales. Debido a las características del cartón de ser económico, reciclable, fácil de manipular y con un alto factor de resistencia mecánica - peso, es viable para utilizarlo como material constructivo en la Arquitectura. Principalmente se ha demostrado su capacidad de resistencia ante esfuerzos de compresión aplicado en forma de tubos.

El material de refuerzo planteado para mejorar las propiedades del cartón son las fibras de carbono (FC). Implementadas inicialmente en la industria aeroespacial, su proceso de producción ha mejorado notablemente haciéndolas un material más accesible económicamente y diversificando su aplicación en el campo de la aeronáutica, la industria automotriz y deportiva. Las fibras de carbono son uno de los materiales que comienzan a revolucionar la industria de la Construcción. En el campo de la Ingeniería Civil y la Arquitectura se han empleado principalmente como material de refuerzo estructural, haciendo viable su aplicación como refuerzo en la elaboración de un material compuesto.



La propuesta se basa en el uso de una matriz reforzada con fibras, las cuales han sido uno de los materiales de reciente investigación en la producción arquitectónica. Las fibras al unirse con otros materiales de la Construcción han probado crear materiales compuestos con propiedades mecánicas incrementadas, haciéndolas más eficientes en capacidades de carga.

La meta de la investigación es el desarrollo de un material compuesto a partir del cartón y fibras de carbono para la creación de elementos estructurales ligeros, como es el caso de barras o tubos en armaduras bidimensionales o espaciales. Se prevé que la combinación de la matriz de cartón con el refuerzo de fibras de cartón, logré generar un material con propiedades mecánicas más elevadas que los materiales aislados. El buen comportamiento del cartón ante la resistencia a esfuerzos de compresión y de las fibras de carbono ante esfuerzos de tensión, generará un material compuesto de buenas prestaciones ante ambos tipos de esfuerzos, con un peso muy bajo, en comparación a los materiales utilizados tradicionalmente.

En la práctica, se plantea hacer uso del material para utilizarse como material estructural ligero y así desarrollar un sistema constructivo que pueda aplicarse para la fabricación de estructuras ligeras autoportantes de gran claro. Una aplicación, como es el ejemplo de Shigeru Ban de utilizar el cartón para crear refugios en zonas de desastre o cubiertas de grandes claros, puede ser optimizado si se propone este material con características y propiedades incrementadas, para crear refugios de mayores dimensiones, que puedan ser reutilizados más veces y que puedan poseer cargas superiores. Igualmente, durante el desarrollo de la investigación y con base en los resultados obtenidos de las propiedades del nuevo material propuesto se observarán otros usos que pueda desempeñar en el campo de la Arquitectura.

El tema de investigación plantea dos puntos principales:

- Unión de dos materiales para conformar un material compuesto ligero: Matriz de cartón (material fibroso de fibras de celulosa comprimidas) y refuerzo de fibras de carbono (tejido 12K Twill), con el objetivo de aprovechar las características de cada material para constituir un nuevo material compuesto con mejores propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión y compresión.
- Aplicación del material compuesto en la fabricación de elementos estructurales ligeros, utilizados en estructuras espaciales tridimensionales en la Arquitectura; teniendo en cuenta que las características de este material pueden contribuir al diseño y construcción de sistemas estructurales más ligeros y procesos de montaje más eficientes.

La unión de los materiales base, matriz de cartón y refuerzo de tejido tipo Twill 12K de fibras de carbono, para componer el material compuesto, se realizará ya en la aplicación práctica como elemento estructural, es decir, se conformará en forma de tubos (barras) que puedan ser utilizados directamente como cordones superiores, cordones inferiores y diagonales en una armadura. El uso de esta geometría para la elaboración de las muestras y del futuro producto, proviene del aprovechamiento del mercado en la venta de tubos de cartón y de las ventajas de utilizar una superficie continua (sin aristas) que facilita el proceso de manufactura en la unión de las fibras de carbono alrededor del cartón, propiciando una transmisión de esfuerzos más uniforme al momento de ser sometida a cargas.

### **Hipótesis**

La elaboración de un material compuesto ligero a base de una matriz de cartón SUS-Kraft reforzada con un tejido de fibras de carbono 12K Twill y su aplicación en elementos estructurales, resultará en el diseño y construcción de sistemas estructurales más eficientes, con mejores propiedades a esfuerzos de compresión y a esfuerzos de tensión.

### **Objetivos**

El proyecto plantea el desarrollo de un material compuesto ligero a base de una matriz de cartón y un refuerzo de fibras de carbono para su uso en elementos estructurales ligeros aplicados en la Arquitectura.

En la investigación se analizarán los siguientes puntos:

- Diseñar un material compuesto ligero a base de una matriz de cartón, mejorando sus propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión, por medio de la adición de un refuerzo de fibras de carbono.
- Determinar las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión y a esfuerzos de tensión del material compuesto ligero a base de una matriz de cartón reforzada con fibras de carbono.
- Observar la adherencia en la zona de interface, entre el cartón y las fibras de carbono en la conformación del material compuesto, por medio de los ensayos mecánicos.
- Observar el comportamiento del material compuesto ligero a base de una matriz de cartón reforzada con fibras de carbono, frente a la radiación solar y la humedad.
- Aplicación de un material compuesto ligero a base de una matriz de cartón reforzada con fibras de carbono como elemento estructural, con geometría tubular, en estructuras espaciales para cubiertas y fachadas.

- Analizar los beneficios del material compuesto ligero de cartón y fibras de carbono frente a los sistemas estructurales tradicionales.

El documento de investigación presenta en los siguientes capítulos los conceptos relacionados a la clasificación y propiedades generales de los materiales, las características y propiedades de los materiales fase que han sido implementados en el proyecto (cartón, fibras de carbono, resina epóxica), el proceso de desarrollo del material compuesto, los ensayos realizados con su análisis estadístico para determinar las propiedades del material compuesto, la aplicación teórica del producto y las conclusiones finales.

## **Capítulo I: Materiales en Arquitectura**

Inicialmente, las primeras civilizaciones humanas sólo tenían acceso a un número limitado de materiales derivados de materias primas de la Naturaleza, como las piedras, las maderas, las arcillas y las pieles. Con el tiempo, se fueron descubriendo técnicas para producir nuevos materiales, que tuvieran propiedades superiores en comparación a los extraídos de manera natural, como la cerámica y algunos metales. Poco a poco, por medio de la observación, se descubrió que las propiedades de un material podían ser alteradas por tratamientos de calor o por la adición de otras sustancias. A partir de esto, el proceso de selección de un material se definía por sus propiedades “apropiadas”, es decir, aquellas características del material que más se ajustaban a su uso futuro. Hasta hace poco, se logró comprender que las propiedades de un material se definían directamente por su composición química, su microestructura y su procesamiento de manufactura (Callister, 2007).

A través de la investigación, el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías ha permitido la evolución de los sistemas constructivos en la Arquitectura. Desde la segunda mitad del siglo XIX y el siglo XX, la industria de la Construcción se ha caracterizado por tener grandes avances por la aplicación de nuevos materiales sintéticos como son los polímeros, los materiales fibrosos, los materiales compuestos, los materiales multifuncionales, entre otros.

Un ejemplo en la vida cotidiana del desarrollo de los nuevos materiales, a inicios del siglo XX, fue la baquelita. La baquelita fue el primer material polimérico sintético; fabricada por el químico estadounidense Leo Baekeland. Actualmente, este material todavía se utiliza en algunas aplicaciones de Ingeniería (Miravete, 2002). A partir del desarrollo de este material se extendió la premisa de que es posible modificar las características de los materiales existentes y crear nuevos materiales, que pueden ser diseñados para funciones específicas, según lo requiera el usuario. En el campo de la Arquitectura principalmente se buscó el desarrollo de las propiedades mecánicas de los materiales constructivos, como son la rigidez, la dureza, la tenacidad y la resistencia a ciertos esfuerzos.

La Ciencia e Ingeniería de los materiales es el campo interdisciplinario que investiga el mejoramiento de nuevo materiales, con base en el estudio de las relaciones entre la estructura, la composición, la síntesis y el procesamiento de diversos materiales. Sus objetivos son el mejoramiento de las propiedades de los materiales existentes y la invención o descubrimiento de nuevas técnicas y materiales que puedan ser aplicados en la industria. Esta disciplina se rige bajo los siguientes cuatro conceptos:

- Las propiedades de un material pueden ser alteradas por medio de la aplicación de tratamientos de calor o por la adición de otras sustancias.
- Existe una relación intrínseca entre la estructura - composición – procesamiento de un material y sus propiedades.
- El concepto de rentabilidad; que consiste en la interrelación de la accesibilidad y la capacidad de satisfacer una necesidad a través de un material.
- Generar procesos de producción más prácticos en el desarrollo de los materiales.

El concepto de rentabilidad es uno de los objetivos prioritarios en la mayoría de las industrias. Debido a esto, es importante resaltar la accesibilidad de un material y la capacidad de este para satisfacer una necesidad, debido a que, si el material es muy escaso o costoso, no será rentable su uso. Parte importante del desarrollo de nuevos materiales es encontrar procesos que faciliten su producción y por lo tanto su accesibilidad a varios sectores de la población.

Actualmente, el estudio de los materiales se enfoca principalmente al desarrollo de nuevos materiales, especialmente los materiales compuestos, los cuales consisten en la unión de dos o más componentes, con el objetivo de obtener mejores características y propiedades que al estar aislados. En el caso de elementos que requieren estar sometidos a esfuerzos mecánicos, los materiales compuestos más desarrollados se basan en matrices reforzadas por fibras, cuyas características permiten incrementar la resistencia del compuesto a la tensión.

El uso de los materiales compuestos, basados en fibras, se remonta a la época de la Segunda Guerra Mundial, cuando se fabricaron algunas piezas de aviones con PRFV's (Plásticos reforzados con fibras de vidrio). Al término de la guerra se continuó empleando el material, pero en menor medida, debido al elevado costo de su producción. El atractivo de este material radicó en la facilidad de ser moldeado para crear formas complejas, lo que despertó el interés de los diseñadores, siendo una de sus primeras aplicaciones la fabricación de láminas translúcidas. Para la década de 1960, el material compuesto de fibras de vidrio/poliéster, comenzó a ser planteado para su uso en la edificación, utilizado frecuentemente para la fabricación de unidades de paneles prefabricados (Miravete, 2002). En la actualidad, se ha incrementado la investigación y producción de los materiales compuestos para el sector de la Construcción, pero esta ha sido escasa en comparación con otras disciplinas. En la Figura 2 se muestran los sectores de aplicación de los materiales compuestos.

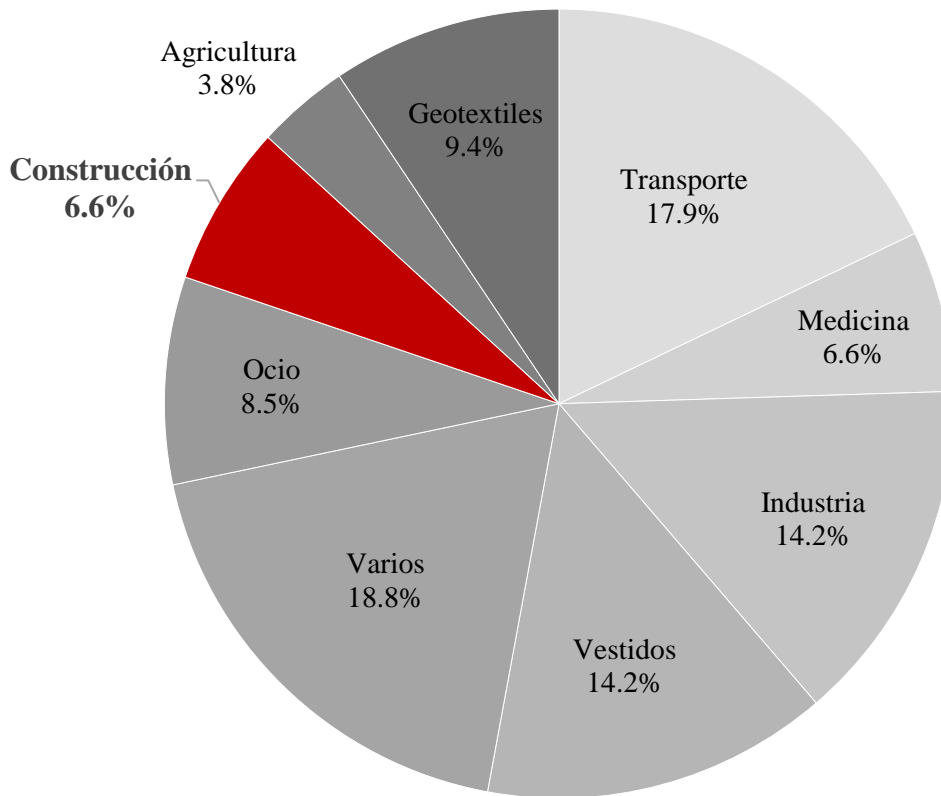


Figura 2. Gráfica de sectores de aplicación de los materiales compuestos (Miravete, 2002).

### Concepto de estructura de un material

El concepto de estructura es primordial para el estudio de los materiales, ya que la alteración a diversas escalas de la estructura de un material cambiará sus propiedades y por lo tanto condicionará su aplicación. La estructura se define como la disposición de los componentes internos de un material. En el proyecto de investigación, las escalas de estructura, para el estudio de un material, son clasificadas en los siguientes cinco niveles<sup>1</sup>:

- Primer nivel: Estructura subatómica (involucra a los electrones dentro de átomos individuales y su interacción con el núcleo) y estructura atómica. En este nivel, la disposición de los electrones que rodean al núcleo de los átomos individuales afecta el comportamiento eléctrico, magnético, óptico y térmico del material.

<sup>1</sup> Formulación por el autor de clasificación de estructura, apoyado en: Callister, W. (2007). Materials Science and Engineering. An introduction. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, Inc.

- Segundo nivel: Disposición o arreglo atómico de corto y largo alcance. Los materiales metálicos, semiconductores, algunos cerámicos y muchos polímeros, poseen una organización de átomos muy regular, es decir, una estructura cristalina. Mientras que algunos cerámicos y muchos polímeros no poseen una organización atómica ordenada, por lo que se les considera amorfos o vítreos.
- Tercer nivel: Nanoestructura. Es la estructura de un material a escala nanométrica, con una longitud de 1 a 100 nm. En la actualidad, el desarrollo de nuevos materiales avanzados de Ingeniería se realiza a esta escala.
- Cuarto nivel: Microestructura. Es la estructura de los materiales a una escala de 100 a 100,000 nm (0.1 a 100 micrómetros  $\mu\text{m}$ ). Se puede observar esta escala de estructura con microscopios ópticos.
- Quinto nivel: Macroestructura. Es la estructura de un material a nivel macroscópico, con una escala de longitud mayor a 100  $\mu\text{m}$ . Se denotan características como la textura, la porosidad, los recubrimientos, entre otras. Puede ser observada con el ojo humano.

En el proyecto de investigación, el análisis y empleo de los materiales se realizará a escala de microestructura y macroestructura, destacando el comportamiento mecánico de las fibras del cartón y las fibras de carbono, así como la compatibilidad y comportamiento de ambos materiales con la resina epóxica en la zona de interface.<sup>2</sup>

## **Propiedades de los materiales**

Las propiedades generales de los materiales son el conjunto de características que describen y definen a un material ante la aplicación de un estímulo específico. Estas son expresadas en términos del tipo y magnitud de la respuesta ante los estímulos externos. Generalmente, las propiedades de un material son ajenas a sus características de forma y tamaño. Las propiedades de un material permiten diferenciar a un material de otro, permitiendo seleccionarlos para usos específicos. Existen dos tipos de propiedades generales: las propiedades físicas y las propiedades químicas.

---

<sup>2</sup> El objetivo de la investigación es el mejoramiento de las propiedades mecánicas del material compuesto con fines de aplicación en la Arquitectura, teniendo como requisito la manipulación de la estructura de los materiales a niveles de microestructura y macroestructura; el equipo y las herramientas de trabajo implementadas en el proyecto son aplicables en la interacción con los materiales en las escalas mencionadas.

Las propiedades físicas son aquellas características que pueden ser observadas o medidas sin cambiar la composición química del elemento. A diferencia de las propiedades químicas, no es necesario cambiar la naturaleza de una sustancia para medir alguna propiedad física. Algunas propiedades físicas son: el color, la densidad y la permeabilidad.

Las propiedades químicas se definen como las propiedades que se manifiestan al alterar su estructura interna o molecular, cuando interactúan con otras sustancias. Entre las propiedades químicas principales están: combustión, corrosión, descomposición, disociación, fermentación, hidrólisis, punto de inflamabilidad, reacción de adición, reacción de condensación, reacción de oxidación-reducción y reacción endotérmica.

A partir de estas propiedades generales, se derivan otras propiedades, los cuales se clasifican según el estímulo específico aplicado, para provocar diferentes respuestas en un material. Estas son (Callister, 2007):

- Propiedades mecánicas<sup>3</sup>: Se relacionan con la deformación al aplicar una carga o fuerza sobre el material. Ejemplo: resistencia a esfuerzos de compresión.
- Propiedades eléctricas: Respuesta de un material ante la aplicación de un estímulo eléctrico. Ejemplo: conductividad, constante dieléctrica.
- Propiedades térmicas: Comportamiento de los materiales ante el calor. Ejemplo: capacidad calorífica, conductividad térmica.
- Propiedades magnéticas: Comportamiento del material ante la aplicación de un campo magnético.
- Propiedades ópticas: Respuesta obtenida a través de un estímulo electromagnético o por la radiación lumínica; obteniendo índices de refracción y reflectividad.
- Propiedades deteriorativas: Conducta de los materiales ante reacciones químicas.

### **Propiedades físicas y mecánicas de los materiales**

Las propiedades mecánicas son las responsables del comportamiento estructural de los materiales; son características inherentes que permiten diferenciar a un material de otro. Las propiedades mecánicas dependen de la composición, microestructura y procesamiento de los materiales. A partir de estas

---

<sup>3</sup> Las propiedades mecánicas son las que se tomarán como referencia principal para el proceso de investigación del proyecto, ya que el material compuesto por desarrollar tiene por objetivo ser aplicado como elemento estructural para estructuras en la Arquitectura.



propiedades, se puede deducir si el material cumple las especificaciones establecidas y que tipo de comportamiento mecánico tendrá en nuevos diseños o productos.

El comportamiento mecánico de los materiales se explica a partir de la respuesta del material (deformación) cuando le es aplicada una determinada carga (fuerza); esta respuesta depende fundamentalmente de la estructura microscópica del material. Para determinar los valores de las propiedades mecánicas de un material, las pruebas de ensayos mecánicos son efectuadas en laboratorios o ambientes controlados, variando magnitudes como las cargas, el tiempo de duración del ensayo y la temperatura (Montaño, 2002).

Las principales propiedades físicas y mecánicas que condicionan el comportamiento de un material en elementos estructurales son: elasticidad, plasticidad, ductilidad, maleabilidad, dureza, fragilidad, tenacidad, rigidez y fatiga. A continuación, se describen las principales propiedades mencionadas:

- Elasticidad: Se define como la propiedad mecánica de ciertos materiales a sufrir deformaciones (reversibles) cuando se encuentran sujetos a la acción de una fuerza externa y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.
- Plasticidad: Propiedad mecánica que tiene un material para deformarse permanente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a fuerzas externas, por encima de su límite elástico, sin que se produzca una rotura.

Uno de los ensayos más utilizados para conocer el comportamiento mecánico de un material, es el ensayo de tensión, en el que una probeta estandarizada se coloca entre dos mordazas conectadas a una máquina que estira la muestra. A partir de los resultados obtenidos, se puede trazar el diagrama de esfuerzo - deformación, Figura 3, siendo el esfuerzo “ $\sigma$ ” el coeficiente de la carga aplicada entre el área y la deformación “ $\epsilon$ ” el alargamiento relativo que experimenta la muestra sometida al esfuerzo (Montaño, 2002).

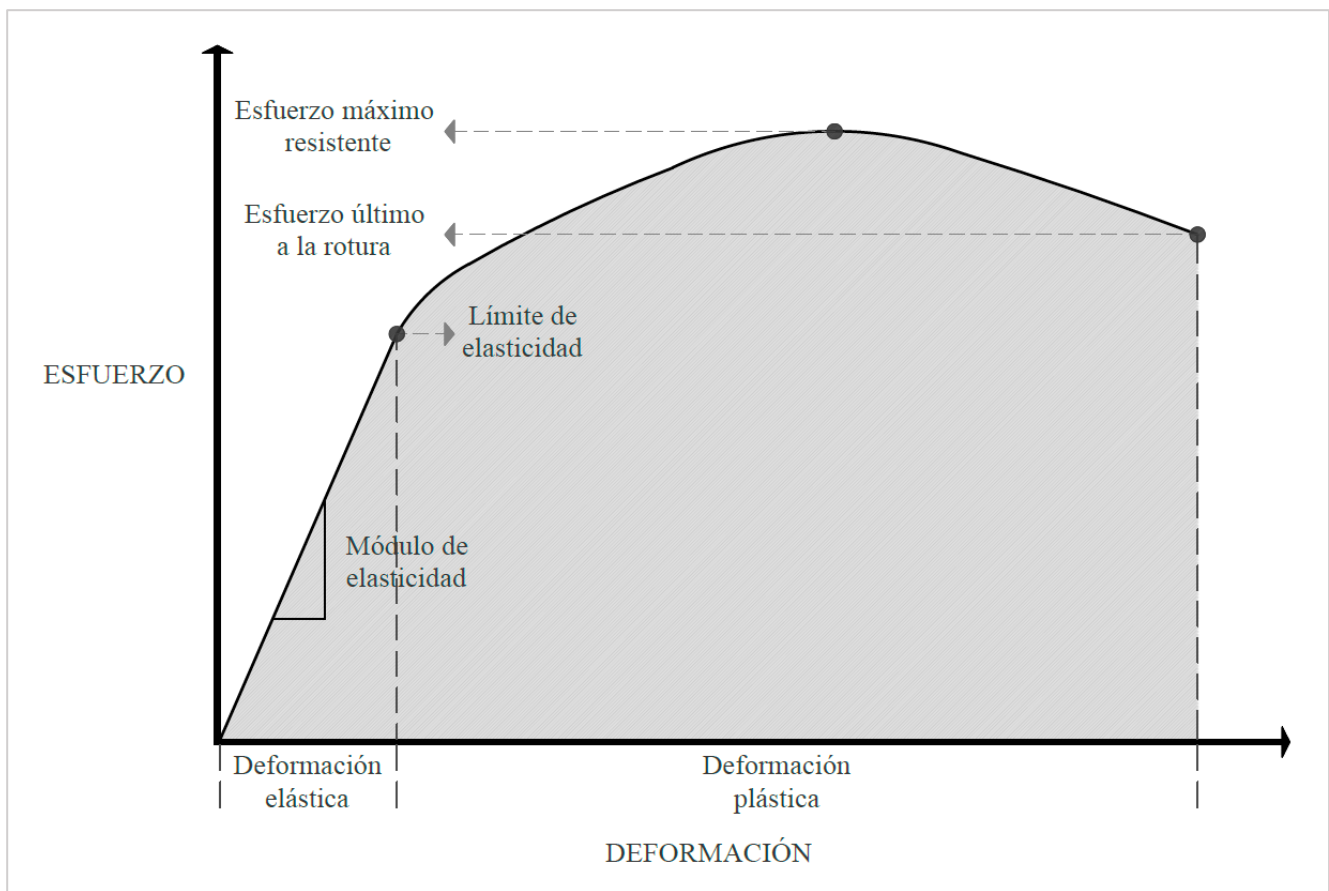


Figura 3. Ejemplo de una gráfica esfuerzo - deformación de un material sólido, sometido a esfuerzos de tensión.<sup>4</sup>

En la Figura 3 se observan dos zonas, la zona elástica en la que se posee un comportamiento lineal (Ley de Hooke<sup>5</sup>) y la zona plástica. En la zona elástica la forma inicial del material se recupera si se elimina el esfuerzo aplicado, mientras que en la zona plástica es imposible la recuperación de las dimensiones iniciales tras el esfuerzo, obteniendo una deformación permanente del material. El punto de transición entre las dos zonas se denomina límite elástico. La pendiente de la zona elástica permite la obtención del Módulo de Young “E”, el cual indica el esfuerzo que soporta el material antes de deformarse plásticamente.

<sup>4</sup> La gráfica esfuerzo – deformación permite determinar si el material es elástico o plástico, además denota el grado de deformación que posee. Cada material posee distintos valores, lo que nos permite conocer su comportamiento ante ciertos esfuerzos mecánicos como la compresión y la tensión.

<sup>5</sup> En el siglo XVII, el físico Robert Hooke observó que en algunos materiales la curva de la gráfica de esfuerzo - deformación tiene una región lineal. En la región lineal, la fuerza requerida para estirar un material elástico es directamente proporcional a la extensión de este.

Las propiedades de elasticidad y plasticidad son de gran importancia en el desarrollo de los materiales constructivos para la Arquitectura, ya que, dependiendo de qué tipo de comportamiento presenten, elástico o plástico, ante la aplicación de una carga determinada, se propone o no su uso en elementos estructurales, además de establecer los valores de sus límites elásticos y el tipo de sistema estructural en el que pueden ser implementados (rígidos o dúctiles). A continuación, se mencionan las propiedades mecánicas y físicas que son referentes al proyecto de investigación:

- Resistencia a esfuerzos de tensión (Propiedad mecánica): Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo la acción de una fuerza a tensión (aplicación de dos fuerzas en direcciones opuestas, arrastrando desde un mismo punto) antes de romperse (fractura).
- Resistencia a esfuerzos de compresión (Propiedad mecánica): Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo la acción de una fuerza a compresión (aplicación de dos fuerzas en una misma dirección, en sentidos opuestos, provocando un “abombamiento” en su parte central y reduciendo su longitud inicial).
- Ductilidad (Propiedad mecánica): Propiedad que poseen algunos materiales para poder estirarse en hilos delgados o varillas. Esta propiedad se observa bajo la acción de una fuerza sobre el material, al deformarse plásticamente sin romperse.
- Fragilidad (Propiedad física): Capacidad de un material de fracturarse con poca deformación. La rotura frágil tiene la peculiaridad de absorber relativamente poca energía. Concepto opuesto de la ductilidad.
- Maleabilidad (Propiedad física): Propiedad mecánica de los materiales de transformarse en láminas delgadas al ejercer una fuerza (no deformación).
- Dureza (Propiedad física): Se define como el grado de resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado por otro objeto.
- Tenacidad (Propiedad física): Propiedad que tienen algunos materiales de soportar sin deformarse, ni romperse los esfuerzos básicos que se les apliquen. La tenacidad implica que el material tiene capacidad de absorber energía.
- Rigidez (Propiedad física): Se define como la capacidad de un material para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos. Un material rígido es el que no tiene deformación visible antes de romperse.
- Fatiga (Propiedad mecánica): Es la falla por fractura del material que se da cuando se aplican esfuerzos repetidamente (puede ser en un periodo cíclico). Esta propiedad mecánica se aplica principalmente en elementos que están sometidos a esfuerzos dinámicos; se hace mención de esta

propiedad por la importancia que tiene en las industrias, más no se plantea hacer análisis de ella en el proyecto de investigación.

Las pruebas de ensayos por normativa de las propiedades mecánicas permitirán conocer el comportamiento mecánico y estructural del material compuesto planteado en la investigación. Aunada a la investigación teórica, se establecerá la composición eficiente de la proporción de cartón y fibras de carbono, de la disposición de ambos materiales en el elemento (tubos estructurales) y se procederá a hacer una comparativa con materiales con funciones constructivas similares en el mercado.

### **El proceso y rendimiento en la producción de materiales**

Para el desarrollo de un material aplicado en la Arquitectura, además de la estructura y las propiedades de un material, existen dos conceptos que cabe mencionar: el proceso y el rendimiento. Existe una correlación intrínseca entre el proceso y la estructura de un material. La estructura también depende de cómo es procesado el material. El rendimiento de un material será un reflejo con base en sus propiedades (Callister, 2007).

*proceso* —————> *estructura* —————> *propiedades* —————> *rendimiento*

El objetivo principal del estudio de los materiales es resolver un problema o necesidad relativos a los materiales. Comúnmente un material no posee todas las características “ideales” que se necesitan; por sus propiedades un material puede ser muy eficiente en algunas y deficientes en otras. Debido a esto, existe un proceso racional para la selección más adecuada de un material, teniendo en cuenta los siguientes tres puntos:

- Poseer un material que tenga las propiedades generales que se buscan y de ahí optimizarlo.
- El deterioro del material durante su uso.
- El aspecto económico - rentabilidad.

En el proyecto planteado, los materiales base (cartón y fibras de carbono) han sido seleccionados con base en sus propiedades de resistencia a esfuerzos mecánicos, a su baja densidad y a su aplicación en investigaciones análogas de Arquitectura. Durante la investigación se propone realizar el análisis de la

viabilidad del material compuesto para ser competitivo ante los materiales tradicionales de la Construcción, tomando en cuenta los puntos previamente mencionados.

### **Clasificación general de los materiales**

En el desarrollo del material compuesto del proyecto de investigación, es necesario determinar cómo son clasificados los materiales, con el propósito de conocer sus propiedades específicas y así, seleccionar aquellos que son convenientes a utilizar. Existe una clasificación general de los materiales basada primordialmente en su composición química y estructura atómica, en la cual casi todos los materiales se ubican en uno de los grupos; algunos materiales de reciente desarrollo son clasificados de manera intermedia (Callister, 2007).

Los materiales son clasificados de manera general en: materiales metálicos y aleaciones metálicas, materiales cerámicos y materiales poliméricos. De la combinación o modificación de estos se obtienen subclasificaciones como los materiales compuestos, los materiales semiconductores, los materiales biomédicos y los materiales multifuncionales (inteligentes).<sup>6</sup>

#### **Materiales metálicos y aleaciones metálicas.**

Los materiales metálicos son sustancias inorgánicas formadas por uno o varios elementos químicos, cuya disposición de estructura atómica es cristalina, es decir, con un arreglo atómico ordenado y repetitivo. Están compuestos por uno o más elementos metálicos tales como el hierro, aluminio, titanio, etc. y a menudo también por elementos no-metálicos como el carbón, nitrógeno y oxígeno en pequeñas cantidades. Los átomos de los metales y aleaciones metálicas son relativamente densos, en comparación a los materiales cerámicos y polímeros.

Entre sus propiedades mecánicas cabe destacar que son materiales rígidos, dúctiles y resistentes a la fractura, lo que los ha hecho ideales para su uso en estructuras. Así mismo, debido a su estructura atómica, los metales adquieren propiedades específicas, como el ser muy buenos conductores de la electricidad y el calor, de no ser transparentes ante la luz visible y también propiedades magnéticas. Entre algunas de sus características se encuentran:

- Son sólidos a temperaturas normales, excepto el mercurio y el galio.
- Tienen una alta densidad.

---

<sup>6</sup> La clasificación de los materiales según Callister incorpora a los materiales metálicos y aleaciones, cerámicos, poliméricos, compuestos y semiconductores. Según otros autores se incluye, además en la clasificación, a los materiales biomédicos y a los materiales multifuncionales.

- Tienen considerable resistencia mecánica elevada.
- Suelen ser maleables y dúctiles.
- Se pueden fundir, conformar y reciclar.

Los metales y aleaciones metálicas se pueden clasificar en ferrosos y no ferrosos debido a la presencia o ausencia del hierro. Un metal es ferroso cuando su componente principal es el hierro (Fe). Normalmente, posee pequeñas cantidades de carbono que se le han incorporado para que la aleación adquiriera unas propiedades especiales. En la naturaleza, nunca se encuentra en estado puro sino combinado con óxidos, hidróxidos, carbonatos y sulfuros. Anteriormente, uno de los metales ferrosos más utilizados en la industria de la Construcción era el hierro forjado, cuyo contenido de carbono es inferior al 0.1%, sin embargo, por sus características de alta porosidad, de fácil oxidación y con susceptibilidad a la formación de grietas internas, su uso no era conveniente. Para mejorar las propiedades de este metal es necesario reducirle el contenido de carbono, calentándolo, para transformarlo en acero; este material sigue siendo duro, pero más elástico, dúctil, maleable capaz de soportar impactos. Los productos que reciben el nombre de aceros, debido a su gran variedad, se clasifican según su composición, características técnicas y aplicaciones. Los tipos de acero más utilizados son los aceros al carbono, los aceros aleados, los aceros de baja aleación ultrarresistentes y los aceros inoxidable.

Los metales no ferrosos son aquellos cuyo contenido en hierro es muy escaso. Se pueden clasificar en tres grupos: pesados, ligeros y ultraligeros. Entre los metales ferrosos más comunes se encuentran el cobre, el aluminio y el plomo.

### **Materiales cerámicos.**

Los materiales cerámicos son sustancias que combinan elementos metálicos entrelazados químicamente con elementos no metálicos, como óxidos, nitruros y carburos. Su estructura atómica puede ser cristalina, no cristalina o semicristalina. Entre los materiales cerámicos más comunes se encuentran el óxido de aluminio, el dióxido de silicio, el nitruro de silicio y el carburo de silicio; los materiales constructivos más utilizados son los denominados “cerámicos tradicionales”, siendo estos las arcillas (porcelana), los cementos y el vidrio.

Dentro de sus propiedades mecánicas se observa que son relativamente rígidos y fuertes (comparable a los metales), además de ser muy duros, resistentes a la fricción; pero son extremadamente frágiles (no son dúctiles) y altamente susceptibles a la fractura. Son comúnmente utilizados como aislantes ante la transmisión de calor y electricidad, por lo que son más resistentes a altas temperaturas y ambientes

hostiles en comparación a los metales y polímeros. Algunas cerámicas de óxido tienen propiedades magnéticas.

Los materiales cerámicos que se usan en aplicaciones de ingeniería se pueden dividir en dos grupos: los materiales cerámicos tradicionales y los materiales cerámicos de ingeniería. La cerámica tradicional está hecha de tres componentes básicos: arcilla, sílice (sílex) y feldespato. Ejemplos de cerámicas tradicionales son los vidrios, ladrillos y azulejos que se usan en industrias de la construcción, y la porcelana eléctrica que se utiliza en la industria eléctrica. Las cerámicas de ingeniería, en cambio, consisten típicamente en compuestos puros o casi puros como óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), carburo de silicio (SiC) y nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ ). Los cerámicos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Vidrios: Comprenden los vidrios y vitrocerámicos. Son utilizados en el campo de la óptica, como compuestos reforzados y contenedores.
- Productos de arcilla: Son productos estructurales de arcilla y porcelanas. Son utilizados como porcelanas y ladrillos.
- Refractarios: Son de arcilla refractaria, de sílice, refractarios básicos y especiales. Su aplicación es en ladrillos y en hornos.
- Abrasivos: Utilizados como lijas, para cortes y pulidos.
- Cementos: Como compuestos y estructurales.
- Cerámicas avanzadas: Son utilizados en máquinas en rotores, válvulas, bearings y sensores.

### **Materiales poliméricos.**

Los materiales poliméricos o también denominados polímeros, están compuestos por moléculas de gran tamaño que se forman mediante el proceso de polimerización de monómeros, en el cual se forman largas cadenas moleculares químicamente basadas en carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos. Su estructura molecular no es cristalina, pero en algunos casos su estructura se organiza por secciones cristalinas y semicristalinas.

Se caracterizan por tener baja densidad, sus propiedades mecánicas son opuestas a las de los metales y cerámicos, no son tan rígidos o resistentes; más al tomar en cuenta su baja densidad, su rigidez y resistencia si es comparable a los metales y cerámicos. Algunos polímeros son extremadamente dúctiles y flexibles, lo que permite su aplicación en formas complejas. Son generalmente inertes ante reacciones químicas y a ambientes hostiles. Una de sus desventajas es su baja resistencia a temperaturas elevadas, lo cual limita su uso. Tienen baja conductividad eléctrica y no son magnéticos.

En la industria, la clasificación de los polímeros sintéticos se realiza con base en su aplicación específica, sus propiedades y sus costos de producción, resultando en tres categorías (Garduño, 2017):

- Comerciales (commodity): Son polímeros ligeros, resistentes a la corrosión, rígidos y susceptibles a elevadas temperaturas. Son económicos y se pueden producir en formas variadas. Destacan el Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Cloruro de Polivinilo (PVC), el Tereftalato de Polietileno (PET), el Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y el Polietileno de Baja Densidad (LDPE).
- De Ingeniería: Están diseñados para tener temperaturas de servicio, con mayor resistencia química y mecánica que los polímeros comerciales. Son producidos en pequeñas cantidades y se elaboran con fines específicos. Los más comunes son: Policarbonato (PC), Polioximetileno (POM), Acrilonitrilo Estireno Acrilato (ASA).
- De Alto Rendimiento: Poseen propiedades mecánicas superiores a los anteriores. De costo muy elevado y con aplicaciones muy específicas, principalmente en la industria aeroespacial y militar. Algunos son: Polieterimida (PEI), Poliimida (PI), Polieteretercetona (PEEK).

Se debe hacer mención que además existen materiales poliméricos biológicos, ya que por definición estos igualmente se componen de macromoléculas, las cuales son sintetizadas por seres vivos. A estos materiales se les denomina biopolímeros, teniendo ejemplos como la celulosa y el rayón.

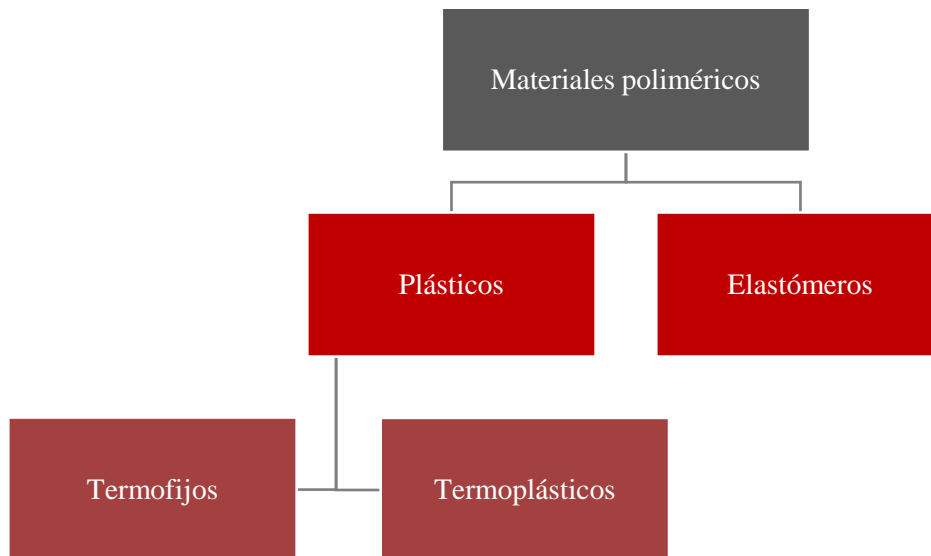
Los materiales por utilizar en el proyecto son clasificados como materiales poliméricos (cartón, fibras de carbono y resina epóxica), por lo que se profundizarán en el documento las características y la clasificación de los polímeros, para determinar las propiedades específicas y aplicaciones de los materiales a implementar en la investigación.

### ***Clasificación de polímeros.***

En la Ingeniería de los materiales, los polímeros se clasifican, con base en sus propiedades mecánicas y estructura molecular, en plásticos y elastómeros, Figura 4. Los plásticos son polímeros que presentan una estructura física sólida y rígida, mientras que los elastómeros son materiales con la capacidad de sufrir grandes deformaciones y de recuperar elásticamente su forma original (poseen entrecruzamientos muy fuertes en sus cadenas); teniendo por ejemplo a los cauchos naturales y a los cauchos sintéticos. El comportamiento mecánico de un material polimérico depende intrínsecamente de la temperatura; a temperaturas elevadas su respuesta corresponde a su estructura molecular dominante. Los materiales plásticos según su comportamiento ante el aumento de la temperatura se subclasifican en dos categorías:



- Termoplásticos: Son aquellos que al calentarse se ablandan hasta que finalmente se licuan y posteriormente, al enfriarse se endurecen. Es un proceso reversible y repetible en teoría, más en la práctica esto se ve afectado por las impurezas y la imperfección del proceso. Los más comunes son el PET y el Poliestireno.
- Termofijos: Se endurecen de forma permanente después de su formación y no se ablandan con el calentamiento. Son más duros que los termoplásticos y presentan una mejor estabilidad dimensional (capacidad de resistir cambios de temperatura y humedad sin perder su forma). Si un polímero termofijo sobrepasa su punto de fusión o de transición vítrea, se produce el rompimiento de los enlaces de sus cadenas y pasa al proceso de descomposición.



*Figura 4. Clasificación de los polímeros, según sus propiedades y comportamiento ante el aumento de temperatura.*

Los materiales poliméricos, a nivel molecular (estructura a largo alcance), pueden presentar diferentes tipos de entrecruzamiento en sus cadenas estructurales, clasificándose en los siguientes grupos (Garduño, 2017)

- Lineales: Las unidades monoméricas forman largas cadenas sencillas y flexibles.
- Ramificados: La cadena principal se enlaza lateralmente con otras cadenas, resultando en un polímero con menor densidad.

- Entrecruzados: Las cadenas lineales se encuentran unidas entre sí mediante enlaces covalentes; esto se realiza por medio de procesos químicos irreversibles.
- Reticulados: Se forman cuando los monómeros dan lugar a dos o tres enlaces activos, formando redes tridimensionales.

### **Materiales compuestos en Arquitectura.**

Dentro de la clasificación de los materiales algunos autores consideran a los materiales compuestos como una rama de estudio, debido a las propiedades que estos adquieren al ser conformados y al exponencial crecimiento en el desarrollo y aplicación de estos. En el Capítulo 4 se profundizará en el análisis de las características y las propiedades de los diversos tipos de materiales compuestos; en este capítulo se hace una breve mención de estos para ubicarlos en la clasificación general de los materiales.

Los materiales compuestos se obtienen al unir dos o más materiales. Su objetivo principal es lograr una combinación de propiedades que no posee un material aislado e incorporar las mejores características de los materiales que lo componen. Comúnmente están formados por dos fases: la matriz (fase continua) y la fase dispersa (refuerzo). En la Figura 5 se muestra una clasificación general de los materiales compuestos.

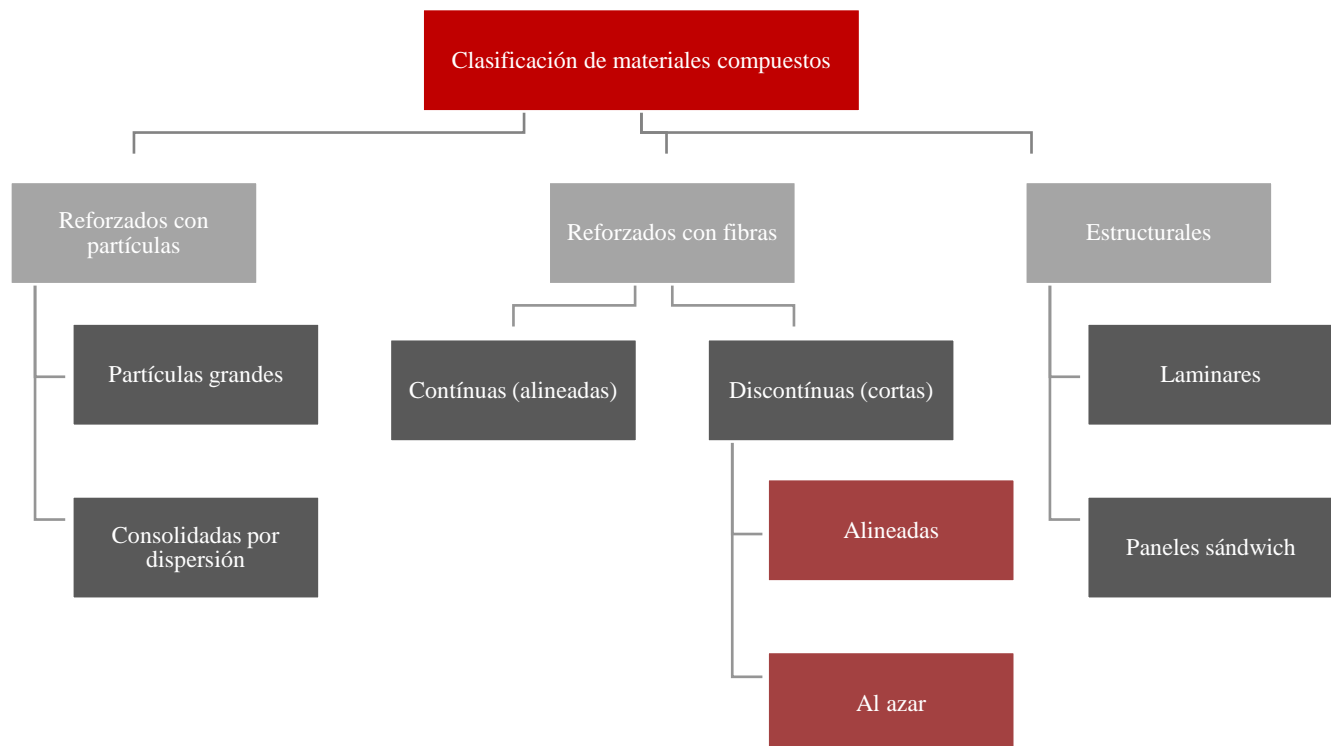


Figura 5. Diagrama de clasificación de materiales compuestos.

Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades particulares de cada material, la cantidad proporcional de estos, la geometría estructural y la compatibilidad entre las fases. Estos factores condicionan el comportamiento estructural y mecánico del material.

La matriz o fase continua, es aquella en la que el refuerzo queda incrustado. Su principal función es transmitir los esfuerzos hasta el refuerzo, además de brindar protección y cohesión al mismo. La matriz mantiene al refuerzo unido, ordenado, alineado y da el acabado superficial del material.

La fase dispersa o refuerzo, es aquella que se agrega a la matriz para otorgarle propiedades que no posee. Principalmente los refuerzos se agregan para incrementar la resistencia a esfuerzos de tensión, mejorar el comportamiento ante temperaturas elevadas y ante la corrosión. El refuerzo es agregado en forma de partículas o fibras. Existen variables que determinarán las características generales de un refuerzo en un material compuesto (Garduño, 2017), estas son:

- Concentración del refuerzo.
- Tamaño del refuerzo.
- Forma del refuerzo.
- Distribución del refuerzo.
- Orientación del refuerzo.

Como se menciona previamente, los materiales por utilizar en el proyecto son clasificados como polímeros. Dentro de cada clase de materiales (metálicos, cerámicos y poliméricos), según la geometría de su estructura, pueden ser subclasificados en la forma que se presentan, ya sean partículas o fibras. Tanto el cartón como las fibras de carbono son materiales compuestos por fibras, por la morfología de sus microelementos; debido a esto se hace mención de la subclasificación en el documento de los materiales fibroso, para determinar sus características y su comportamiento a esfuerzos mecánicos.

### **Materiales fibrosos.**

Una fibra se define como un elemento que posee una longitud elevada en relación con su dimensión transversal máxima. Las fibras se caracterizan por su alta flexibilidad y finura. Se utilizan comúnmente como refuerzos en materiales compuestos. Actualmente, muchas investigaciones en Ingeniería de materiales se enfocan en el estudio de los tipos de fibras, las propiedades de los tejidos y de las estructuras de las fibras (Donaldson, Torit DCE., 2017).

Frecuentemente, el desarrollo de los materiales de Ingeniería más resistentes involucra a las fibras. Esta área de investigación analiza los tipos y las propiedades del tejido de las fibras y su estructura, para poder aplicarlas como refuerzos, principalmente en el campo de la Ingeniería Civil.

Una característica de los materiales fibrosos es su capacidad por atrapar el aire, lo cual reduce la transmisión de calor por convección, por esto son ideales como aislantes térmicos; igualmente al ser estructuras porosas, ofrecen una buena absorción acústica por lo que también se utilizan como aislantes acústicos. Los materiales fibrosos comúnmente son flexibles, pero en la industria a veces son rigidizados al agregarles aditivos para darles una forma deseada (Fibrenamics, 2017).

A mediados del siglo XX el uso primordial de los fibrosos era para la manufactura de ropa y para objetos de uso doméstico. A finales del siglo, las fibras de alto rendimiento fueron desarrolladas en telas y aplicadas como refuerzos de materiales compuestos. Hoy en día, las fibras sintéticas son las más utilizadas debido a su rigidez y dureza.

La producción cotidiana de los materiales fibrosos es en hilos (filamentos) debido a que un multifilamento, es decir que está compuesto por varias fibras, es más flexible que un monofilamento sólido del mismo diámetro. El tejido es otra forma de producir estos materiales, el cual implica el entrelazamiento de los hilados en diversas direcciones.

Según su origen, generalmente las fibras se clasifican en dos grupos:

- Fibras naturales: Comprenden las fibras de origen vegetal y animal, en algunos casos de origen mineral.
- Fibras artificiales-sintéticas: Son obtenidas de materiales naturales a los cuales se les ha realizado un proceso químico.

Las fibras naturales, se caracterizan por tener largas cadenas moleculares y pueden poseer un alto o bajo grado de orientación molecular. Cuando tienen un alto grado de orientación molecular, es decir, cuando sus moléculas están longitudinalmente alineadas en un orden casi paralelo, poseen características de alta resistencia a esfuerzos de tensión, baja elongación, resistencia al calor y resistencia química. Cuando las fibras tienen un bajo grado de orientación molecular (orientación amorfa), tienden a tener capacidades de mayor flexibilidad y suavidad. Otra característica importante es la continuidad de la fibra; una fibra continua (longitud ilimitada) por lo general es producida de manera sintética, mientras que la mayoría de las fibras naturales se caracterizan por ser discontinuas (cortas).

### *Materiales compuestos fibrosos – Fibras de vidrio, fibras de aramida y fibras de carbono.*

Una vez determinados los materiales compuestos y los materiales fibrosos por separado, se observa que el uso de los fibrosos en aplicaciones estructurales se realiza de manera conjunta a un material matriz, formando un material compuesto, con el fin de obtener las mejores características de ambos materiales. Existen tres materiales compuestos reforzados por fibras que son ampliamente implementados en las industrias: las fibras de vidrio, las fibras de aramida y las fibras de carbono. A continuación, se detalla una explicación de estos materiales (Garduño, 2017):

- Fibras de vidrio: Se conforman por silicatos ( $\text{SiO}_2$ ) no cristalinos, los cuales poseen óxidos. Estas fibras son trefiladas en filamentos entrelazados con dimensiones de 3 a 20  $\mu\text{m}$ , formando una malla. Comercialmente son conocidas como vidrio E, S, C, M, A y D. En la Arquitectura se utilizan en paneles como refuerzos estructurales para puentes, como los sistemas de tableros DuraSpan y Super Deck.
- Fibras de aramida: Son conocidas por su nombre comercial, Kevlar. Son utilizadas como refuerzo agregado en mezclas de concretos, en barras o tiras. Las aramiditas están compuestas molecularmente por grupos amida y anillos aromáticos, lo que les confiere estabilidad térmica. La repetición del grupo aromático en su estructura molecular les otorga gran rigidez a las cadenas poliméricas. Estas fibras actúan en conjunto y exhiben una elevada resistencia a cargas de tensión en el eje longitudinal.
- Fibras de carbono: Son fibras de alto rendimiento con diámetros que van de 4 a 10  $\mu\text{m}$ , pueden ser fabricadas a partir de tres tipos de materiales base: el rayón, el alquitrán y el poliacrilonitrilo (PAN); mediante un proceso de carbonización, donde se le agrega un catalizador. Posteriormente las hebras son entrelazadas para formar mallas. Dependiendo de la técnica de procesamiento y del material precursor, se obtienen diferentes propiedades. Comercialmente los tipos de fibras de carbono más comunes se identifican por los siguientes códigos<sup>7</sup>:
  - HS (High Strength) – De alta resistencia
  - HM (High Modulus) – De alto módulo de elasticidad
  - UHM (Ultra High Modulus) – De ultra alto módulo de elasticidad

En la industria de la Construcción, las fibras de carbono se utilizan principalmente para la rehabilitación: reparación, reforzamiento y adaptación sísmica de elementos estructurales con deficiencias, causadas por

---

<sup>7</sup> Actualmente, existen numerosos tipos de fibras de carbono, según su precursor y sus propiedades específicas. En el capítulo de fibras de carbono, se detalla esta clasificación. Las fibras de carbono HS, HM y UHM son los tipos más comercializados a nivel mundial.

la larga edad de la edificación, la mala calidad o un cambio de distribución de cargas. La malla de fibras es aplicada en forma de hoja o tiras, adherida mediante una resina epóxica, la cual transmite los esfuerzos de cortante y/o flexión entre el concreto y el refuerzo. Los refuerzos más utilizados son a flexión, por confinamiento y a cortante. Entre los productos y aplicaciones más utilizados a base de fibras de carbono, están:

- Composite Shell System (CSS). Es utilizado para la construcción de puentes. Consiste en tubos conformados por fibras de carbono con resinas epóxicas, rellenas con concreto; son utilizadas horizontalmente para apoyar tableros.
- En forma de barras que conforman redes o mallas que reemplazan el armado de varillas de acero, en elementos prefabricados.
- Sika CarboDur: Son láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono, fabricadas mediante un proceso de pultrusión, diseñadas para reforzamiento de estructuras de concreto, madera y mampostería.
- Sika Wrap-601C (tejido de fibras de carbono de muy alta resistencia).
- Fibras de carbono comerciales de la marca Zoltek.

Una vez conociendo la clasificación de los materiales del proyecto de investigación, compuestos fibrosos, en los siguientes capítulos se desarrollará el tema a detalle de cada material. El objetivo de estos próximos capítulos es hacer mención de sus orígenes, sus características, sus métodos de producción actuales, sus diversos tipos, y sus propiedades generales físicas y mecánicas; para poder hacer la selección específica fundamentando su elección con base en sus propiedades mecánicas y a su accesibilidad en el mercado comercial.

## Capítulo II: El cartón

El cartón es uno de los materiales más utilizados desde el siglo XX, el uso de este ha ido en aumento durante las últimas décadas. Es consumido en todos los países y producido en varias partes del mundo. Tiene numerosas aplicaciones junto al papel como el papel periódico, los libros, tejidos, papel fotográfico, billetes, impresiones, mobiliario, revestimientos, entre otras; siendo el principal uso del cartón la industria del embalaje. Para el año 2000 el papel y el cartón utilizados para embalaje era alrededor del 47% de la producción total de estos (Kirwan, Paper and Paperboard Packaging Technology, 2005). En la Tabla 1 se observa el crecimiento constante de la producción de papel y cartón a nivel mundial.

Producción mundial de papel y cartón	
Año	Millones de toneladas
1980	171
1990	238
2000	324
2001	318
2002	339
2005	367
2006	382
2007	394
2008	391
2009	371
2010	394
2015	407

*Tabla 1. Producción mundial de papel y cartón (Kirwan, Paper and Paperboard Packaging Technology, 2005).*

A finales del siglo XIX el uso del papel y el cartón como embalaje se aceleró notablemente, principalmente para satisfacer las necesidades del desarrollo de la industria manufacturera. Su elaboración ha progresado desde un laborioso proceso manual que consistía en crear una hoja a la vez, a un proceso continuo de alta velocidad con pulpa de celulosa, reemplazando a los tramos de tela como

materia prima. Actualmente, el uso de estos materiales como empaques se encuentra en diferentes lugares, como supermercados, tiendas departamentales, el correo, la comida rápida, máquinas dispensadoras, farmacias, etc. Muchas de las ventajas y características del papel y el cartón utilizados para embalaje, son similares en otras áreas, como sería su aplicación en Arquitectura. Entre estas características se encuentran la materia prima, los procesos de manufactura, el aspecto ambiental y los procesos de manejo de desechos.

Hoy en día, existen fábricas en más de 100 países alrededor del mundo, con más de 3.5 millones de personas empleadas directamente. Los mayores productores de papel-cartón son Estados Unidos, Canadá, Japón, China, Finlandia, Suecia, Alemania, Brasil y Francia. Tras el auge de la era electrónica, se predijo una disminución del consumo del papel y cartón, pero desde 1980 se observa un constante crecimiento en la tasa de 2.5% de producción anual de estos materiales (Teschke & Demers, 2001).

A partir de la mitad del siglo XIX, la materia prima esencial de la pulpa de celulosa fue la madera, principalmente la madera proveniente de los bosques de coníferas, aunque en los últimos años ha aumentado el uso de maderas provenientes de bosques tropicales y boreales. Es importante mencionar cómo ha evolucionado la materia prima de extracción y los tipos de procesamiento que conllevan ya que de esto dependerán las propiedades del producto final.

### **Origen del cartón**

Los primeros registros indican que el papel como lo conocemos actualmente fue creado en el año 105 D.C., en la ciudad de Lei-Yang, China. El proceso de manufactura fue inventado por Ts'ai Lun, un oficial de la corte de Ho Ti, emperador de Catay (Hanlon, 1998). Al principio se utilizaban trapos, cáñamo, paja y hierba como materias primas y se golpeaban contra morteros de piedra para separar las fibras.

En el año 751, musulmanes capturaron una fábrica productora de papel china en Samarcanda y obligaron a los trabajadores a revelar el proceso de manufactura. Posteriormente los musulmanes llevaron este conocimiento a España en el año 950. En 1450 comenzó la publicación de libros de papel y su uso en periódicos fue hasta 1609, para esa época el papel se había convertido en una industria de alta importancia en Europa (Hanlon, 1998).

En 1690 William Rittenhouse creó la primera fábrica de papel en el continente americano, para los bancos Wissahickon Creek en Filadelfia. Cabe recalcar que hasta entonces los métodos de producción eran de una hoja a la vez (Hanlon, 1998).



Fue en 1799 cuando el francés Nicholas-Louis Robert desarrolló un proceso continuo de manufactura a través de maquinaria. La máquina utilizada fue patentada en Inglaterra por los hermanos Fourdrinier. Posteriormente en 1817, cerca de la ciudad de Filadelfia, John Dickenson inventó una máquina de tipo cilíndrico, precursora de las utilizadas actualmente (Hanlon, 1998).

A mediados del siglo XIX se desarrollaron los primeros métodos para la obtención de pulpa de celulosa de madera, una fuente de fibra más abundante que los trapos o las hierbas; estos implicaban la abrasión mecánica y la aplicación de agentes químicos a base de sosa cáustica, sulfitos y sulfatos. A partir de estos métodos se inició la era moderna de la fabricación del papel (Teschke & Demers, 2001).

Hoy en día, EUA lidera la producción y uso del papel y cartón per cápita, con un consumo de 317.5 Kg al año. Existen alrededor de 5,000 plantas en EUA que involucran la manufactura del papel y cartón. Más del 66 por ciento de la materia prima utilizada es de pulpa de celulosa de madera, proveniente de troncos, ramas y astillas; y alrededor del 33 por ciento es material de desecho proveniente de diversas fuentes (Hanlon, 1998). Otros materiales utilizados, principalmente de manera doméstica son paja, cáñamo, algodón y lino.

### **Definición – composición**

El cartón se define como un conjunto de capas comprimidas, compuestas por redes de fibras de celulosa, que se entrelazan formando un único material compactado. Puede ser imprimible y dadas sus propiedades físicas puede ser fabricado para poseer diversos tipos de rigidez (Kirwan, 2013). Existen diferentes tipos de cartón. Las características de apariencia, resistencia, entre otras, pueden ser variadas dependiendo de la cantidad de fibras utilizadas, del proceso de separación de fibras para obtener la pulpa (pulpado) los tratamientos a las fibras y del método de manufactura para obtener las hojas o láminas de cartón.

Otras características que definen al cartón son su peso por unidad de área y el espesor de las láminas. La industria del cartón ha definido términos específicos para describir sus características y propiedades. El gramaje es el término utilizado para describir el peso de estos materiales por una unidad de área, medido en gramos por metro cuadrado ( $\text{g/m}^2$ ). El espesor, también denominado como calibre, es medido en micras ( $\mu\text{m}$ ), 0.001 mm o 0.001 in. (thou). La apariencia de estos materiales se define por el color y las características de su superficie, si es liso o áspero, y si tiene un terminado brillante, satinado o mate (Kirwan, 2005).

Técnicamente, la definición del cartón es variada. Según las normas ISO (International Organization for Standardization), un papel con un gramaje superior a los 200 g/m<sup>2</sup> se denomina cartón, sin embargo, según la definición de la CEPI (Confederation of European Paper Industries), el papel es usualmente llamado cartón cuando supera los 220 g/m<sup>2</sup>. De igual manera, algunos productos son conocidos como cartón, aunque sean manufacturados en gramajes más bajos; por ejemplo, muchos productores y comerciantes clasifican productos de 180-190 g/m<sup>2</sup> como cartones, debido a que los procesos de manufactura han permitido la creación de materiales más ligeros con similar resistencia mecánica a los cartones tradicionales (Iggesund Paperboard, 2017).

El cartón puede ser fabricado en una sola capa o, como es usual, en varias capas (multicapa). Por cuestiones de calidad usualmente se requiere una combinación de varias láminas de fibras cuando están húmedas (Proceso realizado en la Zona Húmeda). Existen dos rasgos básicos para distinguir al cartón del papel (Iggesund Paperboard, 2017):

- El cartón contiene una mayor proporción de fibras largas que el papel.
- El cartón comúnmente no contiene aditivos de relleno.

Según la compañía multinacional Iggesund<sup>8</sup>, el cartón se define como un producto de papel pesado constituido por multicapas. Las ventajas de la composición multicapa reside en la habilidad de optimizar las propiedades de las fibras en cada capa, para conseguir cierta funcionalidad. Esto se logra al variar la composición de cada capa. Los aspectos más importantes son:

- Proporción de fibras largas y fibras cortas en las capas.
- Tipo de proceso para la separación de fibras para obtener la pulpa (pulpado).
- Tratamientos de la pulpa para mejorar su resistencia o calidad y distribución de las fibras ante esfuerzos de rompimiento en su estructura.

Para lograr utilizar las características de optimización del cartón de manera estructural, es necesario que el material esté compuesto por al menos tres capas. La disposición de la capa intermedia permite modificar las características superficiales de las capas exteriores sin perder rigidez en el elemento. Las variables que considerar para el uso de cartones multicapa en comparación con cartones de una o dos capas, en la industria del embalaje, son:

---

<sup>8</sup> La compañía Iggesund Paperboard es una compañía multinacional, con sede en Suecia, parte de Holmen Group. Produce las marcas internacionales de papel Invercote e Incada. Es una de las compañías más grandes en la fabricación e investigación sobre el papel a nivel mundial.

- Grosor.
- Resistencia mecánica.
- Rigidez tanto en capas internas como externas.
- Lisura de la superficie en acabado en combinación con buena resistencia y rigidez.
- Características funcionales específicas en cada capa, como resistencia a la humedad.

La modificación de estos parámetros ha resultado en la comercialización de una amplia variedad de productos, cada uno con diversas propiedades requeridas para usos específicos.

### **La estructura de la madera – tipos de fibras**

La fotosíntesis es el proceso en el cual las plantas con clorofila transforman la energía lumínica del Sol en energía química, es decir, utilizan la energía lumínica para formar compuestos orgánicos y oxígeno a partir de dióxido de carbono y agua. En este proceso el dióxido de carbono y el agua son convertidos en azúcares simples de glucosa. Estos azúcares son polimerizados en las plantas para producir la celulosa.

La celulosa se caracteriza por poseer un alto peso molecular y una estructura molecular de cadena lineal. Las plantas utilizan la celulosa para crecer al construir células –a las que denominamos fibra– y otras estructuras que sustentan la vida de la planta. Estas fibras están dispuestas de manera paralela a lo largo del tronco del árbol. Cada especie de planta posee una estructura de fibra particular. Actualmente, se cultivan diferentes especies de árboles en procesos de fuentes renovables, para la obtención de las materias primas –maderas–, y así poder producir una amplia gama de productos de cartón. La celulosa  $[(C_6H_{10}O_5)_n]$  compone casi el 50% de la madera. La celulosa es clasificada como un biopolímero; es un polisacárido con 600 a 1.000 unidades de sacarosa, cuya estructura es cristalina (lo que le otorga buenas propiedades mecánicas de rigidez y resistencia mecánica). Las fibras de celulosa se mantienen unidas en un entramado mediante enlaces de hidrógeno.

En el proceso de manufactura del cartón, al ser separadas del resto de componentes no celulósicos, las fibras en estado puro se caracterizan por ser suaves, flexibles y de color blanco. Tienen propiedades de alta resistencia a esfuerzos de tensión, de absorber aditivos y de ser químicamente estables. Los componentes de la madera no celulósicos son las hemicelulosas, ligninas, extractos, minerales y otros compuestos inorgánicos (Teschke & Demers, 2001).

Las hemicelulosas comprenden aproximadamente el 20% de la composición de la madera. Son un grupo de sustancias similares a la celulosa, pero con menor peso molecular y una cadena estructural más compleja; las hemicelulosas se componen a partir de 15 a 90 unidades de sacarosa (Teschke & Demers, 2001).

Las ligninas abarcan casi de 30% de la madera, son materiales adhesivos ubicados entre las fibras. Son polímeros muy diferentes y más complejos que la celulosa, ya que son altamente polimerizadas. Se caracterizan por ser duras y frágiles. Fundamentalmente son monómeros de fenil-propano, los cuales actúan como aglutinantes de las fibras de celulosa. Su estructura estéreo-irregular y amorfa hacen que sean moléculas muy difíciles de degradar. Para la fabricación del cartón es necesario retirarla parcial o completamente (egresados.fcien.edu.uy, s.f.).

Entre los extractos se encuentran: grasas, ceras, alcoholes, fenoles, ácidos aromáticos, aceites esenciales, oleorresinas, esteroides, alcaloides y pigmentos colorantes. En la Tabla 2 se observa cómo varía la proporción relativa de los componentes, según la fuente de extracción (Teschke & Demers, 2001).

	Maderas blandas	Maderas duras	Paja	Bambú	Algodón
Carbohidratos					
Celulosa	38-46	38-49	28-42	26-43	80-85
Hemicelulosas	23-31	20-40	23-38	15-26	n.d.
Ligninas	22-34	16-30	12-21	20-32	n.d.
Extractos	1-5	2-8	1-2	0.2-5	n.d.
Minerales y otros compuestos inorgánicos	0.1-7	0.1-11	3-20	1-10	0.8-2

Tabla 2. Componentes químicos en porcentaje de las fuentes de pulpa de celulosa (Teschke & Demers, 2001).

La principal fuente de fibra para la obtención de pulpa de celulosa es la madera proveniente de coníferas y especies arbóreas de hoja caducifolia. Fuentes secundarias con la paja de trigo, el centeno, el arroz;

cañas (como el bagazo); los tallos leñosos del bambú, lino y cáñamo, y fibras de semillas, hojas y cortezas, como las del algodón, el henequén y el sisal. La mayor parte de la pulpa de celulosa se produce a partir de fibra virgen, aunque la producción de papel reciclado va en aumento recientemente (Teschke & Demers, 2001).

En el proceso de conversión de madera a cartón, ya sea por medios mecánicos o químicos, las fibras son separadas y reagrupadas para formar hojas o láminas con ciertas dimensiones y propiedades requeridas; todo esto con el fin de extraer la presencia de lignina.

El método utilizado para procesar la madera dependerá del tipo de madera (materia prima) y de la aplicación del material en un producto. Debido a que la madera es un material natural, existe una variación considerable en su composición. Las diferentes especies de árboles y las diversas condiciones de crecimiento de estos, producen una amplia variedad de estructuras fibrosas. Según su dureza los tipos de maderas se pueden clasificar en dos:

- Maderas suaves: Término utilizado para designar a las maderas provenientes de coníferas, son más ligeras y económicas que las maderas duras.
- Maderas duras: Se refieren a los árboles caducifolios, los cuales se caracterizan por perder su follaje en otoño, comúnmente son de crecimiento lento.

El punto inicial de partida para la fabricación del papel – cartón es la longitud de la fibra. Las fibras derivadas de maderas duras tienen una longitud menor a 1 mm, mientras que las fibras de maderas suaves llegan a poseer una longitud de hasta 6.5 mm. Las fibras de maderas duras producen láminas con mayor finura y suavidad, pero no son tan fuertes como las producidas a partir de maderas suaves. El clima también es un factor importante en la estructura fibrosa de la madera, ya que las maderas suaves en climas fríos poseen fibras más cortas, similares a las fibras de maderas duras.

La longitud y forma de las fibras depende de la especie del árbol. En la Tabla 3 se especifican las dimensiones de las fibras de madera provenientes de los árboles más utilizados para la fabricación del cartón. En las Figuras 6, 7, 8 y 9 se observan las fibras en microscopio de las maderas mencionadas en la Tabla 3; se observa que la geometría de las fibras difiere según el tipo de madera de extracción, así como su longitud y anchura, lo que condiciona su comportamiento ante procesos físicos y esfuerzos mecánicos.

Especie de árbol	Longitud de fibras (mm)	Anchura de fibras ( $\mu\text{m}$ )	Forma
Picea	3.1 – 3.5	19 – 50	De listón plano
Pino	2.0 – 3.0	22 – 50	De listón plano
Abedul	0.9 – 1.2	20 – 35	Cilíndrica con extremos puntiagudos

Tabla 3. Dimensiones de las fibras de madera más utilizadas para la fabricación del cartón (Igggesund Paperboard, 2017).

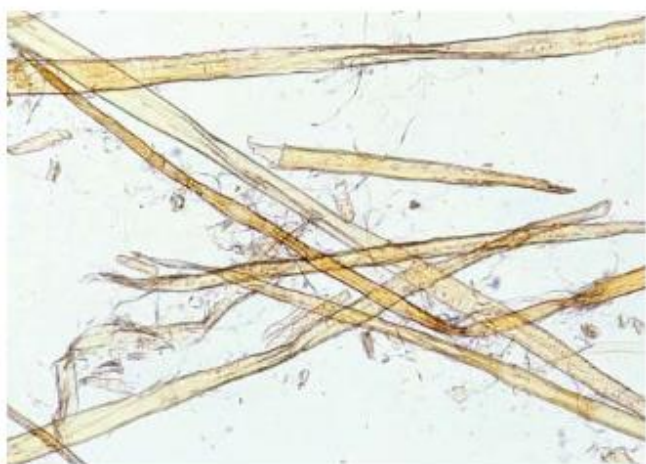


Figura 6. Fibras de madera de picea. Se caracterizan por ser largas y planas (Igggesund Paperboard, 2017).

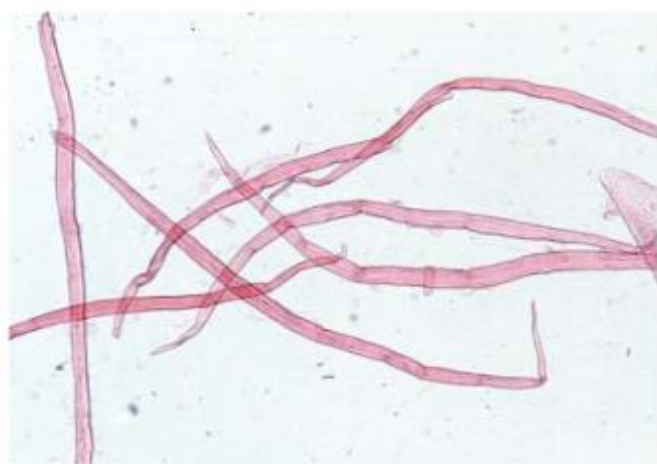


Figura 7. Fibras de madera de abedul. Se caracterizan por ser cortas y cilíndricas (Igggesund Paperboard, 2017).



Figura 8. Fibras de madera de pino. Se caracterizan por ser largas y planas (Igggesund Paperboard, 2017).

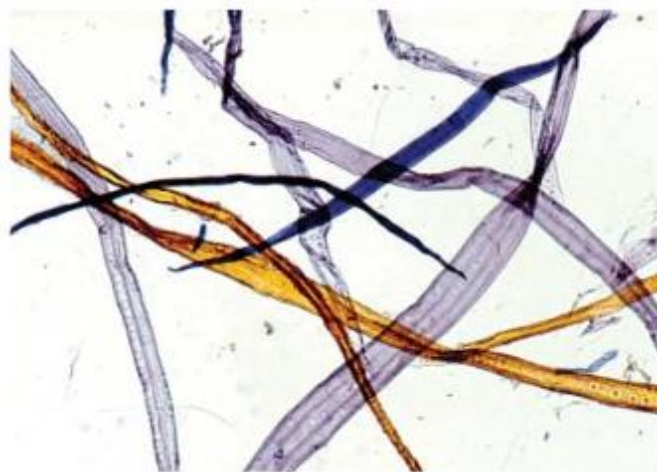


Figura 9. Fibras combinadas de madera de picea, abedul y pino (Igggesund Paperboard, 2017).

Existen características generales que todas las fibras de madera poseen en mayor o en menor grado, así como propiedades específicas según la especie de árbol utilizado. Igualmente, las características de las fibras también son influenciadas por el método de pulpado empleado. Las propiedades generales de las fibras de madera son:

- La habilidad de las fibras para unirse entre sí, creando una estructura homogénea y fuerte, lo que otorga un buen comportamiento a esfuerzos a la compresión
- Flexibilidad, forma y propiedades dimensionales que permiten a las fibras constituir una red uniforme entrelazada.
- La capacidad de las fibras para ser modificadas mecánica o químicamente durante el proceso de producción.

Dentro de la industria manufacturera de la pulpa de celulosa, las fibras se clasifican en dos tipos: fibras largas (de 3 a 4 mm de longitud) y fibras cortas (de 1 a 1.5 mm de longitud). Comúnmente las fibras largas se derivan de maderas suaves y las fibras cortas de maderas duras. Ejemplo de fibras largas son las obtenidas de la madera de pino y de la picea, mientras que las fibras cortas pueden ser conseguidas de la madera de alerce.

Tanto el papel como el cartón pueden ser fabricados a partir de fibras recicladas, pero eso conlleva al problema de la resistencia, ya que las fibras recicladas son más débiles que las fibras vírgenes. La clasificación por valores del cartón debe ser con base en las propiedades de rigidez, resistencia y superficie; mientras que en el papel sólo se toma en cuenta el acabado de la superficie. Un ejemplo se da en la producción de cartón para empacar alimentos o bebidas, en la cual los fabricantes adicionan químicos para evitar que las fibras absorban grasas o líquidos.

### **El proceso de manufactura del cartón**

En la actualidad el proceso de fabricación de cartón es realizado en grandes instalaciones que se caracterizan por poseer una intensidad de capital elevada (cantidad de capital presente en los procesos de manufactura), grandes volúmenes de producción y el uso de las técnicas más innovadoras y eficientes para el tratamiento del material; en un proceso controlado y continuo.

Los bosques gestionados proveen la fuente primaria que es la fibra de celulosa, a partir de diversas maderas como el pino, la picea y el abedul. La fibra es obtenida por pulpado mecánico, químico o mixto; la blancura puede ser mejorada por el proceso de Blanqueo. El proceso en la máquina de cartón comienza

con la formación de una capa de fibras entrelazadas sobre una malla metálica o plástica en movimiento en la cual se remueve agua por escurrimiento. Posteriormente, múltiples capas son unidas en la Zona Húmeda (Wet End). En el proceso de presión y secado más agua es retirada. Según el tipo de instalaciones, el cartón es revestido dentro del mismo proceso o en maquinaria aparte, con el fin de mejorar la superficie de impresión y otorgarle propiedades de mayor resistencia mecánica. El cartón obtenido es enrollado en grandes carretes que son recortados en etapas subsecuentes para poder ser empaquetados y transportados.

### **Obtención de materia prima.**

La fibra virgen para el cartón es obtenida de especies naturales de árboles como el pino, la picea y el abedul. Estas especies son cultivadas a través de operaciones forestales gestionadas. Para mantener el desarrollo sostenible y la diversidad biológica, las operaciones forestales utilizan planes de protección de los ecosistemas. Se realiza la siembra de nuevos bosques para mantener el equilibrio del medio, además de que existen áreas protegidas que no pueden ser cosechadas por su riqueza biológica o por ser bosques relativamente antiguos.

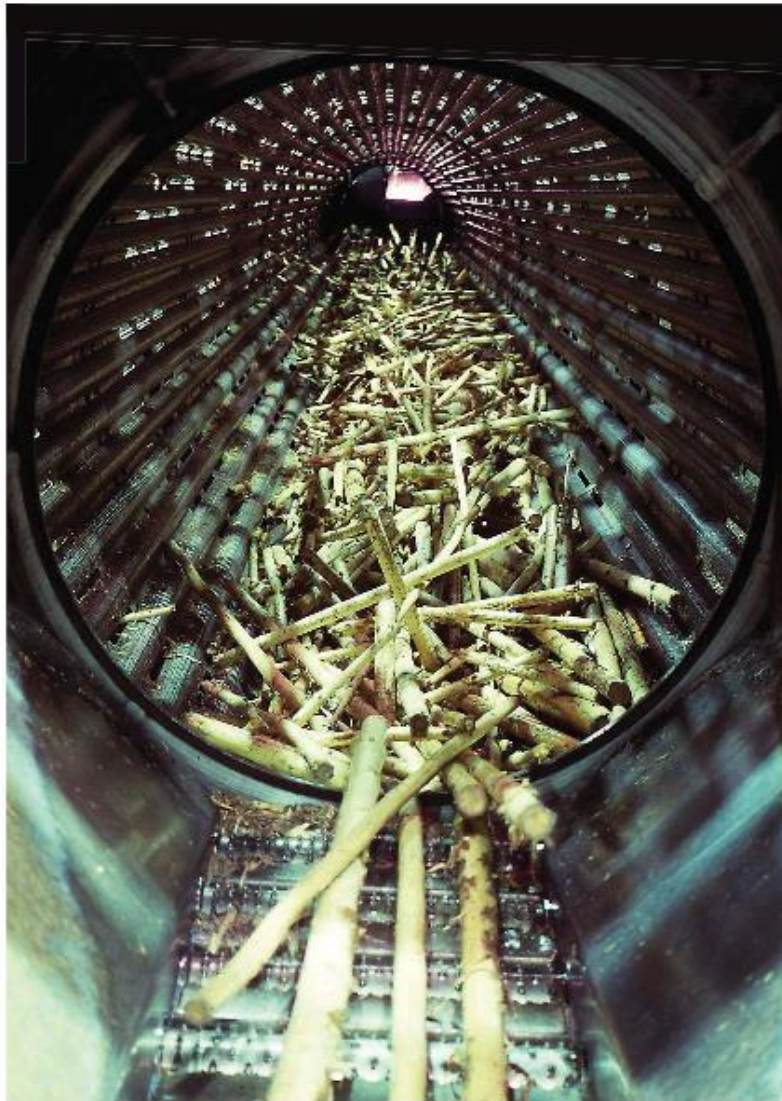
Cabe destacar que existe un criterio para la obtención de la madera, estos árboles son cultivados con el propósito de ser utilizados específicamente de manera industrial. Los árboles se cosechan hasta que alcanzan la madurez necesaria y se aprovechan todas sus partes para lograr un proceso sostenible (Iggesund Paperboard, 2017).

La madera de los árboles está compuesta básicamente de dos partes, la parte interna compuesta de fibra de celulosa y la parte externa de corteza. Después de haber seleccionado los árboles, son recortados manualmente o con maquinaria, retirando las ramas y parte de la corteza. Los árboles con mayor diámetro son destinados principalmente para la elaboración de muebles. Los troncos obtenidos son transportados a la fábrica donde se realiza la recepción y cubicaje de la madera; posteriormente se prepara la madera según las especificaciones de cada especie de árbol, limpieza y dimensiones de la fábrica. La madera es transformada en astillas para la preparación de la pulpa mediante una serie de pasos que son el descortezado, el aserrado, el astillado y el tamizado.

El primer paso es el descortezado, esta se puede realizar hidráulicamente, mediante chorros de agua a alta presión, o mecánicamente al ser introducidos en un tambor giratorio, Figura 8, que remueve la corteza por la fricción generada por el choque entre ellos. La corteza es retirada ya que posee pocas cantidades de fibra, es oscura y acarrea grandes cantidades de tierra, lo que puede reducir la calidad del



cartón si se mantiene en el proceso de elaboración de la pulpa. La corteza separada es utilizada dentro de la fábrica como biocombustible o se aprovecha como composta.



*Figura 8. Interior de tambor giratorio en funcionamiento con los troncos de madera, dónde se realiza el retiro de la corteza (Igggesund Paperboard, 2017).*

Los troncos ya descortezados son aserrados en segmentos más cortos de 1 a 6 metros. Después son introducidos a las astilladoras las cuales producen astillas de una amplia gama de tamaños; pero para la fabricación de la pulpa es necesario que las dimensiones de las fibras sean similares para mantener un flujo constante a través de los refinadores y un nivel de reacción uniforme en los digestores. Debido a esto las astillas se hacen pasar por una serie de cribas para clasificarlas por longitud y grosor; las astillas

demasiado grandes se vuelven a pasar por las astilladoras para ser refinadas nuevamente. Las fibras muy pequeñas se utilizan al igual que la corteza, como combustibles (Teschke & Demers, 2001).

### **Elaboración de la pasta – proceso de pulpado.**

En los árboles, las fibras de celulosa están unidas por un material duro y frágil conocido como lignina. La lignina es un polímero complejo que conforma alrededor del 30% de un árbol. El proceso de separación de las fibras de la madera se denomina pulpado (pulping). En este proceso ya sea por métodos mecánicos o químicos, las fibras son desprendidas entre sí, al disolver o romper los enlaces de la matriz de lignina. Del pulpado se obtiene como resultado una sustancia denominada pasta o pulpa de celulosa.

La pulpa se precisa como la masa fibrosa que resulta del proceso de pulpa, en el cual se rompen los enlaces de la estructura de la madera que mantienen las células unidas. Las pulpas químicas se pueden producir por medios alcalinos (como el proceso Kraft o el sulfato) o por medios ácidos (sulfito). La mayor parte de la pulpa es obtenida por el proceso al sulfato, seguida de los procesos mecánicos. Los procesos de elaboración de la pulpa difieren en el rendimiento y la calidad del producto. Los procesos químicos se caracterizan por la reutilización de los agentes químicos utilizados en la producción de la pulpa (Teschke & Demers, 2001). Cada proceso de pulpado (procesamiento) tendrá por consecuencia la modificación de las propiedades mecánicas de las láminas resultantes.

Se pueden clasificar cuatro tipos de procesos pulpado, de los cuales se obtienen diferentes tipos de pulpa: pulpado mecánico, pulpado químico, pulpado semi-químico y de pulpa disuelta. Además de un proceso extra que se refiere a las fibras recicladas.

### ***Pulpado mecánico.***

Aproximadamente un 10% del papel y cartón es producido por este medio. En el pulpado mecánico (MP) se aplican fuerzas mecánicas a los fragmentos de madera, ya sea por aplastamiento o por molienda, obteniendo una mezcla de madera molida (Hanlon, 1998). Consiste en presionar los troncos contra un cilindro de molienda mientras se esparce agua sobre la superficie para retirar el material molido. Este método es utilizado principalmente para procesar maderas suaves. En el pulpado mecánico todos los componentes de la madera como fibras, lignina y carbohidratos, son utilizados para crear la pulpa. La presencia de lignina en la superficie y entre las fibras forma una mezcla dura y rígida, con mayor estabilidad dimensional. La estabilidad dimensional de las fibras de celulosa se basa en el principio de que las fibras de celulosa se encuentran en equilibrio con la humedad del ambiente. Las fibras absorben la humedad cuando esta incrementa y viceversa. Esta propiedad de las fibras se ve reducida si las fibras se encuentran recubiertas de otras sustancias, en este caso, la lignina.

En la pulpa obtenida mecánicamente, el grado de entrelazamiento entre fibras es bajo. Igualmente, el cartón resultante de este proceso tiene mayor masa y menor densidad, es decir, un peso relativamente bajo por unidad de área en un cierto espesor. También posee mayor rigidez, mayor dureza y baja elasticidad. Una característica del cartón obtenido por este medio es que conserva el tono amarillento de la madera, debido a que está constituido exclusivamente de esa materia prima (Hanlon, 1998).

Una derivación del proceso mecánico es el proceso de pulpado termomecánico (TMP), en el cual los fragmentos de madera obtenidos de las astillas, llamados chips, son calentados previamente al pulpado mecánico. Cuando a este proceso se le adiciona algún tratamiento químico limitado, para remover parte de la lignina, se denomina pulpa química-termomecánica (CTMP). Una característica de esta pulpa es que su color es ligeramente más claro que el color de la pulpa mecánica.

### ***Pulpado químico.***

El pulpado químico mezcla los fragmentos de madera con calor y agentes químicos para separar las fibras, disolviendo los compuestos ajenos a las fibras de celulosa, como la lignina y los carbohidratos (Hanlon, 1998). Existen tres tipos de procesos químicos, clasificados según las sustancias químicas aplicadas:

- **Proceso de sosa:** Descubierta en Inglaterra en 1851, actualmente casi no es utilizado. En este proceso la sosa caustica (hidróxido de sodio) y la sosa Ash (carbonato de sodio), son utilizadas para disolver los componentes indeseables en la madera. Es el más utilizado para procesar maderas duras. Se caracteriza por la obtención de una pulpa de color marrón claro, con una textura relativamente lisa y una resistencia intermedia entre la pulpa obtenida mecánicamente y la pulpa del proceso Kraft.
- **Proceso al sulfato (Proceso Kraft):** Es el más utilizado hoy en día, debido a que por medio de este se pueden procesar casi todos los tipos de madera, tanto maderas suaves como maderas duras. Además, los agentes químicos usados pueden ser recuperados y reutilizados nuevamente. El proceso es similar al de la sosa caustica, reemplazando sólo el carbonato de sodio por sulfuro de sodio. Por este método se obtiene la pulpa más resistente para fabricar productos. La pulpa obtenida se caracteriza por ser de color marrón oscuro y con una textura más rugosa a la de la sosa. A veces la pulpa es blanqueada para producir papeles y cartones blancos.
- **Proceso de sulfito:** Consiste en un proceso de reacciones ácidas, a diferencia de los procesos Kraft y de soda, los cuales son basados en reacciones alcalinas. El agente químico aplicado está compuesto de una solución de bisulfito de calcio o bisulfito de magnesio y ácido sulfuroso. Se

pueden procesar maderas suaves y duras. La pulpa obtenida tiene un color marrón intermedio y su resistencia es casi tan alta como el de la pulpa Kraft. Alrededor del 1% del papel y cartón es producido mediante este proceso, especialmente para la elaboración de papeles finos.

***Pulpado semi-químico.***

Esta pulpa es producida por la combinación de procesos mecánicos y químicos. Primero se agregan los agentes químicos que pueden ser la sosa caustica o el sulfito de sodio para ablandar las fibras de la lignina y los carbohidratos, lo que permite que las fibras se enlacen mejor entre sí (Hanlon, 1998). Posteriormente se colocan los fragmentos en una máquina de molienda para obtener la pasta. La pasta se caracteriza por ser difícil de blanquear, cuando es expuesta a la luz solar se torna en un color amarillento.

Se utiliza principalmente para procesar maderas duras. Como resultado se obtiene una pulpa a bajo costo y con gran cantidad de lignina. Su aplicación primordial es en productos donde es necesario tener propiedades de resistencia y rigidez, y donde el color no es importante. A menudo es utilizada como capa intermedia en papeles multicapa.

***Pulpa disuelta (dissolving).***

Son pulpas producidas químicamente para la producción de productos como el rayón, el celofán y el acetato de celulosa. Estas pulpas pueden ser generadas a partir de un proceso Kraft modificado o un proceso de sulfito en el cual se obtiene una pasta de celulosa pura; el objetivo de este proceso es la total remoción de la lignina y de los carbohidratos (hemicelulosas). El rendimiento de obtención de la fibra es el más bajo, siendo sólo el 35% de la materia prima original. En la Tabla 4 se observan la cantidad de fibras obtenidas por los diferentes procesos del pulpado.<sup>9</sup>

Tipo de pulpa (proceso de pulpado)	Porcentaje de pulpa producida por el proceso
Mecánico	10%
Químico	
Sosa caustica	1%
Sulfato	79%
Blanqueado	45%
No blanqueado	32%
Sulfito	2%

<sup>9</sup> La importancia del proceso de pulpado (pulping), radica en que modifica las propiedades de las fibras de celulosa, lo que condicionará el comportamiento mecánico del cartón.

Semi-químico	6%
Pulpa disuelta (dissolving)	1%

*Tabla 4. Porcentaje de papel-cartón producido según el proceso de pulpado (Hanlon, 1998).*

### ***Fibras recicladas.***

El uso de las fibras recicladas se considera como un método adicional para la obtención de la pulpa. En el proceso se utiliza como materia prima una amplia variedad de papeles y cartones de desecho. Es importante destacar que cada vez que las fibras son recicladas, están relativamente contaminadas por otros agentes, lo que reduce su capacidad de entrelazamiento. Debido a esto, para la fabricación del producto final, es necesaria la adición de fibras vírgenes para mantener cierto nivel de calidad.

En el proceso de reciclado, la pulpa es minuciosamente purificada y filtrada para el proceso de guardado. Los fragmentos restantes como plásticos y metales se separan utilizando detritus (descomposición de una masa sólida en partículas) sedimentados, ciclones o centrifugación. Las sustancias de relleno y resinas se eliminan en la fase de lavado por corriente de aire a través de los lodos de la pasta o por agentes floculantes (sustancias químicas que aglutinan sólidos en suspensión). Posteriormente la pulpa es desteñida empleando una serie de lavados que incluyen en ocasiones agentes químicos como detergentes (Teschke & Demers, 2001). Esta pulpa se caracteriza por poseer una coloración gris, debido a los residuos que permanecen por las tintas o adhesivos anteriores. El producto resultante posee una composición menos predecible que la pulpa obtenida por fibras vírgenes, además de propiedades con menor capacidad de resistencia.

### **Proceso de Blanqueo.**

Todas las variedades de pulpa utilizada en la manufactura de cartón pueden ser blanqueadas para mejorar la apariencia y obtener un material de mayor calidad. La pulpa obtenida del pulpado es de color marrón; el tono depende del proceso de calentamiento y de la cantidad de lignina todavía presente. La pulpa que no es blanqueada puede ser utilizada para objetos como cajas de cartón corrugado.

El proceso para el aumento de blancura de la pulpa es llamado Blanqueamiento o Blanqueo, a través del cual se puede modificar factores como el aspecto y consistencia de las fibras. En este proceso se puede sólo modificar el color de la pulpa o también se pueden introducir químicos que mejoren las propiedades de las fibras; así como retirar lignina restante de los procesos previos. En la Figura 9 se puede observar

diferentes grados de blanqueo de la pulpa de celulosa. Los métodos de blanqueo se pueden clasificar en tres categorías:

- Blanqueo por deslignificación usando gas de cloro. En los últimos años se ha introducido el uso de oxígeno para sustituir al gas de cloro.
- Blanqueo por oxidación utilizando materiales como el dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno o hipoclorito de sodio.
- Blanqueo por reducción utilizando materiales como bisulfito de sodio.



*Figura 9. Ejemplo de grados de blanqueo de pulpa de celulosa (Iggesund Paperboard, 2017).*

A pesar de que el gas de cloro y el dióxido de cloro son procesos muy eficaces en el blanqueo de las fibras, se ha llevado a la sustitución gradual de estos elementos por el impacto ambiental negativo que producen. La pasta blanqueada sin sustancias derivadas del cloro se denomina TCF (totalmente libre de cloro). En las pastas obtenidas por medios mecánicos, el blanqueo por peróxido de hidrógeno es el más común para la obtención de grados de blancura superior.

### **La transformación de la pulpa de celulosa en cartón.**

Los principios básicos para la manufactura de cartón a través de maquinaria son: preparar una solución diluida de fibras en agua, formar una lámina consistente por una red de fibras entrelazadas y, remover el agua progresivamente por drenaje, presión y evaporación. Para un fabricante de cartón, la selección de la pulpa depende de las propiedades que necesita mecánicamente y de superficie, para impresión, un acabado en particular o para embalaje. El uso de fibras largas y fuertes en las capas exteriores, y el uso de fibras más gruesas en el centro, es ideal para lograr un compuesto con propiedades de mayor resistencia mecánica y rigidez. La clasificación por valores del cartón debe ser con base en las propiedades de rigidez, resistencia y superficie; mientras que en el papel sólo se toma en cuenta el acabado de la superficie. Un ejemplo se da en la producción de cartón para empaquetar alimentos o líquidos, en la cual los fabricantes adicionan químicos para evitar que las fibras absorban grasas o líquidos. El proceso de transformación de la pulpa de celulosa en cartón comprende las siguientes siete etapas:

1. Proceso de almacenaje (Stock): Se recoge la pulpa de celulosa y se clasifica según sus características y posterior uso. Se pueden hacer tratamientos especiales a las fibras, como sumergirlas en agua para expandir su área superficial lo que incrementa su resistencia y habilidad de entrelazamiento; igualmente se pueden agregar aditivos para repeler el agua, para incrementar la resistencia de las fibras y para mejorar la superficie de brillo u otorgarles más blancura.
2. Extremo húmedo: Dentro de la maquinaria, la suspensión de pulpa de celulosa se extiende en una tela metálica o malla de plástico móvil, conocida como rejilla, en el área de la máquina denominado “El extremo húmedo” (The wet end), donde los operadores vigilan la velocidad de la cinta en movimiento y el contenido en agua. En el proceso de “El extremo húmedo”, el agua es filtrada a través de la cinta en movimiento, eliminando parte la humedad de las fibras (Teschke & Demers, 2001). En el proceso del cartón comúnmente se utilizan las máquinas multi-wire, para obtener las propiedades requeridas de superficie, resistencia y rigidez. El método ideal para la fabricación del cartón con una máquina multi-wire, es el combinar diferentes tipos de fibras químicas en las capas exteriores para lograr resistencia y el acabado deseado. Mientras que en las capas intermedias se utilizan las fibras obtenidas por procesos mecánicos, que son más gruesas (Iggesund Paperboard, 2017). En la Figura 10 se observa la sección de un cartón que posee múltiples capas de diferentes pulpas, para la obtención de las propiedades deseadas.



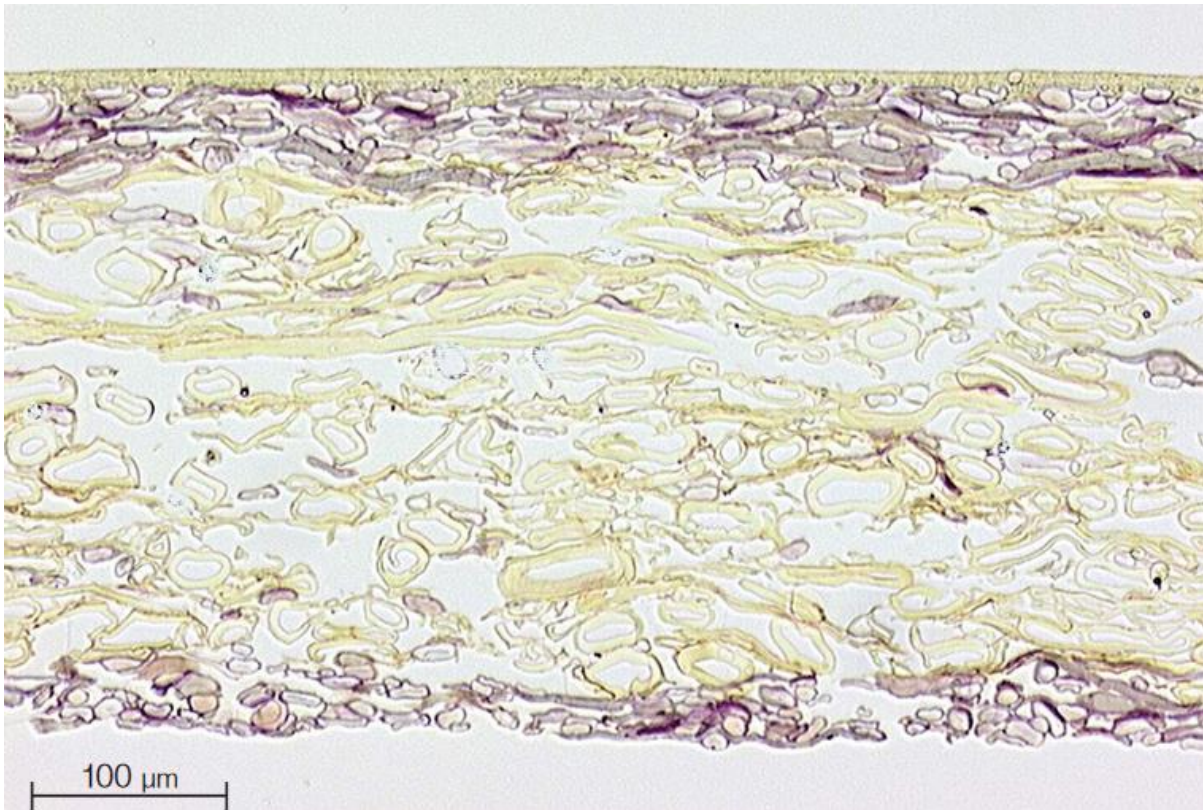


Figura 10. Sección de lámina de cartón. Se observan diferentes capas de diversas pulpas, con un revestimiento en la cara superior (Iggesund Paperboard, 2017).

3. Sección de prensas – Extremo seco: Al finalizar el extremo húmedo se obtiene una lámina continua de pulpa celulosa, esta lámina ya es lo suficientemente resistente para sostener su propio peso. La lámina es colocada sobre una tela absorbente que pasa a través de una serie de rodillos rotatorios (prensas) a una velocidad de 100 – 500 metros por minuto, los cuales escurren el agua y el aire hasta que la consistencia sea del 40 al 45% (Iggesund Paperboard, 2017).
4. Sección de secado (The drying section) – Extremo seco: En esta etapa las láminas se circulan a través de una serie de pisos de secadores de aire caliente (se ponen en contacto las láminas con cilindros llenos de vapor, la cantidad de cilindros depende de la cantidad de agua que es necesario evaporar) hasta que la consistencia sea del 90 a 95%. En esta etapa se han definido enteramente los enlaces de hidrógeno entre las fibras de celulosa.
5. Incorporación de aditivos para el mejoramiento de las propiedades físicas: Las láminas obtenidas de la pulpa de celulosa comprenden alrededor del 89% de la materia prima del cartón, existen además aditivos no fibrosos que son agregados al material. En la Tabla 5 se presentan los aditivos más utilizados para la industria del papel-cartón (Teschke & Demers, 2001).



**Aditivos utilizados para la manufactura de papel – cartón, (Teschke, y otros, 2001).**

Aditivos	Etapa en la que es aplicado	Finalidad y propiedades adquiridas, y/o tipos de aditivos
Talco	Extremo húmedo	Control de la mezcla extraíble (evita la deposición y acumulación de la mezcla extraíble) Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco)
Dióxido de titanio	Extremo húmedo	Pigmento (hoja brillante, mejora impresión) Apresto (confiere más brillantez, más alisado, más opaco)
Alumbre ( $Al_2(SO_4)_3$ )	Extremo húmedo	Precipita resina al encolar sobre las fibras Ayuda a la retención (fija aditivos a las fibras, mejora la retención de las fibras de la pasta)
Resina	Extremo húmedo	Encolado interno (resistencia a la penetración de líquidos)
Arcilla (caolín)	Extremo húmedo / seco	Apresto (confiere más brillantes, más alisado, más opaco) Pigmento o satinado de superficie (imparte color)
Almidón	Extremo húmedo / seco	Encolado interno (resistencia a la penetración de líquidos) Aditivo de resistencia por vía seca (aumenta la resistencia, reduce el polvo de la superficie) Ayuda a la retención (aditivos para encuadernación del papel, mejora la retención de la fibra de la pasta)

Tintes y pigmentos	Extremo húmedo / seco	Tintes ácidos, básicos o directos, lacas de color, CaCO <sub>3</sub> , puede incluir disolventes.
Látex	Extremo seco	Adhesivo (refuerzo a la hoja), aditivos para encuadernación del papel, tapado de poros) Impermeabilización (resistencia a la penetración de líquidos)
<b>Aditivos especiales (poco utilizados)</b>		
Antimohos	Extremo seco	Tiones, tiazales, tiocianatos, tiocarbamatos, tioles, isotiazolinonas, formaldehído, glutaraldehído, glicoles, naftol, organoclorados, organobromados, compuestos organomecúricos
Desespumadores	Extremo seco	Aceite de pino, fuel oil, aceites reciclados, silicona, alcoholes
Agentes: Tratamiento de la rejilla	Extremo seco	Imidazoles, butildiglicol, acetona, trementina, ácido fosfórico
Húmedo y seco: Aditivos para consistencia	Extremo seco	Resinas de folmaldehído, epiclorhidrina, glioxal, gomas, poliaminas, fenólicos, poliacrilamidas, poliamidas, derivados de celulosa
Adhesivos: Cubrientes y plastificantes	Extremo seco	Hidróxido de aluminio, acetato de polivinilo, acrílicos, aceite de linaza, gomas, colas proteicas, emulsiones de cera, papel metalizado, acita, glioxal, estearatos, disolventes, polietileno, derivados de celulosa, derivados del caucho, poliaminas,

		poliésteres, polímeros de butadieno-estireno
Otros	Extremo húmedo / seco	Inhibidores de la corrosión, dispersantes, ignifugantes, agentes antivaho, ayuda al goteo, deflocuantes, agentes para control del Ph, conservantes

Tabla 5. Aditivos agregados en el proceso de fabricación del papel y cartón (Teschke & Demers, 2001).<sup>10</sup>

6. Calandrado: Una vez obtenida la lámina del extremo seco (con o sin aditivos), el cartón es circulado por una máquina llamada calandria, que consiste en una serie de cilindros con una superficie lisa o rugosa, que presionan la lámina de cartón. El calandrado es el proceso para alisar la superficie del cartón, reducir su espesor y darle un acabado en específico; existen diversos tipos de calandrado según la especificación deseada. Si el producto obtenido no va a recibir otro tratamiento o algún revestimiento es recortado en láminas más pequeñas, enrollado en una bobina, etiquetado y transportado al almacén (Iggesund Paperboard, 2017).
7. Revestimientos (coating), corte y embalaje: Al terminar el proceso de calandrado, la lámina de cartón puede ser modificada nuevamente por la adición de revestimientos. Los revestimientos son aplicados en cilindros por medio de cuchillas que retiran los excesos y le otorgan un espesor definido; los excesos de revestimientos son reutilizados.

Como se puede observar, según el tipo de cartón fabricado y el método de manufactura de cada compañía, los procesos de aditivos y recubrimientos pueden ser variados y repetidos, con el fin de obtener propiedades y características específicas para el producto destinado.

#### **Recubrimientos agregados al cartón (laminados).**

Para el uso del cartón en productos específicos como el empaquetado de alimentos y bebidas, se utilizan los recubrimientos. El objetivo de los recubrimientos para el cartón es el añadir protección en las superficies externas, para obtener un producto de mayor calidad y de una vida prolongada. El uso de diversos recubrimientos unidos correctamente con el cartón optimiza el rendimiento de material, asegura

<sup>10</sup> La composición y aplicación de aditivos, varía según la empresa que manufactura el papel – cartón, en la tabla se muestran los aditivos más utilizados.

mayor calidad visual, ahorra el uso de materiales, reduce desperdicios y simplifica el proceso de embalaje (Stora Enso, 2013).

Los recubrimientos comúnmente se conforman como películas muy delgadas adheridas a los cartones para proveer una barrera ante agentes externos. El uso de polímeros permite que las láminas de recubrimiento sean muy delgadas, con altos grados de protección, a precio económico y con ciertos beneficios ecológicos. Los factores más importantes que considerar para el uso de recubrimientos como protección son: la luz, el oxígeno, la humedad y microbios. Además, según aplicaciones específicas también se utilizan recubrimientos para proteger ante grasas, resistencia al calor, mejorar la superficie para impresión y ciertos acabados deseados. El método de extrusión es el más utilizado para la aplicación de recubrimientos sobre el cartón. Los polímeros más utilizados son (Stora Enso, 2013):

- Polietileno (PE), polipropileno (PP) y otras poliolefinas.
- Etilen-Vinil-Alcohol (EVOH) y poliamidas (PA) como recubrimientos multicapa de alta protección (high-barrier multilayer coatings).
- Polímeros especiales como el Tereftalato de Polietileno (PET) y el Tereftalato de Polibutileno (PBT).

Existen otros métodos de aplicación de recubrimientos, como su aplicación a base de pinturas o como el uso de biopolímeros para obtener productos enteramente biodegradables.

## **Tipos de cartón**

Actualmente existen numerosos tipos de cartón en el mercado. Esta clasificación se basa en los tipos de fibras utilizados y en el proceso de producción. Cada cartón puede ser adoptado para diversos usos y según las necesidades del consumidor, factor que es condicionado por las características y propiedades de cada material.

La manufactura del papel y el cartón se basa en la misma tecnología. La producción del papel se enfoca principalmente en la superficie para la impresión, mientras que el cartón se enfoca tanto en la superficie de impresión como en la rigidez, resistencia y propiedades específicas para el embalaje. Lo que usualmente diferencia al cartón del papel es que el cartón posee mayor peso específico, mayor calibre y mayor rigidez, además de ser utilizado en multicapa. Según la norma alemana DIN Standard 19303, el

cartón se clasifica en cinco tipos, con base en el proceso de manufactura y al tipo de pulpa utilizada (Stora Enso, 2013).<sup>11</sup>

### **Cartón plegable (Folding Boxboard - FBB).**

Consiste en una capa de pulpa mecánica ubicada entre capas de pulpas químicas. Se utiliza en productos como bebidas, farmacéuticos, productos congelados o refrigerados, dulces, entre otros. Las pulpas mecánicas utilizadas pueden ser de pulpa de madera molida (Stone-ground Wood – SW), pulpa de madera presurizada (Pressurized groundwood – PGW), pulpa termomecánica (TMP) o pulpa químico-termomecánica (CTMP). La capa superior es de pulpa química blanqueada, mientras que la capa inferior puede ser de pulpa química blanqueada o pulpa química no-blanqueada. Ambas capas pueden ser recubiertas con pigmentos minerales o sintéticos.

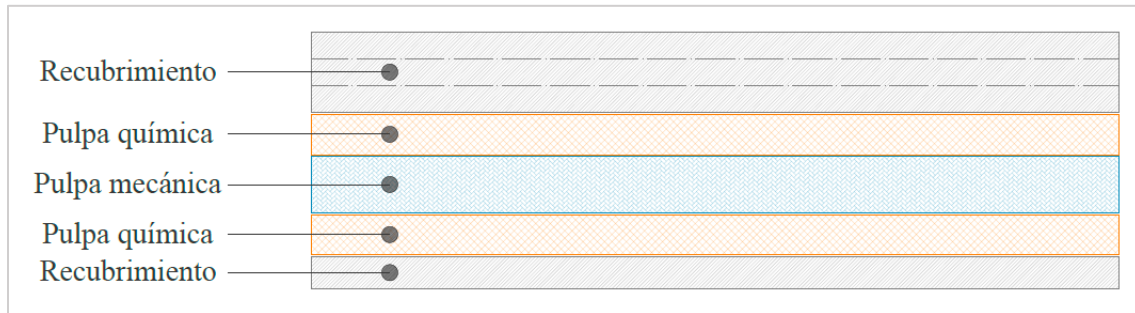


Figura 11. Diagrama de cartón plegable (FBB) (Stora Enso, 2013).

### **Cartón sólido blanqueado (Solid Bleached Sulphate - SBS).**

Este cartón está compuesto enteramente de pulpa química blanqueada. La capa superior e inferior puede ser recubierta con pigmentos minerales o sintéticos. Se utiliza en productos cosméticos, farmacéuticos, artes gráficas, tabaco, embalaje de lujo y puede combinarse con otros materiales para obtener envases de cartón para líquidos.

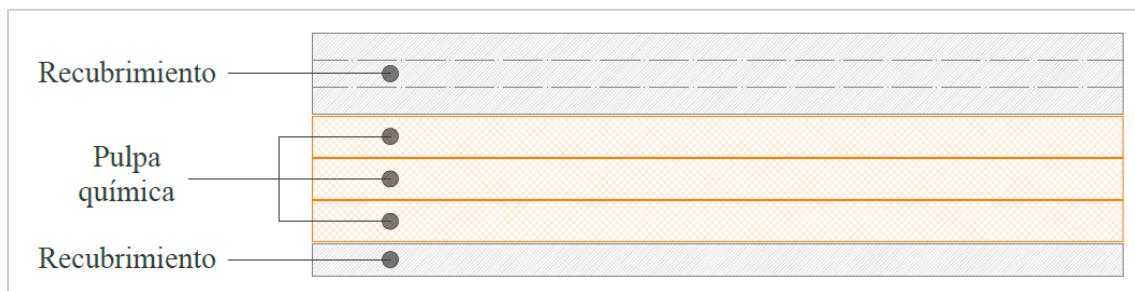


Figura 12. Diagrama de cartón sólido blanqueado (SBS) (Stora Enso, 2013).

<sup>11</sup> Clasificación general de los tipos de cartón, según la norma alemana DIN Standard 19303.

### **Cartón sólido no blanqueado (Solid Unbleached Board–SUB, Solid Unbleached Sulphate–SUS).**

Hecho principalmente de pulpa química no-blanqueada. Para lograr una superficie blanca puede ser recubierto por pigmentos minerales o sintéticos; en algunas ocasiones en combinación con una capa de fibras blanqueadas debajo de los pigmentos. La capa intermedia y la capa inferior puede ser reemplazada por fibras recicladas o fibras químico-termomecánicas (CTMP). Se utiliza en envases de bebidas, ya que es muy resistente y puede fabricado para ser a prueba de agua.

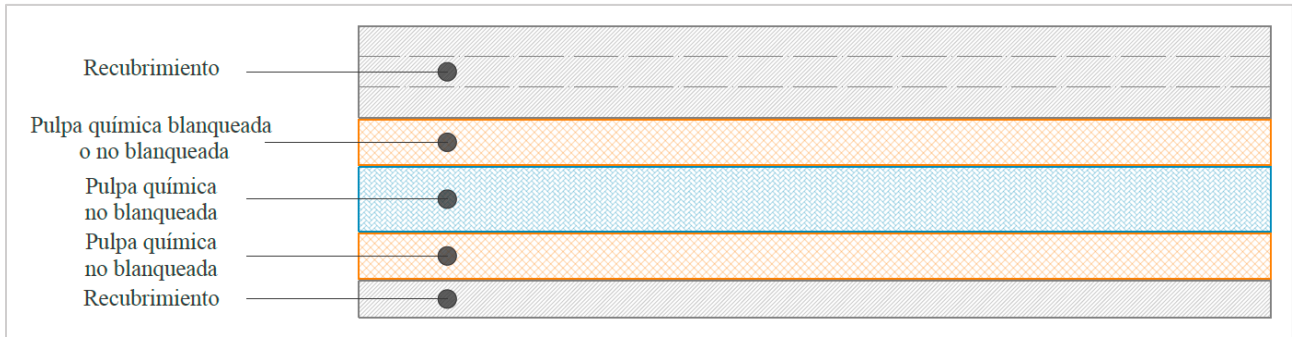


Figura 13. Diagrama de cartón sólido no-blanqueado (SUB – SBS) (Stora Enso, 2013).

### **Cartón de fibras recicladas (White Lined Chipboard – WLC).**

Normalmente este tipo de cartón se fabrica utilizando varias capas de fibras recicladas al centro. Puede poseer varias capas con diferentes tipos de pulpas. La capa superior puede ser de pulpa química blanqueada virgen o de pulpa blanca reciclada. La capa inferior puede ser de fibras recicladas, de fibras vírgenes blanqueadas o de fibras vírgenes no blanqueadas. De igual manera la capa superior e inferior puede ser recubierta por pigmentos minerales o sintéticos. Se utiliza para fabricar envases de alimentos refrigerados y congelados, cereales, cajas de zapatos y juguetes.

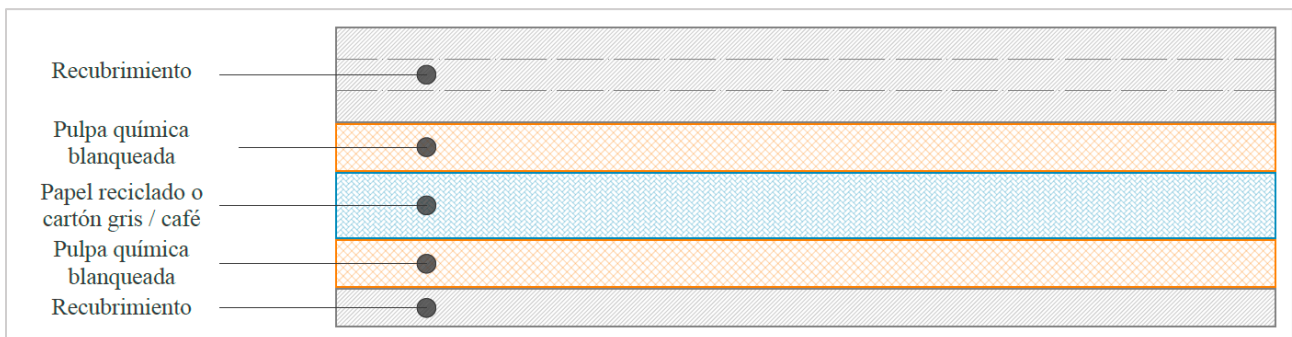


Figura 14. Diagrama de cartón de fibras recicladas (WLC) (Stora Enso, 2013).

## Cartón para líquidos (Liquid Packaging Board – LPB).

Utilizado para empaclar alimentos líquidos como jugos o leche. A su capa externa se le puede unir otro tipo de cartón como el FBB, SBS o SUB. En la parte interna está recubierto por plástico, siendo el más común el Polietileno (PE).

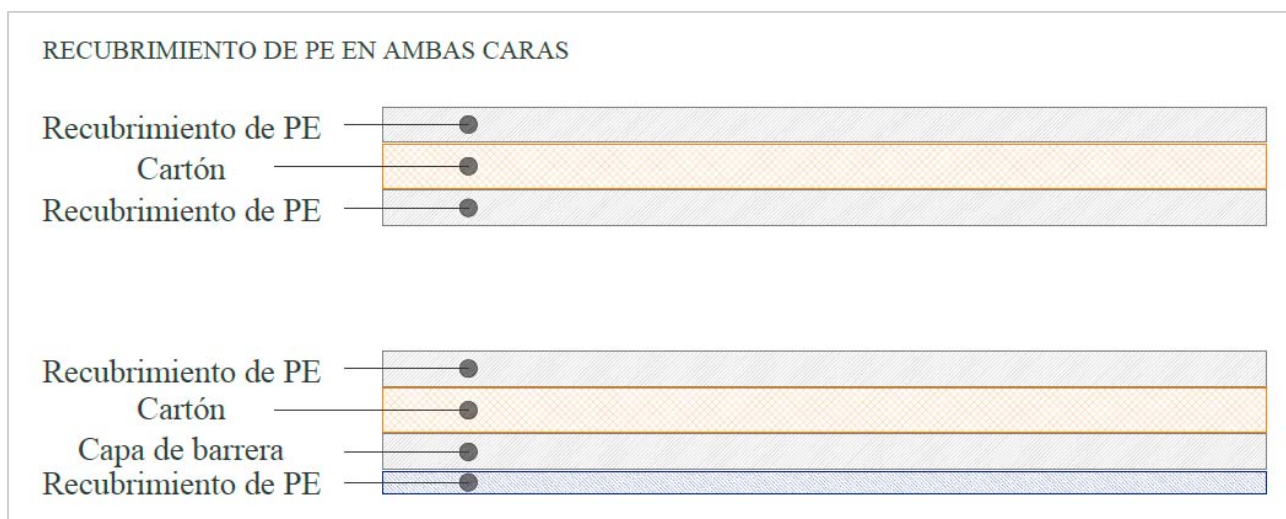


Figura 15. Diagramas de cartones para líquidos (LPB) (Stora Enso, 2013).

En la Tabla 6 observa la clasificación general de los tipos de cartón utilizados en el mercado para la fabricación de productos.

Definición según norma DIN 19303		Tipo de cartón	Descripción	Pasta utilizada
Sin revestimiento	Con revestimiento			
	AZ	SBS	Cartulina gráfica de alto brillo con reverso blanco	Pasta química totalmente blanqueada
	AC1	FBB	Cartón para cajas, sólido de alto brillo con reverso blanco	Pasta química y mecánica
	AC2	FBB	Cartón para cajas, sólido de alto brillo con reverso crema	Pasta química y mecánica



UZ	GZ	SBS	Cartulina gráfica	Pasta química totalmente blanqueada
	GN1	SUS/SUB/CNK	Cartón sólido no blanqueado con reverso blanco	Pasta química no blanqueada
	GN4	SUS	Cartón sólido no blanqueado con reverso marrón	Pasta química no blanqueada
UC1	GC1	FBB	Folding con reverso blanco	Pasta química y mecánica
UC2	GC2	FBB	Folding con reverso crema	Pasta química y mecánica
UT1	GT1	WLC	Cartoncillo de fibras recicladas con reverso blanco	Fibras secundarias (recicladas)
UT2	GT2	WLC	Cartoncillo de fibras recicladas con reverso crema	Fibras secundarias (recicladas)
UT4	GT4	WLC	Cartoncillo de fibras recicladas con reverso marrón	Fibras secundarias (recicladas)
UD1	GD1	WLC	Cartoncillo de fibras recicladas con un volumen alto $\geq 1.45 \text{ cm}^3/\text{g}$	Fibras secundarias (recicladas)
UD2	GD2	WLC	Cartoncillo de fibras recicladas con un volumen alto $< 1.45 \text{ cm}^3/\text{g}$ , $> 1.30 \text{ cm}^3/\text{g}$	Fibras secundarias (recicladas)
UD3	GD3	WLC	Cartoncillo de fibras recicladas con un volumen alto $\leq 1.30 \text{ cm}^3/\text{g}$	Fibras secundarias (recicladas)

Tabla 6. Clasificación y nomenclatura de cartones, según la norma alemana DIN 19303 (Stora Enso, 2013).<sup>12</sup>

Nomenclatura de la tabla:

- La primera letra describe el tipo de tratamiento de la superficie:
  - A = revestimiento de alto brillo
  - G = revestimiento de pigmentos
  - U = sin revestimiento
- La segunda letra corresponde a la pasta principal:

<sup>12</sup> Clasificación de los tipos de cartón, con revestimientos y sin revestimientos. Norma alemana DIN 19303.



- Z = pasta química blanqueada
- N = pasta química no blanqueada
- C = pasta mecánica
- T = pasta reciclada con reverso blanco, crema o marrón
- D = pasta reciclada con reverso gris
- Excepto en las categorías D, el número define el color del reverso:
  - 1 = blanco
  - 2 = crema
  - 3 = marrón
- En las categorías D, el número define el volumen específico (bulk) del cartón:
  - 1 =  $\geq 1,45 \text{ cm}^3/\text{g}$
  - 2 =  $< 1,45 \text{ cm}^3/\text{g}, > 1,3 \text{ cm}^3/\text{g}$
  - 3 =  $\leq 1,3 \text{ cm}^3/\text{g}$

### **Propiedades generales del cartón**

El cartón, al ser un material aplicado para la construcción de objetos de la vida cotidiana, debe ser evaluado según sus características y propiedades. Las propiedades de un material se refieren a un rango en términos del tipo y magnitud, de respuesta ante estímulos específicos. Generalmente la definición de las propiedades de un material es ajena a sus características de forma y tamaño.

Las propiedades físicas son aquellas que pueden ser observadas o medidas sin cambiar la composición química del material, mientras que las propiedades químicas se manifiestan al alterar su estructura interna cuando interactúan con otras sustancias. Las propiedades físicas y químicas son el resultado de la composición y estructura de un material, y nos indican el comportamiento de este al ser aplicado como un objeto.

Para fines de la investigación, se profundizará en el estudio de propiedades físicas y propiedades mecánicas del material, ya que se pretende que su uso principal sea como material para elementos estructurales; y algunas propiedades específicas ópticas como la apariencia. Las propiedades por ensayar nos indican cómo el tipo de cartón se comportará ante los diversos factores de su entorno. Las propiedades mecánicas del cartón se definen como las características inherentes del material, que permiten diferenciarlo de otro material, desde el punto de vista del comportamiento mecánico. Las

propiedades mecánicas se manifiestan por la deformación resultante del objeto, al aplicar una fuerza externa.

Dentro de industria de fabricación del cartón, existen ciertas propiedades estándar que permiten evaluarlo para su aplicación en productos; de los valores obtenidos en las diferentes pruebas, se obtiene la clasificación de los tipos de cartón. Las propiedades más importantes para la fabricación del cartón en la industria son:

- Propiedades físicas:
  - Gramaje
  - Espesor
  - Densidad y volumen
  - Estabilidad dimensional y contenido de humedad
  - Resistencia al desgarramiento (fuerza de rasgado)
  - Rigidez
- Propiedades ópticas:
  - Blancura, brillo, lustre y opacidad
- Propiedades mecánicas:
  - Resistencia a la tensión y alargamiento
  - Resistencia a la compresión
  - Resistencia de unión entrecapas, fuerza necesaria para separar multicapas (plybond)
  - Elasticidad
  - Dirección de máquina

Las propiedades más importantes que definen a un cartón son el gramaje y el espesor. Estas propiedades físicas, indican la cantidad de fibras y revestimientos utilizados por metro cuadrado en una lámina de cartón, y a consecuencia de esto, el grosor del material. Basados en el gramaje y el espesor, la densidad y el volumen (densidad inversa, denominada “bulk”), pueden ser calculadas; esto indica el espesor del cartón por el gramaje. Un ejemplo es: baja densidad = volumen alto = espesor alto.

Las diferencias entre la apariencia y el desempeño de los tipos de cartón son el resultado de la mezcla de las pulpas utilizadas. Los fabricantes buscan optimizar el uso de las materias primas (pulpas) para otorgar la mayor rigidez y resistencia a las láminas de cartón. Manteniendo un gramaje fijo, el mejorar la resistencia al aumentar el uso de pulpas químicas (son más resistentes que las pulpas mecánicas), dará

por resultado el incremento de la densidad del material por un espesor menor. El uso de revestimientos y el proceso de calandrado afectan negativamente el espesor de la lámina, pero mejoran la textura y la superficie de impresión. Un elevado uso de revestimientos limita la cantidad de fibras en un gramaje fijo, por lo tanto, disminuye la rigidez y resistencia del material.

Para describir las propiedades físicas, las fibras generalmente se pueden clasificar por su proceso de tratamiento en mecánicas y químicas, Debido al tipo de procesamiento de las fibras, las propiedades resultantes son muy diferentes entre fibras mecánicas y químicas. En la industria del cartón, se requiere una determinada combinación de blancura y resistencia mecánica para satisfacer la demanda del mercado en apariencia y desempeño. Al mezclar las fibras mecánicas y químicas por capas, se optimiza el uso de las materias primas, obteniendo las propiedades deseadas. Las láminas obtenidas de fibras químicas se caracterizan por ser resistentes, flexibles y densas; mientras que las obtenidas por fibras mecánicas son lo opuesto, frágiles y rígidas. La técnica de fabricación multicapa, permite la creación de cartones con buena resistencia mecánica y con el acabado deseado en la superficie, con el menor uso de fibras.

#### **Gramaje (Norma ISO 536).**

La cantidad de fibras por unidad de área en el cartón se caracteriza por el peso base, es decir, la masa por unidad de área (gramaje). El gramaje especifica el peso del cartón por una unidad de área, comúnmente es medido en  $\text{g/m}^2$ . El gramaje es continuamente escaneado dentro de las máquinas de manufactura, está ligado a los procesos de control de humedad y el laminado de la pulpa. Rutinariamente se realizan pruebas para la calibración de los equipos. Estas pruebas son realizadas al pesar láminas con ciertas dimensiones dentro de un ambiente controlado. Al igual que las láminas de cartón, los recubrimientos plásticos también son medidos por su peso en  $\text{g/m}^2$ . Ya que el gramaje comprende la cantidad de fibras y la humedad dentro de un cartón, ambas otorgan las características de consistencia (variación baja por el tiempo de manufactura) y uniformidad (variación baja del material) de la lámina. El gramaje de los papeles tradicionales de oficina va de 40 a  $100 \text{ g/m}^2$ , mientras que el cartón se considera a partir de 200- $220 \text{ g/m}^2$  en adelante.

#### **Espesor (Norma ISO 534).**

El espesor es la distancia entre las dos superficies de la lámina de cartón en un área especificada; es medido en milésimas de milímetro (micras -  $\mu\text{m}$ ). Al igual que el gramaje, el espesor es controlado dentro del proceso de la máquina de cartón. Las pruebas se realizan para determinar el espesor de una muestra y así checar la calibración de los equipos.

### **Densidad y volumen (Norma ISO 534).**

La densidad es la expresión utilizada para describir el grado de compactación de cartón. Es calculada por la relación entre el gramaje y el espesor, medido en kg/m<sup>3</sup>. El incremento del grosor de una lámina por un gramaje constante resulta en una menor densidad; siendo la densidad directamente proporcional al espesor. El volumen (bulk) es el inverso de la densidad y es expresado en cm<sup>3</sup>/g. La fórmula utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$Densidad \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \frac{gramaje \left( \frac{g}{m^2} \right)}{espesor (\mu m)} \times 1000$$

Ambas propiedades son calculadas por la información obtenida de la medición del gramaje y el espesor.

### **Estabilidad dimensional y contenido de humedad (Norma ISO 287).**

La estabilidad dimensional es una propiedad básica en la fabricación del cartón. La apropiada planitud o forma de una lámina de cartón, facilita el proceso de manufactura del producto, así como la eficiencia del embalaje. Se define como la resistencia de una lámina de cartón a los cambios dimensionales debidos a la modificación de alguna de sus propiedades.

Durante el proceso de manufactura el cartón puede ser expuesto a condiciones que puedan alterar su contenido de humedad. El contenido de humedad se expresa por un porcentaje total del peso del cartón. Las pruebas son realizadas en un ambiente controlado a 23°C y con un 50% de humedad relativa. El agua actúa como un suavizante para el cartón. Por lo tanto, el módulo elástico del cartón también dependerá del contenido de humedad en la lámina. Si existe un alto contenido de humedad, el módulo elástico del cartón se aproxima a cero, ya que las fibras comienzan a separarse; las cuales regresan a su estado previo al ir retirando la humedad. Este fenómeno permite el reciclaje de las fibras de celulosa para formar nuevos productos. En la Figura 16 se muestran dos gráficas del comportamiento del cartón ante los efectos de la humedad. Se observa que, a mayor contenido de humedad, el cartón tiende a deformarse con mayor facilidad.

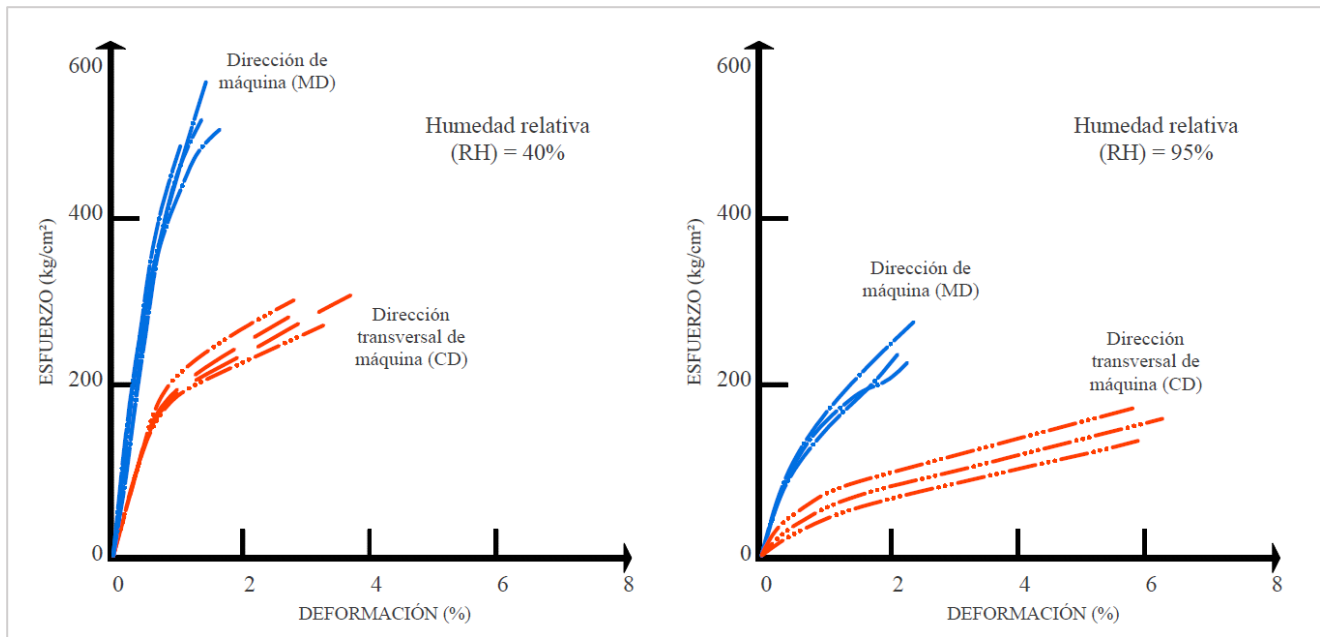


Figura 16. Gráficas esfuerzo-deformación de un cartón a diferentes contenidos de humedad (40% y 95%).

### Resistencia al desgarramiento (fuerza de rasgado).

Es la fuerza necesaria para rasgar una lámina de cartón a lo largo de una incisión existente. Esto es utilizado para conocer como trabajará una tira de cartón a esfuerzos de rasgado al abrir un envase. Una elevada resistencia al desgarramiento está relacionada directamente a la resistencia del material, por lo tanto, a la unión sólida de fibras primordialmente largas.

### Rigidez.

La rigidez es una de las propiedades más importantes del cartón. Se define como la resistencia del cartón a ser doblado por una fuerza aplicada. El cartón es un material que ofrece gran rigidez a un peso muy bajo, lo que permite cumplir con su función primara, de proteger el contenido en un envase. Una elevada rigidez del material puede ser lograda a través de un espesor elevado y por el uso de fibras con un módulo de elasticidad elevado en el centro de la lámina. La rigidez también se relaciona con otras propiedades como la resistencia a la compresión, la tenacidad y plegabilidad.

Una alta densidad en el cartón es causada por la presencia de aditivos. Sin el uso de aditivos, la densidad de un papel comúnmente va de 300 a 900 kg/m<sup>3</sup>, mientras que el módulo elástico de una lámina de papel tiene un rango entre los 1000 a 9000 MPa, esto se obtiene al promediar los valores MD y CD, debido al comportamiento anisotrópico del cartón. La resistencia a esfuerzos mecánicos en un cartón aumenta entre mayor cantidad de fibras ordenadas de celulosa posea.

### **Blancura, brillo, lustre y opacidad (Propiedades secundarias, (Pro Carton)).**

La blancura es la impresión visual de que tan blanco es el cartón o su superficie. El brillo se expresa como el porcentaje de luz que es reflejado desde una superficie de cartón a una longitud de onda de 457 nm.

Entre más luz sea reflejada por la superficie del cartón, mayor es el lustre; el lustre puede obtenerse mediante varios métodos de barnizados. La opacidad es la medida de la capacidad del cartón para ocultar lo que hay detrás de él, se expresa en porcentaje. Un alto porcentaje de opacidad corresponde a una lámina de cartón con baja transparencia (alta opacidad). El grado de opacidad depende de cómo llegué la luz al material y de cómo es absorbida por el cartón. Esta propiedad es importante cuando el cartón se imprime en ambas caras.

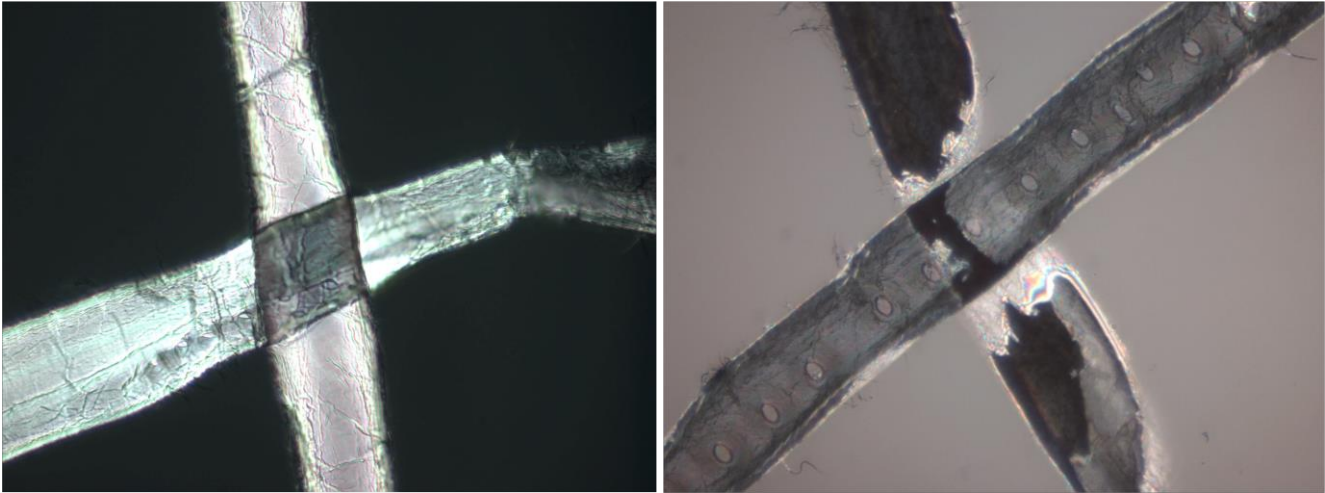
### **Propiedades mecánicas del cartón**

Existen tres factores importantes que determinan las propiedades mecánicas del cartón. Las propiedades de las fibras (tipo de madera y proceso de pulpado), el entrelazamiento de las fibras y la disposición geométrica de las fibras. Para establecer las propiedades mecánicas del cartón es importante conocer los tipos de fibras y los aditivos que lo componen. A pesar de que un mismo tipo de cartón puede ser producido en distintas fábricas o en laboratorios, este puede poseer diferencias en su estructura a nivel microscópico, factor que depende del proceso exacto de producción del cartón.

Cabe recordar que el cartón está compuesto por una red de fibras entrelazadas, relativamente orientadas (en dirección de la máquina), por lo que se pueden obtener variaciones microestructurales. Esto da por resultado leves diferencias en los valores de las propiedades mecánicas de cada lámina de cartón, que depende del proceso de producción (manual o por maquinaria). Es casi imposible predecir con precisión la geometría estructural de la red de fibras de un cartón, pero se pueden establecer parámetros generales al estudiar algunos ejemplares seleccionados.

La estructura de las fibras de un cartón es una de las bases principales que determinan sus propiedades mecánicas. Un cartón sólo es compuesto si las fibras se entrelazan entre sí. Entre mayor cantidad de entrelazamientos por fibra exista, dará por resultado un cartón más resistente. Por lo tanto, primero es necesario describir la estructura de la red de fibras. Una característica particular es la longitud que existe entre los entrelazamientos de las fibras. En la Figura 17 se muestra la comparación de dos tipos de entrelazamientos de fibras; cuando el entrelazamiento de las fibras es total (uniones planas), el cartón a

macroescala podrá resistir mayores esfuerzos mecánicos; si el entrelazamiento es parcial los esfuerzos no podrán ser transmitidos de manera eficiente en la red de fibras, generando microrroturas y una menor resistencia mecánica.



*Figura 17. Comparación de dos entrelazamientos de fibras de celulosa. A la izquierda se observa una unión plena, a la derecha se observa una unión parcial.*

De manera idónea, la estructura de un cartón está conformada por una red aleatoria plana de fibras delgadas. La longitud de las fibras es variada, comúnmente es de 1 mm a 3 mm, lo cual es más elevado que el espesor de una lámina, por ejemplo, una lámina de papel de oficina tiene un espesor de 0.1 mm. Del mismo modo, la longitud de una fibra de celulosa es más larga que su anchura, que comúnmente va de 10 a 50  $\mu\text{m}$ . Tomando por ejemplo la estructura ideal de un cartón, la mayoría de las fibras están alineadas de manera paralela en el sentido de la dirección de la máquina, y estas fibras a su vez, se entrelazan entre sí arriba y abajo, otorgando un espesor determinado.

Un método para observar la estructura conformada por las fibras en un cartón es el descartar el espesor de la lámina y tomando sólo en consideración las dos dimensiones de la lámina (X y Y), de esta manera se puede observar claramente la red aleatoria de fibras, que dividen la lámina en minúsculos segmentos (usualmente triangulares). Estos segmentos creados y las uniones entre las fibras controlan el comportamiento mecánico del cartón. Las cargas externas aplicadas sobre el material son transferidas de fibra a fibra, a través de los entrelazamientos entre las fibras. Al aumentar el número de entrelazamientos entre las fibras, los segmentos se vuelven más pequeños y por consiguiente se obtiene una red más resistente mecánicamente.

### **Elasticidad.**

La elasticidad es la propiedad mecánica que permite que el cartón retome su forma original al retirar una carga aplicada usualmente a esfuerzos de tensión. El límite elástico es el máximo esfuerzo que puede ser aplicado antes de que el material sea permanentemente deformado. El valor de límite elástico del cartón va comúnmente del 0.2% al 05.% del alargamiento del material. Las constantes elásticas representan la relación esfuerzo – deformación del cartón cuando el rendimiento es lineal. En el caso del material en las tres dimensiones, el esfuerzo es definido por seis componentes independientes: tres esfuerzos normales ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) y tres esfuerzos cortantes ( $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ ). El estado de deformación en tres dimensiones también es definido por seis componentes, tres deformaciones normales ( $\epsilon_i$ ) y tres deformaciones por cortante ( $\gamma_{ij}$ ). Es importante establecer que el Módulo de Elasticidad E del cartón es altamente anisotrópico, siendo  $E_x > E_y$ . El módulo longitudinal elástico ( $E_x$ ) es mayor que el módulo transversal elástico ( $E_y$ ) debido a la disposición estructural de las fibras.

### **Resistencia a la tensión y alargamiento.**

En los ensayos de resistencia a la tensión se analiza la fuerza aplicada necesaria requerida, por unidad de área, para romper una tira de cartón. Usualmente este valor es obtenido por medio de una máquina que somete a esfuerzos graduales de tensión una tira de cartón hasta la ruptura de este; de esto se obtienen los valores de resistencia y elongación del material. En el ensayo se evalúa la fuerza necesaria para romper una tira de cartón de 15 mm de anchura. La fuerza resultante es dividida entre el grosor de la muestra y el resultado es expresado en  $\text{kg/m}^2$ . En principio, el incremento del esfuerzo a tensión aplicado a una lámina de cartón puede causar una deformación elástica o plástica. Esta condición depende de otra variable que es el tiempo. Cuando un esfuerzo es aplicado repetidamente a una lámina de cartón, el módulo elástico del material va decreciendo por fatiga. Este comportamiento es típico de casi todos los tipos de cartón, el módulo elástico decrece hasta un 10%, previo a su punto de ruptura.

### **Resistencia a la compresión.**

Debido que el cartón que es un material poroso que consiste en una gran cantidad de fibras mezcladas en una estructura compleja (red), su comportamiento mecánico es distinto entre esfuerzos de tensión y compresión. A tensión, la red de fibras es gradualmente estirada alineando poco a poco las fibras para soportar la carga hasta que las fibras sufran la ruptura (se separan unas de otras). En láminas delgadas, a compresión, la red de fibras colapsa a una escala microscópica, ya que estas se pandean y doblan. Posteriormente a la falla de compresión, la resistencia de la fibra no cambia, lo que significa que la resistencia a tensión se mantiene debido a que persiste la unión entre las fibras. Esto da por resultado que la resistencia a compresión de las fibras en láminas delgadas es siempre de dos a tres veces menor que la



resistencia a la tensión. Esta propiedad es única, lo que permite obtener la habilidad del plegado, primordial para la industria del cartón. La falla microscópica del cartón a compresión se debe por la inestabilidad estructural (no ruptura) de la red de fibras. Esta falla ocurre por el pandeo de los segmentos de las fibras o por las dislocaciones a cortante de las fibras; cuando la falla ocurre en unas fibras, los esfuerzos son redistribuidos a otras fibras. Cuando la carga a compresión es incrementada, aumenta el pandeo y las dislocaciones de las fibras, hasta volverse un material estructuralmente inestable. Una falla a compresión a nivel macroscópico es a menudo asociada con una separación de las capas, denominada como delaminación. En la Tabla 7 se presentan las propiedades mecánicas del cartón en tubos a ensayos de esfuerzos de compresión, que se toman como referencia para el proyecto de investigación, realizados por las investigaciones del Arq. Shigeru Ban.

<b>Propiedades mecánicas de tubos de papel-cartón, Shigeru Ban.</b>				
<b>Proyecto</b>	<b>Dimensiones de tubos</b>	<b>Contenido de humedad del cartón</b>	<b>Resistencia a la compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Módulo de Young, eje axial (kg/ cm<sup>2</sup>)</b>
Library of Poet	∅ externo = 100 mm ∅ interno = 75 mm	-	103.19	18,558.84
Paper House	∅ externo = 280 mm ∅ interno = 250 mm longitud = 600 mm	8.8	113.90	24,065.3
Paper Dome	∅ externo = 291 mm ∅ interno = 250 mm longitud = 600 mm	10.0	99.32	21,108.13
Japan Pavilion	∅ externo = 120 mm ∅ interno = 76 mm longitud = 240 mm	8.7	97.17	16,009.54

*Tabla 7. Propiedades mecánicas de tubos de cartón obtenidas de los ensayos mecánicos realizados por el arquitecto Shigeru Ban.*

### **Resistencia de unión entrecapas (Prueba TAPPI 569).**

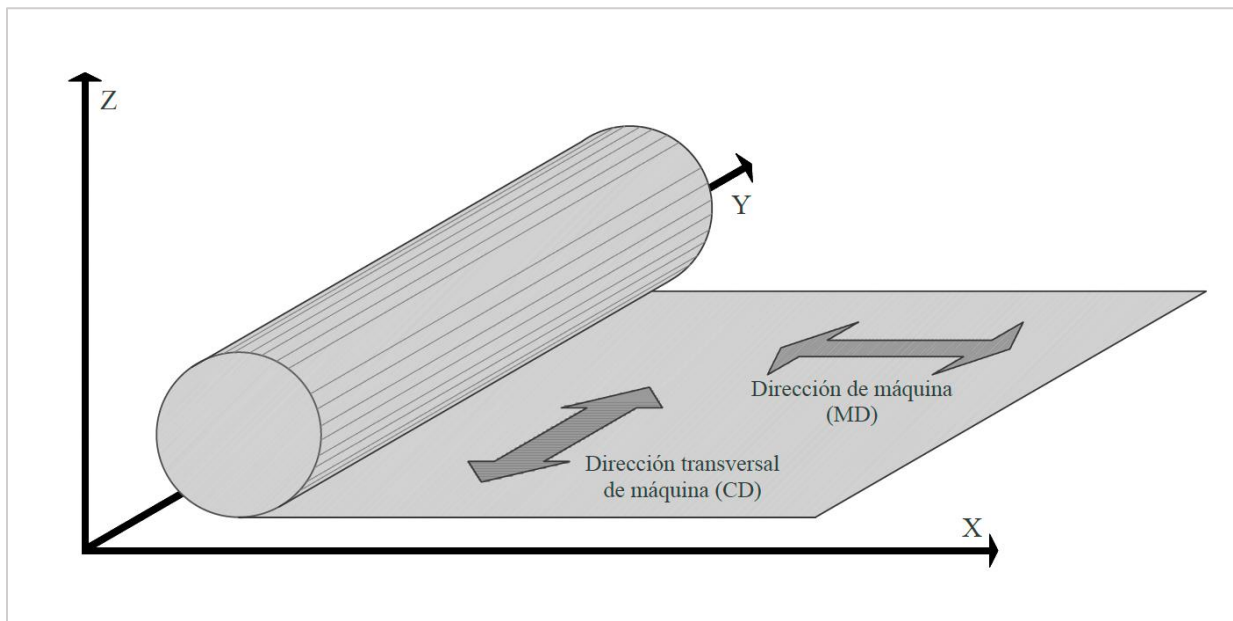
Un cartón multicapa es construido por la unión de varias capas de fibras. Debido a esto es importante que estas capas posean una óptima unión entre ellas. La resistencia de unión entrecapas (plybond), es la expresión utilizada para cuantificar esta propiedad y puede ser medida a través de varias técnicas. Una de ellas es la prueba Scott Bond, en esta prueba, la energía necesaria para separar las láminas de un cartón

al aplicar una fuerza perpendicular a la superficie de la lámina es cuantificada. El resultado obtenido es expresado en  $J/m^2$ .

### **Dirección de máquina.**

Cuando el cartón es elaborado, la máquina crea una lámina continua con una anchura de 5 a 10 m. Un rollo de papel – cartón puede tener una longitud de hasta 10 km. Al fabricar una lámina de cartón, las fibras de la pulpa se alinean en paralelo a la dirección al movimiento de la máquina. Para diferenciar la estructura microscópica de una lámina de cartón, esta se especifica de la siguiente manera: la dirección en la que la lámina es procesada por la máquina se denomina Dirección de Máquina (MD – machine direction); la dirección lateral se define como Dirección Transversal de Máquina (CD – cross-machine direction); y el espesor como Dirección Z (ZD), Figura 20.

Esta variable es importante a considerar, ya que el comportamiento de una lámina de cartón ante esfuerzos mecánicos es diferente en cada dirección de las fibras. Cuando la lámina es sometida a cargas en la Dirección de la Máquina tiende a ser más resistente. En términos de plegabilidad, un pliegue en sentido contrario a la dirección de la máquina (MD) es mejor que un pliegue paralelo a la misma.



*Figura 18. Tipos de dirección de una lámina de cartón.*

En el siguiente capítulo se analizará al material de refuerzo, las fibras de carbono, cuyo objetivo es determinar las propiedades mecánicas que posee el material para fundamentar su uso en la elaboración

del material compuesto. En el capítulo del cartón se observó que las características del cartón, al ser un material comprimido y homogéneo, le otorgan un buen comportamiento a esfuerzos de compresión y tensión según la disposición geométrica del material. En el proyecto de investigación se pretende implementar el cartón de manera sólida homogénea para que su resistencia a los esfuerzos a compresión sea proporcional a la resistencia a esfuerzos de tensión de las fibras de carbono.

### Capítulo III: Las fibras de carbono

Los materiales compuestos de fibras de carbono (FC) se han convertido en uno de los materiales más avanzados utilizados en la industria aeroespacial, automotriz, deportiva y otras aplicaciones, que requieren de alta resistencia mecánica, alto módulo de elasticidad y baja densidad a costo razonable. A medida que el costo de las fibras de carbono (FC) disminuye, su uso se ha extendido a la industria de la construcción, un ejemplo de ello es la aplicación de estas como material de refuerzo en concreto estructural.

Su origen se remonta poco después de la Segunda Guerra Mundial, cuando los fabricantes de aeronáutica militar de EUA descubrieron que los materiales existentes limitaban el rendimiento de sus diseños. Inicialmente, se desarrollaron las fibras de boro para el refuerzo de plásticos, creando así el primer material compuesto estructural avanzado. A pesar de que las fibras de boro eran extremadamente fuertes, duras y relativamente ligeras en comparación con los otros metales, estas tenían numerosos inconvenientes, como: la elevada anchura de sus diámetros (100 – 150  $\mu\text{m}$ ), lo que las hacía difícil de manipular; sólo podían ser utilizadas como monofilamentos; la capa externa de las fibras era de boro, mientras que el núcleo era de otro material, resultando en problemas de compatibilidad térmica; y que eran extremadamente costosas de producir (Fitzer & Manocha, 1998).



*Figura 19. Tubos comerciales de fibras de carbono. Las fibras son entretrejidas en mallas para luego formar los tubos.*

Desde los años 50, una gran variedad de fibras de refuerzo ha sido desarrollada. Las fibras de usualmente son consideradas como la base de comparación de las fibras de refuerzo para materiales compuestos poliméricos. A pesar de que la resistencia de las primeras variedades de fibras de vidrio era mucho menor que otras fibras de refuerzo, estas podían ser manufacturadas por medio de tecnología relativamente simple, lo que significaba un costo de producción mucho menor (Fitzer & Manocha, 1998).

En las últimas décadas, se han desarrollado mejoras significantes en las propiedades de las fibras de vidrio, incrementando su resistencia a ciertos esfuerzos mecánicos, para así ser viables como material de refuerzo en materiales compuestos. El uso de estas fibras de vidrio de relativa resistencia mecánica elevada y de bajo costo, ha permitido el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación de materiales compuestos, obteniendo una gran variedad de formas de presentación. Sin embargo, debido a la susceptibilidad de las fibras de vidrio a elevadas temperaturas y a algunos esfuerzos mecánicos, como su baja rigidez, su aplicación en áreas de alto rendimiento es limitado. Debido a esto, las fibras de carbono han sido desarrolladas donde las propiedades de alta resistencia mecánica y alta resistencia al impacto son fundamentales. Esta combinación única de propiedades en las fibras de carbono, aunado al potencial de refuerzo estructural, han sido la opción favorita por utilizarse en materiales compuestos de la industria aeronáutica y aeroespacial (Fitzer & Manocha, 1998).

La combinación de resistencia y rigidez de las fibras de carbono es superior a los demás tipos de fibras de refuerzo. En materiales compuestos de matriz reforzados con fibras de carbono, la estabilidad de sus propiedades a altas temperaturas son requisitos primordiales por tomar en cuenta. Las fibras de carbono pueden ser utilizadas como refuerzo en toda clase de materiales compuestos: en matrices poliméricas, matrices metálicas y matrices cerámicas (Fitzer & Manocha, 1998).

### **Origen de las fibras de carbono**

La industria del carbón sintético inició oficialmente en 1886, con la creación de la compañía National Carbon Company, con sede en Cleveland Ohio. Eventualmente esta compañía se fusionaría con la compañía Union Carbide en 1917, para formar la Union Carbide & Carbon Corp., la cual cambió su nombre en 1957 a Union Carbide Corporation (CCU). Posteriormente, en 1995, la división de productos de carbón se independizó y se convirtió en UCAR Carbon Company, la cual fue renombrada como GrafTech International Holdings en 2002, adquirida por Brookfield Asset Management en 2015.

Actualmente GrafTech International es la compañía líder a nivel mundial en la industria de producción de carbón y grafito (Landmarks, 2003).

Las primeras fibras de carbono fueron producidas por Thomas Edison a finales del siglo XIX. En 1879, Edison inventó la primera bombilla de luz incandescente, la cual utiliza electricidad para calentar una pequeña banda de un material, denominada filamento, hasta el punto de que el material comienza a brillar. Después de sus primeros intentos para producir filamentos, a base de fibras de bambú, Edison observó que la celulosa regenerada, el rayón, podía ser convertida en filamentos de carbón para usarse en las lámparas incandescentes (Fitzer & Manocha, 1998).

A principios de los años 60, la compañía Union Carbide Corporation (UCC), utilizó el mismo precursor, el rayón, para producir las primeras fibras de carbono comerciales. Inicialmente, se comercializaron dos variedades de estas primeras fibras, denominadas VYB y WYB. La variedad VYB tenía un tratamiento térmico a sólo 1,000 °C y contenía una pequeña cantidad de elementos sin carbón. Estudios estructurales mostraban que las fibras VYB poseían la estructura fibrilar de su precursor, el rayón, y que eran porosas. Un análisis de rayos X mostró que su estructura era la del carbón isotrópico (posee propiedades mecánicas y térmicas iguales en todas las direcciones). La variedad WYB era tratada a 2,500 °C y, por lo tanto, consistía en casi puro carbón. Sin embargo, al igual que todas las fibras de carbono obtenidas de precursores de fibras de polímeros, su estructura era no grafitizable. Las fibras de carbono WYB fueron descritas como fibras de grafito al ser introducidas al mercado, lo cual es un uso erróneo del término grafito, causando confusión en la industria hoy en día (Fitzer & Manocha, 1998).

La aparición de las fibras de carbono de alto rendimiento se dio a mediados de los años 60, cuando la Union Carbide Corporation demostró que las fibras de carbono isotrópicas podían ser convertidas en productos de alto módulo de elasticidad. Esto se logró al extender la fibra isotrópica al 100 % de su longitud original, durante el tratamiento de calor a altas temperaturas. La extensión a elevadas temperaturas resultó en una deformación plástica, orientando los planos basales en la dirección de la aplicación del esfuerzo, paralelo al eje de la fibra. Esto incrementó considerablemente la resistencia y rigidez de las fibras de carbono. Utilizando esta técnica de extender las fibras a altas temperaturas, se lograron obtener fibras de carbono con módulos de tensión de hasta 500 GPa. Inicialmente, tres tipos de fibras de carbono de alto rendimiento fueron comercializados por UCC, siendo: Thornel 25, Thornel 50 y Thornel 75, donde el número indicaba el módulo de la fibra en Msi (mil (s) per square inch – milésima de pulgada cuadrada) (Fitzer & Manocha, 1998).

Además de los avances en las fibras de carbono obtenidas del precursor rayón, a mediados de 1960, se desarrollaron las fibras producidas por el precursor de fibras de Poliacrilonitrilo (PAN). La producción de estas fibras resultó ser más económica, debido al costo menor del precursor de fibras de PAN. El uso del PAN como precursor de las fibras de carbono fue inicialmente desarrollador por el investigador japonés Shindo. Sin embargo, las fibras producidas en las pruebas iniciales de Shindo, sólo exhibían moderadas resistencias a tensión y módulos (550 – 700 MPa y 170 GPa), en parte por la inadecuada orientación molecular de las fibras (Fitzer & Manocha, 1998). Al mismo tiempo, en Reino Unido, los investigadores Phillips, Watt y Johnson, de la Royal Aircraft Establishment in Farnborough, desarrollaron el primer proceso comercial exitoso para la conversión del precursor de fibras de PAN en fibras de carbono. En este proceso, el cambio de la longitud de las fibras era controlado durante el tratamiento térmico, mejorando notablemente las propiedades mecánicas de las fibras de carbono obtenidas (Fitzer & Manocha, 1998).

Posteriormente, se creó otra versión siguiendo el mismo proceso de producción de los británicos, la cual fue comercializada por Morganite, Ltd y por Courtlands, Ltd. Como resultado, en 1966 las primeras fibras de carbono de alto rendimiento manejables fueron introducidas al mercado. Estas fibras de carbono basadas en PAN fueron designadas como tipo I (similar a la clasificación actual de fibras de alto módulo – HM) y como tipo II (similar a la clasificación actual de fibras de alta tenacidad – HT) (Fitzer & Manocha, 1998).

Desde 1966, se han obtenido numerosas patentes de la producción de fibras de carbono a través del precursor PAN. Básicamente, todos estos procesos involucran primero la extensión del precursor, las fibras de PAN, para orientar las moléculas del polímero en sentido paralelo al eje de la fibra y luego estabilizar estas estructuras orientadas bajo tensión en un ambiente oxidante. Después de la estabilización, las fibras son tratadas con calor a altas temperaturas, en un rango que varía de 1,000 °C hasta 3,000 °C en un ambiente inerte (Fitzer & Manocha, 1998).

A partir de finales del siglo XX la constante investigación y desarrollo, ha permitido el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las fibras de carbono basadas en PAN. Sin embargo, debido a que las fibras de carbono basadas en PAN no son grafitizables, los investigadores observaron que el potencial de mejorar ciertas propiedades, como son el módulo de elasticidad y la conductividad térmica, era limitado. A partir de esta premisa, creció el interés en el desarrollo de fibras grafitizables. En los años 60, se observó que el carbón sintético obtenido de materiales cristalinos líquidos de alquitrán podía generar una verdadera estructura de grafito. A través de este descubrimiento, en 1965, el investigador Otani, comenzó

a investigar al alquitrán como material precursor de las fibras de carbono. Desde entonces, la investigación en la creación del precursor del alquitrán y de su transformación en fibras de carbono, ha sido continuo; al punto que en la actualidad es mayor la investigación en fibras de carbono a base de alquitrán que a base de PAN. Como resultado, hoy en día, es posible obtener comercialmente fibras de carbono producido de alquitrán cristalino líquido, con ultra alto módulo de 850 GPa (Fitzer & Manocha, 1998).

Hasta los años 70, el uso de las fibras de carbono estuvo limitado para aplicaciones específicas, como la industria aeroespacial y los artículos deportivos, en los que el volumen utilizado era limitado y el costo no era un inconveniente sobresaliente. Sin embargo, la capacidad de producción, el volumen en el mercado y el costo del producto para los materiales está íntimamente relacionado. No fue hasta que los fabricantes de fibras de carbono anticiparon su uso en otras áreas, como la maquinaria industrial y la industria automovilística, que decidieron incrementar la producción del material, lo que conllevó a la disminución de su costo. A mayor costo las fibras de carbono son de menor grosor (3k, 6k y 12k), las cuales son producidas especialmente para la industria aeroespacial y para otras aplicaciones de alta tecnología. A mayor grosor los costos disminuyen, las cuales son elaboradas para aplicaciones no aeroespaciales (Fitzer & Manocha, 1998). Hoy en día, el aumento de la producción de las fibras de carbono sigue disminuyendo el costo, favoreciendo así su aplicación en otras áreas, como la Arquitectura, lo que hace prever que será un material que se encontrará continuamente en la vida diaria en un futuro cercano.

### **Definición, actualidad y clasificación por propiedades**

Una fibra de carbón se define como una fibra (filamento largo y delgado de material) con un diámetro aproximado de 0.005 mm a 0.010 mm, compuesto mayormente por átomos de carbono. Cuando el contenido mínimo de la fibra es de 92 wt% (porcentaje por peso) de carbono, se define como fibra de carbón; si el contenido de carbono en la fibra es de 99 wt % o superior, se denomina fibra de grafito. Las fibras de carbono generalmente poseen excelentes propiedades mecánicas de esfuerzos a tensión, bajas densidades, alta estabilidad térmica y química en la ausencia de agentes oxidantes, y buena conductividad térmica y eléctrica (Huang, 2009).

Durante las últimas décadas han sido ampliamente utilizadas en materiales compuestos en forma de mallas textiles, fibras continuas o fibras cortadas. Estos materiales compuestos pueden ser producidos a



través de distintos métodos como el bobinado de filamentos, el bobinado de cintas, el método de pultrusión, por moldes a compresión, por empacado al vacío, por moldes líquidos y por moldes de inyección. Recientemente, la industria de las fibras de carbono ha crecido de manera continua para satisfacer la demanda de diversas industrias como la aeroespacial, militar, paletas para turbinas, sistemas estructurales y no estructurales en la Construcción, artículos médicos, partes de automóviles y artículos deportivos. Dentro de la industria automotriz, los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras se utilizan para la fabricación elementos livianos y de diseños complejos. Estos elementos pueden ser partes de la carrocería como las puertas, techos y parachoques, el chasis, elementos de la suspensión, ejes de transmisión, entre otros (Huang, 2009).

En la Tabla 8 se muestra el consumo global estimado de las fibras de carbono, donde se observa un crecimiento constante en la producción y consumo del material. Actualmente, los fabricantes de las fibras de carbono buscan aumentar la producción de las fibras para satisfacer la demanda del mercado, sin embargo, su aplicación en grandes volúmenes, como en la industria automovilística, se ha visto obstaculizada debido al elevado costo de las fibras y la falta de técnicas de fabricación de alta velocidad para materiales compuestos. En la Tabla 9 se presenta la capacidad de producción de las empresas más importantes de manufactura de fibras de carbono, (Huang, 2009).

Sectores de aplicación	Consumo en toneladas (1999)	Consumo en toneladas (2004)	Consumo en toneladas (2006)	Consumo en toneladas (2008)	Consumo en toneladas (2010)
Aeroespacial	4,000	5,600	6,500	7,500	9,800
Industrial	8,100	11,400	12,800	15,600	17,500
Artículos deportivos	4,500	4,900	5,900	6,700	6,900
<b>Total</b>	<b>16,600</b>	<b>21,900</b>	<b>25,200</b>	<b>29,800</b>	<b>34,200</b>

*Tabla 8. Consumo global estimado de fibras de carbono (Huang, 2009).*

Empresa	Fibras de carbono, precursor PAN (Ton)	Fibras de carbono, precursor Alquitrán (Ton)
Toray Industries	9,100	
Toho Tenax	8,200	
Mitsubishi Rayon / Grafil	4,700	
Zoltek	3,500	
Hexcel	2,300	
Formosa Plastics	1,750	
Cytec Engineered Materials	1,500	360
SGL Carbon Group / SLG Technologies	1,500	
Mitsubishi Chemical		750
Nippon Graphite Fiber		120

Tabla 9. Capacidad de producción de fibras de carbono (2005) (Huang, 2009).

En la actualidad, el mercado dominante de las fibras de carbono es el de las fibras de carbono a partir del precursor Poliacrilonitrilo (PAN), seguido por las fibras de carbono de alquitrán y en menor medida los textiles de fibras de carbono de rayón. Es importante mencionar que cada precursor otorga a las fibras de carbono diferentes propiedades. La producción de fibras de carbono a partir de diversos precursores requiere diferentes condiciones de producción, pero las características esenciales de fabricación son muy similares. Comúnmente, las fibras de carbono son manufacturadas por el proceso de pirólisis (degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno) de las fibras precursoras estabilizadas (Huang, 2009).

Las fibras precursoras inicialmente son estabilizadas en aire, a temperaturas que van de 200 °C a 400 °C, por un proceso de oxidación. Las fibras estabilizadas infusibles son sometidas a un tratamiento térmico a altas temperaturas, alrededor de 1,000 °C, en una atmósfera inerte, para remover la presencia de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros elementos que no posean carbono; proceso que es denominado Carbonización. Las fibras carbonizadas pueden ser más grafitizadas a mayores temperaturas, aproximadamente 3,000 °C, para lograr mayor contenido de carbono en el material y obtener mayor Módulo de Young en la dirección de la fibra. Por lo tanto, las propiedades resultantes de las fibras de carbono son afectadas directamente por diversos factores, como la cristalinidad, la distribución cristalina,

la orientación molecular, el contenido de carbono y la cantidad de defectos en su estructura. Previo al proceso de empaque, las superficies relativamente inertes de las fibras de carbono son tratadas para mejorar su adhesión a las matrices en los materiales compuestos (Huang, 2009).

En relación con sus propiedades mecánicas, las fibras de carbono pueden ser clasificadas en: fibras de Ultra-Alto Módulo (UHM, > 500 GPa), fibras de Alto Módulo (HM, > 300 GPa), fibras de Módulo Intermedio (IM, > 200 GPa), fibras de Módulo Bajo (LM, 100 GPa) y fibras de Alta Resistencia a la Tensión (HS, > 4 GPa). Igualmente, las fibras de carbono pueden ser clasificadas según su tratamiento final de temperatura, en Tipo I (tratamiento a 2,000 °C), Tipo II (tratamiento a 1,500 °C) y Tipo III (tratamiento a 1,000 °C). Las fibras de carbono de PAN Tipo II, usualmente son fibras de Alta Resistencia a la Tensión (HS), mientras que la mayoría de las fibras de carbono de Alto Módulo pertenecen a tratamientos térmicos de Tipo I (Huang, 2009).

### **Procesamiento de las fibras de carbono**

La materia prima utilizada para hacer fibra de carbón se denomina precursor. Alrededor del 90% de las fibras de carbono producidas en el mundo, son fabricadas a partir de Poliacrilonitrilo (PAN). El 10% restante de las fibras de carbono son producidas del rayón o del alquitrán de petróleo. Todos estos materiales son polímeros orgánicos, caracterizados por largas cadenas de moléculas unidas por átomos de carbono. La composición exacta de cada precursor varía según la compañía, considerándola un secreto comercial (Zoltek, 2017).

En la fabricación, se utilizan gases y líquidos que intervienen en los procesos; algunas de estas sustancias están diseñadas para reaccionar con las fibras para lograr una propiedad específica. Otras sustancias están diseñadas para no reaccionar o evitar ciertas reacciones con la fibra. Al igual que con los precursores, las composiciones exactas de estas sustancias son diversas según cada compañía (Zoltek, 2017).

El proceso para la fabricación de las fibras de carbono es en parte químico y en parte mecánico. El precursor es estirado en hebras o fibras largas y luego se calienta a una temperatura muy alta sin permitir que entre en contacto con el oxígeno. Sin oxígeno, la fibra no puede arder. En cambio, las altas temperaturas hacen que los átomos en la fibra vibren violentamente hasta que la mayoría de los átomos que no son de carbono son expulsados. Este proceso se llama Carbonización y deja una fibra compuesta de largas cadenas de átomos de carbono estrechamente entrelazadas con solo unos pocos átomos que no sean de carbono (Zoltek, 2017).

### **Estabilización.**

Previamente a que las fibras sean carbonizadas, necesitan ser alteradas químicamente para convertir su unión atómica lineal a una unión de escalera más estable térmicamente. Esto es logrado, al calentar las fibras en el aire a temperaturas de 200 °C a 400 °C, en un periodo de 30 a 120 minutos. En este proceso las fibras captan las moléculas de oxígeno del aire y reorganizan su patrón de unión atómica. Las reacciones químicas estabilizadoras son complejas e implican varios pasos, algunos de los cuales ocurren simultáneamente. Dentro de las fibras se genera calor, el cual debe controlarse para evitar el sobrecalentamiento de las fibras (Zoltek, 2017). Comercialmente, en el proceso de estabilización se utiliza una serie de equipos y técnicas. En unos procesos, las fibras se extraen a través de una sucesión de cámaras calentadas. En otros procesos, las fibras pasan sobre rodillos calientes y a través de capas de sustancias mantenidas en suspensión por un flujo de aire caliente. Algunos procesos utilizan aire caliente mezclado con ciertos gases que aceleran químicamente la estabilización (Zoltek, 2017).



*Figura 20. Producción de fibra de carbón, en planta de BMW, (proceso de enrollamiento de fibras).*

### **Carbonización.**

Una vez que las fibras han sido estabilizadas, se calientan a una temperatura de aproximadamente 1,000 °C a 3.000 °C durante varios minutos, en un horno saturado por una mezcla de gases que no contiene

oxígeno. La falta de oxígeno evita que las fibras se incendien ante las altas temperaturas. La presión del gas dentro del horno se mantiene más alta que la presión del aire exterior, y las zonas donde las fibras entran y salen del horno están selladas para evitar que entre el oxígeno. A medida que las fibras son calentadas, comienzan a perder los átomos que no son de carbono, más algunos átomos de carbono, en forma de diversos gases, incluyendo vapor de agua, amoníaco, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y otros. A medida que los átomos que no son de carbono son expulsados, los átomos de carbono restantes forman cristales de carbono fuertemente unidos, alineados de manera paralela sobre el eje axial de la fibra. En algunos procesos, se utilizan dos hornos, que funcionan a dos temperaturas diferentes para controlar mejor la velocidad de calentamiento durante el proceso de Carbonización (Zoltek, 2017).

### **Tratamiento de la superficie.**

Posterior a la Carbonización, la superficie de las fibras no es ideal para unirse con otras sustancias como las resinas epóxicas u otros materiales utilizados en la producción de materiales compuestos. Para mejorar las características de adhesión de las fibras, su superficie es ligeramente oxidada. La adición de átomos de oxígeno a la superficie proporciona mejores propiedades de unión química y también produce cierta rugosidad en la superficie para mejorar las propiedades de unión mecánica. La Oxidación se realiza al sumergir las fibras en diversos gases como el aire, el dióxido de carbono o el ozono, o en líquidos como hipoclorito de sodio o el ácido nítrico. Las fibras también pueden ser recubiertas electrolíticamente, provocando que las fibras sean el terminal positivo en un baño lleno de diversos materiales eléctricamente conductores. El proceso de tratamiento de superficie debe ser controlado minuciosamente para evitar la formación de defectos superficiales, que pueden causar fallas en la fibra (Zoltek, 2017).

### **Revestimientos.**

Después del tratamiento de la superficie, las fibras de carbono son revestidas para protegerlas de daños durante el enrollamiento o el tejido. Este proceso se denomina Revestimiento. Las sustancias de revestimiento se eligen para que sean compatibles con el adhesivo utilizado para formar materiales compuestos. Los materiales de revestimiento típicos incluyen epoxi, poliéster, nylon, uretano, entre otros. Las fibras ya revestidas son enrolladas en cilindros llamados bobinas. Las bobinas se cargan en una máquina de hilar y las fibras son trenzadas en hilos con distintos diámetros (Zoltek, 2017).

## Estructura, tipos y propiedades generales de las fibras de carbono

Debido a que las propiedades de las fibras de carbono van intrínsecamente relacionadas al tipo de precursor utilizado (PAN, alquitrán, rayón), a su procesamiento y estructura; se hace mención de su estructura y tipos, como base de comparación entre ellos.

La estructura atómica de las fibras de carbono es similar a la estructura atómica del grafito, que consiste en capas de átomos de carbono (láminas de grafeno) arregladas en un patrón hexagonal, Figura 21. Dependiendo del precursor y del proceso de manufactura, las láminas de las capas en las fibras de carbono pueden tener un orden turbostrático (las láminas de átomos de carbono se apilan de forma irregular), grafitico (las láminas se apilan paralelas entre sí de manera regular) o de estructura híbrida, Figura 22. Generalmente, una estructura grafitica cristalina bien agrupada corresponde a fibras de carbono derivadas del alquitrán, mientras que una estructura de orden turbostrático puede ser observada en fibras cuyo precursor es el PAN (Huang, 2009).

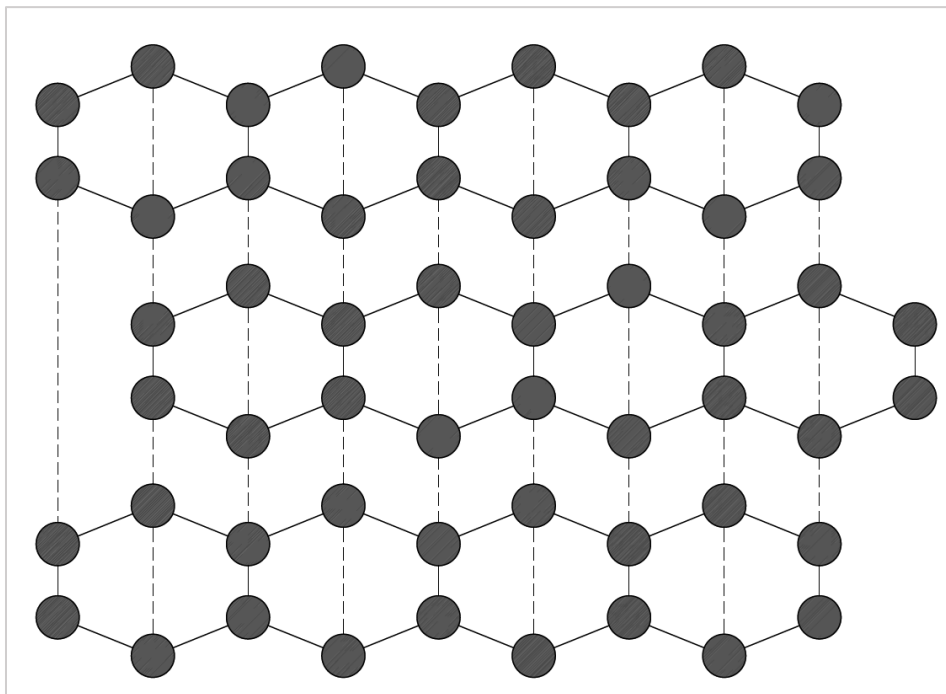


Figura 21. Estructura atómica del grafito.

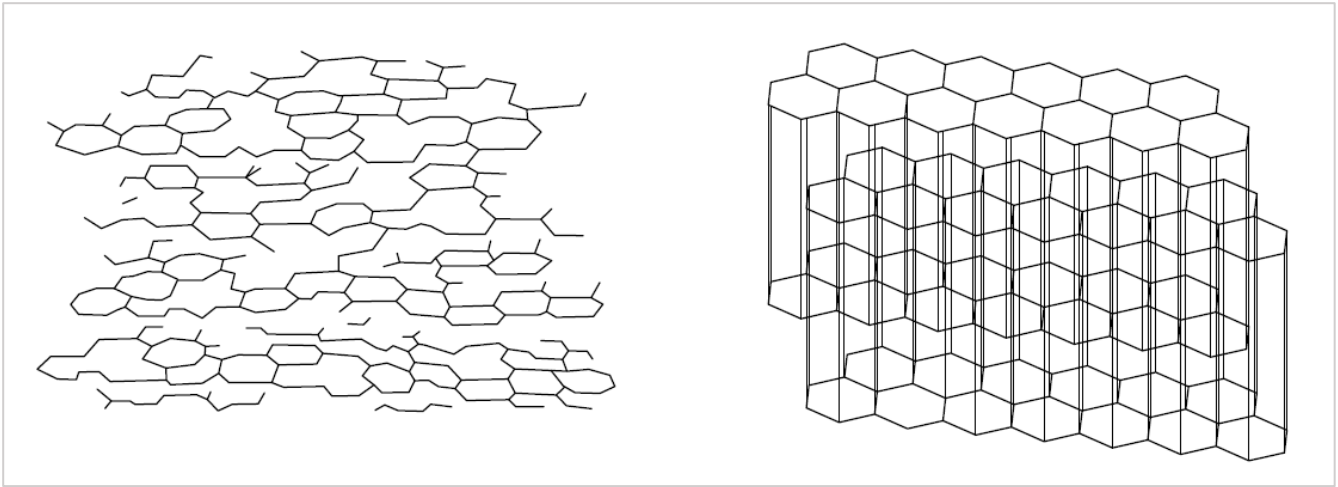


Figura 22. A la izquierda estructura de orden turbostrático (precursor PAN), a la derecha estructura de orden grafitica (precursor alquitrán).

La microestructura de las fibras de carbono depende de los precursores utilizados y de las condiciones de procesamiento. Las propiedades de las fibras dependen directamente de la composición y de la microestructura del material. Las fibras de carbono derivadas de PAN poseen un elevado contenido de electrones deslocalizados  $\pi$  (los electrones deslocalizados son aquellos que no están asociados con un solo átomo o un único enlace covalente) y una alineación paralela de las capas de grafeno a lo largo del eje de la fibra; debido a esto, las fibras manifiestan buena conductividad térmica y eléctrica en dirección de la fibra. Su coeficiente de conductividad térmica se encuentra en un rango de 21 a 125 W/mK (Watts/(metros x Kelvin), valor cercano al de los metales. En el caso de las fibras de carbono de alquitrán de Alto Módulo, la conductividad térmica puede superar el valor de 500 W/mK a temperatura ambiente. También el valor de la conductividad eléctrica de las fibras grafitizables es cercano al de los metales. Las fibras de Alto Módulo (alquitrán) con una elevada orientación cristalina generalmente poseen mayor conductividad eléctrica que las fibras de carbono de PAN (Huang, 2009).

Las fibras de carbono poseen un negativo y bajo coeficiente de expansión térmica lineal (CLTE – coefficient of linear thermal expansion) en la dirección axial de la fibra, debido a su elevada alineación cristalina. Cuando el Módulo de Young es incrementado en dirección de la fibra, el valor absoluto de CLTE incrementa. Un CLTE negativo puede afectar el comportamiento del material en un material compuesto, al causar tensiones residuales en la interface cuando son sometidos a cambios de temperatura.

El elevado módulo de elasticidad de las fibras de carbono se relaciona con una elevada cristalinidad y una alineación regular de los cristales en la dirección de fibra; mientras que una elevada resistencia mecánica está vinculada primordialmente por los defectos y las morfologías cristalinas en las fibras. Las

fibras de carbono de alquitrán comúnmente poseen mayor módulo de elasticidad, pero menor resistencia a esfuerzos de tensión que las fibras de carbono de PAN (Huang, 2009).

Las fibras de carbono tienen baja resistencia a la compresión, debido a la débil fuerza de Van der Waals (fuerza de estabilización molecular que forma un enlace químico no covalente, en el que participan dos fuerzas: la fuerza de dispersión o atracción y la fuerza de repulsión entre las capas electrónicas de dos átomos contiguos) entre las capas de grafeno y a su estructura fibrilar. Generalmente las fibras de carbono de alquitrán poseen menor resistencia a la compresión que las fibras de carbono de PAN. En la Tabla 10 se muestran valores generales de las propiedades mecánicas de los tipos de fibras de carbono más utilizados comercialmente.

Precursor de la fibra	Densidad	Módulo de elasticidad (Módulo de Young)	Resistencia a la tensión
<b>Rayón (celulosa)</b>	1,400 kg/m <sup>3</sup>	(38 GPa) 38,775.5 kg/cm <sup>2</sup>	(740 MPa) 7,551 kg/cm <sup>2</sup>
<b>PAN (Poliacrilonitrilo)</b>	1,810 kg/m <sup>3</sup>	(314 GPa) 320,408.16 kg/cm <sup>2</sup>	(3,600 MPa) 36,734.7 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Alquitrán</b>	2,050 kg/m <sup>3</sup>	(571 GPa) 571,428.57 kg/cm <sup>2</sup>	(2,700 MPa) 27,551 kg/cm <sup>2</sup>

*Tabla 10. Datos de propiedades mecánicas de diversos tipos de fibras de carbono, valores de densidad, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión (Garduño, 2017).*

## **Resinas epóxicas**

Las resinas epóxicas son una familia de polímeros termoestables, los cuales se endurecen al ser mezclados con un catalizador y no generan productos de reacción durante el curado (entrecruzamiento), por lo que tienen poca contracción al curar. Su estado varía desde líquidos de baja viscosidad hasta compuestos de alta temperatura de fusión. En la industria de polímeros son de gran importancia debido a su carácter polifuncional y por su capacidad de formar productos de adición con un gran número de sustancias sin generar productos de descomposición (Montaño, 2002).



El curado consiste en la polimerización cruzada mediante reactivos bifuncionales o trifuncionales, denominados endurecedores, los cuales al reaccionar con los grupos epoxi terminales y con los grupos OH interiores, forman puentes entre las cadenas, creando redes de macromoléculas tridimensionales muy resistentes.

En la industria de la Construcción, la mayoría de los productos epóxicos se basan en resinas epóxicas líquidas con curado a temperatura ambiente donde el entrecruzado se lleva a cabo por la adición de agentes de curado. A partir de la década de 1950 se emplearon de manera comercial, siendo actualmente una de las familias de polímeros de condensación más importantes. Debido a la necesidad de mejorar las propiedades de los polímeros para su aplicación en la industria, actualmente encontramos resinas epóxicas resistentes a la humedad, al fuego, con buenas propiedades mecánicas y sistemas de curado más eficientes (Montaño, 2002).

Uno de los primeros usos de las resinas epóxicas en la construcción como adhesivo fue la técnica de inyección para restauraciones. Posteriormente su utilizó para la adhesión de tuercas, tornillos y para el endurecimiento del concreto. En 1957 se empleó el concreto con resina epóxica para la reparación del desgaste sufrido en zonas de superficie amplias de los puentes. En la actualidad los productos basados en resinas epóxicas más comunes en la construcción son: recubrimientos de alta dureza con resistencia al agua y a productos químicos, capas de fino espesor no resbaladizas para carreteras, morteros de rehabilitación, adhesivos estructurales e inyección para la reparación de fisuras y grietas (Montaño, 2002).

Debido a la combinación de diversas resinas epóxicas con diferente peso molecular, tipo y reactividad, se ha obtenido una gran variedad de productos para su aplicación en la industria de la Construcción. En la Tabla 11 se muestran las aplicaciones más comunes de las resinas epóxicas y sus propiedades.

<b>Aplicaciones de las resinas epóxicas en la industria de la Construcción</b>		
<b>Producto</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Áreas de aplicación</b>
Adhesivo estructural	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente adhesión al cemento y al acero.</li> <li>- Posibilidad de curado en condiciones de humedad.</li> <li>- Tiempos diferentes de curado según el ambiente.</li> </ul>	Concreto adhesivo de alta dureza.

Adhesivo de uso general	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adhesión de madera, rocas, metales, plásticos y cerámicos.</li> </ul>	Aplicaciones de adhesión.
Adhesivo especial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta resistencia mecánica.</li> <li>- Resistencia química.</li> </ul>	Adhesión de cerámicos a superficies de concreto y acero.
Sistemas de inyección en fisuras y grietas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adhesión al concreto en condiciones secas y de humedad.</li> <li>- Posibilidad de curado a bajas temperaturas (cercana a punto de congelación).</li> <li>- Resistencia mecánica.</li> </ul>	Fisuras y grietas estáticas en estructuras de concreto.
Recubrimientos existentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran cantidad de colores.</li> <li>- Resistencia a la corrosión.</li> <li>- Resistencia a disolventes.</li> <li>- Adhesión excelente.</li> </ul>	Tanques de agua potable, industria alimentaria, tuberías y cañerías.
Suelos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excelente adhesión al cemento.</li> <li>- Alta resistencia al impacto.</li> <li>- Resistencia a la abrasión.</li> <li>- Resistencia química.</li> </ul>	Aplicaciones en diversos tipos de suelos.
Anclajes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adhesión a sustratos secos y húmedos.</li> <li>- Elevada resistencia mecánica.</li> <li>- Resistencia a la hidrólisis alcalina.</li> <li>- Corto tiempo de curado.</li> </ul>	Anclajes de pretensados, minas, túneles, Ingeniería Civil.
Sistemas antideslizantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resistencia al deslizamiento.</li> <li>- Resistencia al agua, ácidos diluidos antideslizantes y álcalis.</li> </ul>	Superficies y pavimentos.

Tabla 11. Productos utilizados en la industria de la construcción basados en resinas epóxicas, áreas de aplicación y propiedades (Montaño, 2002).

### **Tipos de resinas epóxicas comerciales.**

Las resinas epóxicas comerciales se caracterizan por poseer dos o más grupos epóxicos por molécula. Las resinas epóxicas comerciales más utilizadas son (Montaño, 2002) :

- Resinas del bisfenol A: Compuesta por éter diglicídico del bisfenol A (DGEBA), producto de la reacción del bisfenol A y la epiclorhidrina en presencia de hidróxido sódico. Esta resina posee buenas propiedades mecánicas como a dureza y rigidez, alta temperatura de servicio y elevada resistencia química.
- Resinas del bisfenol F: La reacción entre el bisfenol F y la epiclorhidrina produce una resina compuesta de una mezcla de isómeros (orto-orto, orto-para y para-para). Sus propiedades son similares a las resinas del bisfenol A, pero con mayor resistencia a los ácidos.
- Poliaminas alifáticas: Son de alta reactividad y de curado rápido, con buena resistencia química a excepción de los ácidos orgánicos, son relativamente tóxicas. Las más comunes son la dietiltriamina (DETA) y la trietiltriamina (TETA). Se aplican en la Ingeniería Civil en sistemas de reparación, suelos, adhesivos y recubrimientos sólidos.
- Aminas cicloalifáticas: Son sensibles al agua y no curan enteramente a temperatura ambiente por lo que deben ser modificadas ligeramente. Se obtiene un buen adhesivo con excelente resistencia química. Se utilizan como recubrimientos y para adherir cerámicas y películas a suelos.
- Aminas aromáticas: Comúnmente son sólidas. Debido a que tienen una lenta reactividad es necesario modificarlas para aplicaciones en la construcción en temperaturas exteriores. Poseen buena resistencia a ácidos y disolventes, tienen buena adhesión.
- Poliamidas: Poseen baja toxicidad, buena flexibilidad, buena adhesión y resistencia a la humedad, con menor resistencia química que las demás resinas epóxicas. Su aplicación es en resinas para adherir losetas cerámicas.

### **Agentes de curado para resinas epóxicas.**

Los agentes de curado son endurecedores que convierten los polímeros en compuestos termoestables. La reacción se basa en el entrecruzamiento entre cadenas con enlaces primarios. Actualmente hay gran variedad de agentes de curado para las resinas epóxicas. Las condiciones climáticas extremas de hasta 100% de humedad y de temperaturas inferiores a los 0° C, limitan el número de agentes eficaces. El agente utilizado en la reacción determina el tipo de enlace producido en el entrecruzamiento, por lo que

los endurecedores son los que determinan la resistencia mecánica, química, resistencia al calor y las propiedades eléctricas del producto final (Montaño, 2002).



*Figura 23. Ejemplo de aplicación de resina epóxica en material compuesto del proyecto de investigación.*

### **Propiedades de las resinas epóxicas curadas.**

Las propiedades de las resinas epóxicas permiten conocer las características y el comportamiento del material, para poder ser empleado de manera más eficaz al aplicarse sobre la superficie planteada. Las principales propiedades analizadas para el uso de estas sustancias son químicas, mecánicas, térmicas y eléctricas (Montaño, 2002).

#### ***Adhesión.***

Las resinas epóxicas poseen buena adhesión con la mayoría de los materiales utilizados en la construcción, como el concreto, maderas, metales, vidrios, cerámicos, entre otros. Para obtener una buena adhesión, es necesario la preparación de la superficie del material.

#### ***Resistencia química.***

La resistencia química depende del agente de curado utilizado, el cual puede ser elaborado buscando un uso determinado. Los sistemas con estructura molecular más complicada poseen mayor estabilidad térmica y mayor resistencia química. La mayoría de las resinas son resistentes a las bases, disolventes y ácidos (con excepción de los más oxidantes).

### ***Resistencia a la abrasión.***

Las resinas epóxicas se caracterizan por poseer elevada resistencia a la abrasión. El valor de resistencia a la abrasión varía en función de la formulación y las condiciones de servicio para el producto final. Un aditivo de relleno como la sílice aumenta la dureza superficial del producto.

### ***Resistencia mecánica.***

La mayoría de las resinas epóxicas presentan buen comportamiento de resistencia mecánica. Poseen buenas propiedades a esfuerzos de compresión, tensión y flexión.

### ***Propiedades eléctricas.***

Se caracterizan por ser buenos aislantes eléctricos. Al agregar aditivos no conductores se aumenta la resistencia eléctrica u la constante eléctrica de la resina. Si se adicionan materiales polares, sus propiedades de aislamiento eléctrico disminuyen, llegando a convertir la resina en un sistema conductor.

### ***Resistencia al choque térmico.***

Algunas resinas epóxicas, principalmente las resinas flexibles o con aditivos específicos, poseen elevada resistencia a cambios drásticos de temperatura sin sufrir ruptura. En el caso de las resinas rígidas, esta resistencia es notablemente menor. En el caso de las resinas epóxicas flexibles especiales, pueden llegar a soportar ciclos térmicos repetidos, desde 180 °C a -70 °C sin fallar.

### ***Estabilidad térmica.***

La aplicación de altas temperaturas puede provocar pérdidas de resistencia mecánica y posibles agrietamientos en las resinas epóxicas. La estabilidad térmica de una resina epóxica varía en función de su composición química, algunas pueden resistir elevadas temperaturas sin modificar sus propiedades.

### ***Adhesivos epóxicos.***

La aplicación de las resinas epóxicas adhesivas en la industria de la Construcción se incrementó de manera considerable en los años sesenta. Esto se debe a la gran capacidad que tienen las resinas epóxicas para la unión de gran cantidad de materiales (a excepción de algunos termoplásticos); además de poseer alta resistencia química, térmica y mecánica; en diferentes condiciones climáticas. En la Construcción, las resinas epóxicas son aplicadas a superficies como metales y aleaciones, piedras, cementos, cerámicos, vidrios y maderas (Montaño, 2002).

Para la obtención de un adhesivo epóxico es necesario la selección de un agente de curado y aditivos adecuados. El grado de curado depende principalmente de la reactividad de la resina, del agente de curado utilizado, de la mezcla preparada y de la temperatura. Para que se pueda obtener una buena adhesión, es

necesario preparar previamente la superficie del objeto a la que será aplicado el adhesivo epóxico (Montaño, 2002).

Según la composición química del adhesivo pueden obtenerse adhesivos rígidos o flexibles. Si se utilizan como agentes de curado poliamidas o polisulfuros, el adhesivo será flexible; si el agente utilizado es una amina alifática, el adhesivo será rígido. Existe una clasificación de los adhesivos epóxicos con base en el uso destinado (Montaño, 2002):

- Adhesivos estructurales: Son utilizados para adherir concretos entre sí o con otros materiales. Pueden ser aplicados sobre concretos endurecidos o concretos frescos, igualmente se utiliza para la adhesión de los anclajes de acero en el concreto armado.
- Adhesivos de uso general: Se utilizan para adherir diferentes materiales de construcción, principalmente para la reparación de daños en juntas que requieren líneas de adhesión muy finas.
- Adhesivos de cerámicos: Empleados para adherir losetas cerámicas a concreto y a acero. Poseen rápido curado por lo que pueden utilizarse en superficies verticales, además de ser resistentes al agua, detergentes, ácidos y bases.

### **Recubrimientos epóxicos.**

Los recubrimientos epóxicos son ampliamente utilizados en la construcción debido a sus propiedades de adhesión al concreto y metales, a su resistencia química, a la corrosión y a que no emite disolventes durante su curado. Se emplean usualmente en interiores ya que la exposición a la luz solar puede afectar al recubrimiento, tornándolo de un color amarillento y produciendo grietas en este. En exteriores se utilizan recubrimientos epóxicos de bajos pesos moleculares con curados a temperatura ambiente. Este curado se realiza con aminas para mejorar la resistencia química o con poliamidas para incrementar la resistencia al agua y a la intemperie (Montaño, 2002).

Los recubrimientos epóxicos laminados se emplean sobre tanques metálicos o tanques de concreto. Pueden ser reforzados por fibras de vidrio a manera de “sándwich” con orientación de las fibras en dos direcciones; las fibras reducen la contracción del compuesto y aumentan la resistencia mecánica. Existen recubrimientos epóxicos con alquitrán, los cuales poseen mejores propiedades que los recubrimientos epóxicos tradicionales. Se emplean agentes de curado como las aminas, poliamidas e isocianatos. En estas mezclas la resina aporta la plasticidad térmica y la resistencia a la intemperie, mientras que el alquitrán otorga la resistencia a la humedad (Montaño, 2002).

## Capítulo IV: Materiales compuestos

En la actualidad, las actividades humanas requieren del desarrollo de nuevos materiales o del mejoramiento de los ya existentes, para que sean aplicados y puedan satisfacer el creciente desarrollo tecnológico en diversas áreas como la industria de la Construcción, cuyas metas específicas son la producción de estructuras más resistentes, altas, ligeras y económicas. La implementación de los materiales compuestos o composites (composites en inglés) en la Arquitectura ha renovado la manera en que se proyectan y construyen las edificaciones, al facilitar y hacer más eficientes los sistemas constructivos y estructurales.

Inicialmente, para producir un material compuesto se debe tomar en cuenta el uso de aplicación que este tendrá en la industria, pudiendo ser utilizado para fines estructurales, como un panel con propiedades acústicas o propiedades térmicas, etcétera. La selección de los materiales que formaran el material compuesto proviene fundamentalmente de sus características “apropiadas” para su aplicación, es decir, las características que mejor se acoplan para satisfacer la necesidad.

Con base en este principio, se seleccionan las fases que componen un material compuesto, teniendo dos o más materiales base. Se procede a determinar la fase continua o matriz y la fase dispersa o refuerzo. La unión de ambas fases se basa en la adjudicación de propiedades que no posee uno de los materiales por sí solo, incorporando las mejores características de los materiales que lo componen.

Cabe destacar que un factor determinante en la producción de un material compuesto es la compatibilidad que existe entre las interfaces de los materiales. Esta unión puede efectuarse por simple adherencia física o a través de la formación de enlaces químicos. La imperfecta unión de las fases puede generar la creación de un material con propiedades no deseadas como alto grado de fragilidad o reacciones químicas entre las fases.

### **Definición**

Un material compuesto (composito) se define como un material multifase que es elaborado comúnmente de manera artificial (también se encuentran en la naturaleza, como lo es la madera). Es obtenido a través de la unión de dos o más materiales. Su objetivo principal es lograr la combinación de propiedades (basado en el principio de acción combinada) que no posee un material aislado e incorporar las mejores características de los materiales que lo componen. Las propiedades específicas de cada material, la

cantidad proporcional de estos, la geometría y su compatibilidad, determinan y condicionan el comportamiento estructural y mecánico del material compuesto.

Sus componentes se denominan fases, teniendo la fase continua o matriz y la fase dispersa o refuerzo. En un material compuesto, las fases constituyentes deben ser químicamente diferentes y deben estar separadas por una interface distinta. Un factor determinante en la creación de un material compuesto reside en que las partes puedan adherirse entre sí correctamente, en sus interfaces, lo cual determinará que ambas partes puedan trabajar en equipo cuando sean sometidas ante esfuerzos externos. Una fase es descrita como una porción homogénea de un sistema que tiene características físicas y químicas uniformes. En Química, una fase se explica cómo cada una de las zonas macroscópicas de una composición química y sus propiedades físicas homogéneas, que forman un sistema. Los sistemas se pueden clasificar en homogéneos (aquellos que poseen una fase) o heterogéneos (poseen dos o más fases).

Un material compuesto posee al menos dos fases, no obstante, pueden combinarse mayor cantidad de elementos con el fin de obtener un compuesto con las propiedades deseadas. Las fases se denominan como: matriz o fase continua y refuerzo o fase dispersa.

### **Matriz – Fase dispersa**

La matriz o fase continua, es aquella en la que el refuerzo queda incrustado. Su principal función es transmitir los esfuerzos hasta el refuerzo, además de brindar protección y cohesión al mismo. La matriz mantiene al refuerzo unido, ordenado, alineado y da el acabado superficial del material. Hay que mencionar que las propiedades de la matriz provienen principalmente de los elementos químicos que la componen, cuyas características básicas pueden ser observadas en la tabla periódica de los elementos. La matriz puede estar basada en los siguientes diversos tipos de materiales:

- **Matriz metálica:** Las matrices metálicas otorgan al compuesto la capacidad de ser utilizado a altas temperaturas, sin embargo, su producción es más compleja y costosa que la producción de matrices poliméricas. Se pueden clasificar en dos grupos según su aplicación:
  - **Materiales destinados para aplicaciones de corte (metales duros):** Generalmente son carburos cementados y aceros reforzados con carburos; se basan en matrices de transición (Co, Fe, Ni).



- Materiales para aplicaciones estructurales: Utilizados en la industria automotriz y en la aeronáutica. Se basan principalmente en aleaciones ligeras con base en aluminio, titanio, magnesio, cobre, níquel y sus aleaciones. Tienen propiedades de alta resistencia al desgaste, alta rigidez, alta resistencia mecánica, módulo específico y ligereza.

Ambos grupos, mencionados previamente, son materiales compuestos; sin embargo, es muy común que se consideren únicamente como materiales compuestos al segundo grupo; ya que a los primeros se le conoce también bajo la definición de metales duros, teniendo por ejemplo al acero.

- Matriz cerámica: A excepción de los concretos, estos compuestos son poco utilizados. Poseen buenas propiedades, particularmente la de tener una temperatura de servicio superior a las matrices poliméricas y metálicas. Pueden llegar a ser notoriamente más ligeros que las matrices metálicas, sin embargo, con este tipo de matrices, se obtienen materiales frágiles, no útiles para cualquier función. Tienen excelente resistencia a los esfuerzos de compresión, pero no a los de tensión. Los materiales compuestos de matrices cerámicas pueden ser clasificados en:
  - Matrices vidriosas: Producidas a partir de silicatos amorfos.
  - Cerámicos tradicionales: Producidos por alfarería y cemento.
  - Nuevas cerámicas: Basados en compuestos de óxidos y carburos, como la alúmina, que se obtiene de la bauxita y carburo de silicio producido a partir de arena y coque.
- Matriz polimérica: Actualmente son las matrices más utilizadas en las industrias. Son materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos. Debido a sus propiedades físicas, pueden ser moldeados en una gran variedad de formas, lo que simplifica la producción de piezas, a través de métodos de producción por moldeo, inyección, o extrusión, facilitando su implementación en procesos industriales de grandes volúmenes; así como los utilizados en la industria automotriz, marítima, entre otras. La principal desventaja de estos compuestos (particularmente los termoplásticos), es la limitante de uso en altas temperaturas, en cuyo caso se cambia por polímeros menos comunes como las poliamidas aromáticas, que son polímeros termofijos. Se puede clasificar en tres tipos de matrices según el polímero que se utiliza:
  - Termoplásticos. Son polímeros que típicamente tienen una manera de comportarse plástica y dúctil. Al calentarse estos polímeros, se ablandan, ablandando los enlaces en sus cadenas moleculares permitiendo un deslizamiento entre ellas, convirtiéndose en un fluido viscoso que puede ser moldeado o reciclado con facilidad mientras está caliente.

Al momento de enfriarse, sus cadenas moleculares vuelven a fortalecerse provocando una solidificación del material. Lo más importante de este tipo de polímeros es que el proceso de calentamiento para moldear y enfriamiento para solidificar, puede repetirse varias veces sin sufrir un cambio en su estructura química (bajo la teoría, más en la práctica debido a imperfecciones en el material y a desperfectos en el procesamiento es casi imposible).

- Termofijos. Estos polímeros generalmente son más resistentes y frágiles que los anteriores. Están contruidos por fuertes enlaces cruzados entre ellos, formando estructuras de redes tridimensionales. En estos materiales, una vez que sus enlaces se han formado, son difíciles de modificar por cualquier medio, ya que, si se vuelven a calentar, van a sufrir un cambio irreversible en su estructura química. Por consecuencia, el moldeo en estos materiales puede realizarse sólo una vez.
- Elastómeros. Tienen una estructura intermedia, en la cual sus enlaces permiten el reacomodo de moléculas sin romperse, permitiendo una ligera formación de enlaces cruzados en las cadenas. Esta propiedad permite que su estructura se ordene al momento de ser expuesto a una fuerza externa, y recobrando su estado amorfo al ser liberado de la misma. Este tipo de materiales tienen la capacidad de deformarse elásticamente en grandes cantidades, sin llegar a una deformación plástica o un cambio permanente.

### **Refuerzo – Fase continua**

La fase dispersa o refuerzo es aquella que se agrega a la matriz para adjudicarle propiedades que esta no posee. Comúnmente, se agregan los refuerzos para incrementar la resistencia ante esfuerzos como la tensión o la compresión, o para mejorar el comportamiento de la matriz antes temperaturas elevadas y/o la corrosión. El refuerzo puede ser agregado en forma de partículas o fibras. En la Figura 24 se muestra una clasificación de los materiales compuestos con base en los tipos de refuerzo:

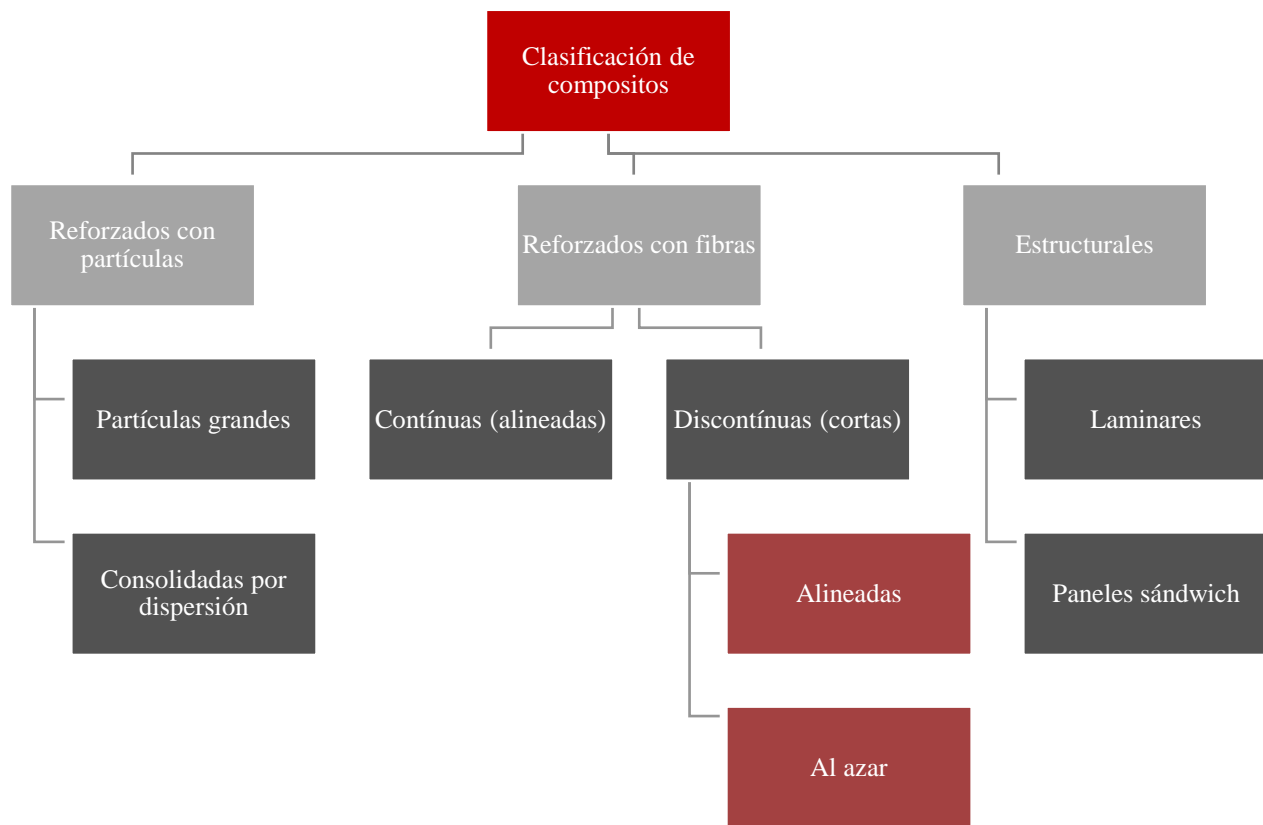


Figura 24. Clasificación de los materiales compuestos con base en el tipo de refuerzo.

La selección del tipo de refuerzo por emplear se basa en las características que se busquen obtener para su aplicación final; de la misma manera, el proceso de fabricación juega un papel fundamental en las propiedades resultantes del material compuesto, ya que este va condicionado al tipo de refuerzo que se utilice para fortalecer la matriz. A continuación, se desglosan las características generales de los tipos de materiales compuestos con base en su refuerzo:

- Compositos reforzados por partículas: Los compositos reforzados por partículas se clasifican en dos tipos, con base en el tipo de mecanismo de refuerzo (fortalecimiento):
  - Partículas grandes (partículas largas): El término “grande” se refiere a que las interacciones matriz – partícula no pueden ser tratadas a nivel atómico o molecular, sino que la interacción se lleva continuamente por medios mecánicos. Comúnmente la fase de partículas es más dura y rígida que la matriz. Las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la fase matriz en la región de cada partícula (medios mecánicos). La matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales resisten una

fracción de la carga. El grado de refuerzo (mejoramiento del comportamiento mecánico) depende de la fuerza de unión en la interface matriz – partícula.

- Fortalecidas por dispersión: Las partículas son mucho más pequeñas que las anteriores, con diámetros de 0.01 a 0.1  $\mu\text{m}$ . Las interacciones partícula – matriz, que generan el fortalecimiento, ocurren a nivel atómico o molecular. Mientras que la matriz soporta la mayor porción de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas impiden el movimiento de dislocaciones. Por lo tanto, la deformación plástica es restringida, de manera que la resistencia a tensión, el módulo de elasticidad y la dureza son mejorados.
- Compositos reforzados por fibras: Las fibras son elementos filiformes que tienen una longitud elevada en relación con su dimensión transversal máxima. Se caracterizan por su flexibilidad y finura, sus cadenas moleculares están extendidas en línea recta (o casi recta) una al lado de la otra a lo largo de un mismo eje (eje axial). Generalmente el compuesto químico que las conforma tiene una estructura ordenada, es decir, cristalina, lo que le permite tener extensiones muy largas. Estas características de geometría les dan propiedades particularmente útiles a las fibras, puesto que la mayoría son muy flexibles y resistentes a esfuerzos de tensión en paralelo a la fibra, es decir, que son buenas cuando son elongadas en dirección de su eje axial.

A pesar de sus buenas propiedades mecánicas en los aspectos mencionados, poseen las desventajas de poseer baja resistencia a esfuerzos de compresión, es decir, cuando se comprimen son fácilmente deformadas o quebradas oponiendo poca resistencia; igualmente, son débiles cuando son sometidas a esfuerzos de tensión en perpendicular a la fibra, es decir, estirándolas en el sentido transversal del eje axial de la fibra. Son elementos potencialmente buenos para utilizar como refuerzo en materiales compuestos, en los que los materiales de matriz tienen propiedades mecánicas distintas a las fibras, complementándose mutuamente, pues los esfuerzos de tensión son absorbidos por las fibras, mientras que los esfuerzos a compresión son absorbidos por la matriz.

### **Teoría de las fibras de refuerzo.**

Cuando es desarrollado un material compuesto reforzado con fibras, es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros, que determinarán el comportamiento mecánico y las propiedades del material:

La relación entre la longitud y el diámetro de las fibras, ya que a estas son transmitidas los esfuerzos.

- Las matrices reforzadas con fibras mejoran la resistencia a la fatiga del material, además de que este obtiene mayor rigidez y mejor resistencia a esfuerzos de tensión, a través de la longitud de fibra crítica.
  - Importancia de las cargas aplicadas y de cómo la matriz transmite los esfuerzos a la fase dispersa.
  - Las fibras con mayor longitud toleran mejor los esfuerzos aplicados a tensión (fibras continuas).
  - Las fibras continuas tienden a utilizarse alineadas, mientras que las fibras cortas se aplican de manera aleatoria.
  - Las propiedades mecánicas de un material compuesto aumentan si la distribución de las fibras es uniforme.
  - El factor de proporción matriz – fibras y el tipo de refuerzo: fibras continuas alineadas, fibras discontinuas alineadas o fibras discontinuas aleatorias.
- Compositos estructurales: Un composito estructural está normalmente compuesto de materiales homogéneos y compuestos. Su característica principal es que sus propiedades generales no sólo dependen de las propiedades de los materiales constituyentes, sino también del diseño estructural de los elementos estructurales. Se clasifican en los siguientes dos tipos:
    - Compositos laminares: Un composito laminar está compuesto de láminas (hojas de dos dimensiones) o paneles que poseen en una dirección mayor resistencia que la otra, como en el caso de la madera y en los plásticos reforzados por fibras. Las capas son apiladas y subsecuentemente pegadas entre ellas, de manera que la orientación de la dirección con mayor resistencia varíe en cada lámina. Por lo tanto, un composito laminar posee relativamente alta resistencia en un número de direcciones en un plano de dos dimensiones. Sin embargo, la resistencia en cualquier dirección dada es menor en aquella si todas las fibras estuvieran orientadas en una dirección.
    - Paneles sándwich: Son compositos estructurales que están diseñados para constituirse como vigas o paneles de bajo peso, poseyendo relativamente alta rigidez y resistencia. Un panel sándwich consiste en dos láminas externas (caras) que están separadas y pegadas a un núcleo más grueso. Las caras externas están hechas de un material relativamente rígido

y fuerte, comúnmente aleaciones de aluminio, plásticos reforzados con fibras, titanio, acero o madera contrachapada; estas otorgan elevada rigidez y resistencia a la estructura; deben ser lo suficientemente gruesas para soportar los esfuerzos a tensión y compresión resultantes de la carga aplicada. El material del núcleo es ligero y generalmente posee un bajo módulo de elasticidad. Los materiales del núcleo generalmente se clasifican en tres categorías: espumas poliméricas rígidas (fenoles, epóxicas, poliuretanos), madera (madera balsa) y panales. Estructuralmente, el núcleo cumple varias funciones. Principalmente provee un soporte continuo para las caras externas. El núcleo debe poseer suficiente resistencia al cortante para soportar esfuerzos cortantes transversales; también debe ser lo suficientemente grueso para proveer alta rigidez (evitar el doblamiento del panel). Los esfuerzos a compresión y tensión en el núcleo son mucho menores que en las caras externas.

## **Interface**

La interface (intercara o interfaz) se define como la superficie existente entre la matriz y el refuerzo; su función primordial es garantizar la unión entre las fases constituyentes del material. La superficie de la interface es buena cuando el refuerzo está fuertemente unido a la matriz. En el caso de los materiales compuestos reforzados por fibras una buena interface es vital, ya que de esto dependerán las propiedades mecánicas del material compuesto. Si existe una buena unión entre las fases, las cargas aplicadas sobre el compuesto se transmitirán desde la matriz hacia los refuerzos. Si la unión es deficiente, las fibras no cumplirán su papel de refuerzos y podrían salirse de la matriz.

En un material compuesto, para obtener un buen comportamiento mecánico, las cargas aplicadas deben ser transferidas de manera efectiva desde la matriz hacia el refuerzo a través de la interface. Debido a esto, la interface debe poseer un tamaño relativamente grande; además de que debe existir una gran adhesión entre el refuerzo y la matriz. Una falla en la interface, conocida también como desunión, puede ser deseable o no deseable, dependiendo del comportamiento mecánico del material y de requerimientos específicos.

Particularmente en los materiales compuestos, para obtener una buena impregnación de la matriz sobre el refuerzo, es preferible que la matriz se encuentre en estado fluido, al momento de unir los materiales. El grado de “mojado” o impregnabilidad se define como la capacidad que tiene la matriz en estado líquido

para extenderse sobre una superficie sólida (el refuerzo). Dependiendo de esta capacidad, la interface genera distintas propiedades en el material compuesto. La unión entre los constituyentes de un material compuesto puede ser de los siguientes tipos:

- Unión mecánica: Esta unión depende principalmente de las rugosidades de los constituyentes del material. Entre mayor es la rugosidad, la superficie de la matriz será más efectiva bajo esfuerzos cortantes.
- Unión electrostática: Se genera cuando la superficie de uno de los constituyentes posee una carga eléctrica positiva, mientras que la otra posee una carga eléctrica negativa.
- Unión química: En la unión química, la superficie del refuerzo posee grupos químicos que son compatibles con los grupos químicos de la matriz. La resistencia de la unión dependerá del número de uniones por unidad de área.
- Unión mediante interdifusión: Se forma en materiales poliméricos. La superficie del refuerzo y de la matriz poseen cadenas poliméricas que se difunden entre ellas. La resistencia de esta unión dependerá de la cantidad de entrelazamientos entre las cadenas poliméricas. Para incrementar esta resistencia se puede hacer uso de materiales adicionales como disolventes o plastificantes.

### **Procesos de fabricación de los materiales compuestos**

El proceso de manufactura de un material compuesto varía en función del tipo de matriz y del tipo de refuerzo, además de las características geométricas y de las especificaciones técnicas que se busquen en el producto final. Existen procesos que sólo son viables para manufacturar tipos específicos de objetos como tubos o perfiles, mientras que otros se enfocan en la obtención de objetos sólidos o envases. Ya que los materiales compuestos principalmente se componen de matrices poliméricas, los procesos de fabricación más desarrollados son para el procesamiento de polímeros. A continuación, se presenta una lista de los procesos de fabricación más utilizados en la manufactura de los materiales compuestos, clasificados de manera general por molde abierto y molde cerrado. (Guerrero, Dávila, & Galeas , 2011)

#### **Molde abierto.**

- Contacto (Hand Lay-up – estratificación manual): El método de contacto es la técnica más sencilla y antigua para la fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable. Una ventaja es que las resinas termoestables permiten un procesamiento sencillo y una buena

impregnación sobre el refuerzo (fibras) porque se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente. Las matrices pueden ser poliésteres, epóxicas y fenólicas.

El refuerzo puede colocarse en forma de fibras cortas, fibras continuas, tejidos o mat (no tejido); su porcentaje máximo en el material compuesto es del 40%. En la manufactura de este tipo de compuestos se han observado espacios vacíos en un porcentaje de hasta el 15%. Entre las ventajas de este método se encuentran su facilidad de operación, lo que permite la fabricación de piezas de diversos tamaños y formas, con alto contenido de refuerzo, de bajo costo y la prevención de procesos de calor. Debido a que este método ha sido utilizado por mucho tiempo, la técnica ha sido optimizada. Algunas de sus limitaciones son la implementación de gran cantidad de mano de obra, la dificultad de controlar el espesor de la pieza y la calidad del acabado. Dado que es una técnica manual, no es plausible emplearla a gran escala y los resultados dependen de la calidad del trabajador. Igualmente, se pueden liberar sustancias tóxicas al ambiente durante su desarrollo (solventes). Con este proceso se manufacturan piezas grandes como piscinas, cascos de embarcaciones, yates, paredes de autobuses, componentes de fuselaje para aviones y piezas estructurales.

- **Proyección:** El método de proyección o proyección simultánea es un método donde se proyectan de manera simultánea sobre el molde, las fibras y la resina catalizada. El equipo utilizado en la técnica de proyección consta de una máquina para cortar el roving (las fibras) y una pistola de aire comprimido para proyectar la resina. Entre las ventajas de este método se encuentran que el precio del equipo es relativamente económico y que el uso del roving es más barato que el mat. Entre sus desventajas están que la calidad de la pieza moldeada depende de la habilidad del operario, las piezas sólo tienen una cara lisa (la que se apoyó en el molde) y las piezas poseen propiedades mecánicas limitadas debido al uso de fibras cortas. Por esta técnica se generan piezas como bañeras, depósitos, cascos de barcos y piscinas.
- **Saco de vacío:** También denominado moldeo al vacío o presión de aire, esta técnica es una variante del moldeo manual; la diferencia consiste en la aplicación de vacío o presión atmosférica. En el moldeo a vacío se coloca el contramolde recubierto de una membrana estanca. Con una bomba se produce el vacío en el interior, el contramolde poroso adapta la resina al molde, favoreciendo la eliminación de las burbujas de aire. En el molde a presión atmosférica, el contramolde deformable se hincha con aire y presiona al molde principal, forzando la impregnación del refuerzo con la resina. Entre los beneficios de esta técnica destaca la distribución uniforme de la resina y la disminución de las inclusiones de aire, lo que otorga



mejores propiedades mecánicas; se puede conseguir un buen aspecto superficial de ambas caras con la implementación de un contramolde rígido. Sus desventajas son: la calidad de la pieza depende de la habilidad del operario, los moldes deben ser estancos y resistentes, las cadencias de producción son lentas. Se pueden obtener piezas como paneles sándwich y formas semiesféricas (cúpulas).

- **Presión autoclave:** Se emplea un autoclave (recipiente que permite el calentamiento y la aplicación de presión o vacío). Sobre un molde se colocan capas del material semielaborado y se recubre con una membrana ligera y estanca. El conjunto se introduce en el autoclave, donde se aplica vacío para eliminar el disolvente y se eleva la temperatura para que se realice el proceso de polimerización. Entre sus ventajas están la obtención de un producto con un espesor, apariencia y propiedades uniformes, se pueden fabricar piezas con formas complejas y la obtención de materiales con buenas propiedades mecánicas. Sus desventajas son el elevado precio del equipo de los semielaborados, las limitaciones en el tamaño de la pieza, ciclos muy longevos (en la colocación de los semielaborados y el autoclavado). Se obtienen piezas como: elementos estructurales de aviones, helicópteros, rotores y puertas.
- **Enrollamiento de filamentos:** Se utiliza una herramienta llamada mandril (prensa cilíndrica para la sujeción de objetos) que rota alrededor de su eje de giro. El refuerzo en forma de roving es introducido en un baño de resina para su impregnación y es enrollado alrededor del mandril. Entre las ventajas de este método se encuentran: se puede automatizar el proceso, las piezas poseen buenas propiedades mecánicas (se puede obtener una elevada proporción de refuerzo orientado), se pueden fabricar piezas muy grandes. Sus desventajas son: hay que extraer la pieza durante el proceso de curado y el equipo es costoso. Se obtienen piezas como mástiles de embarcaciones, palas de aerogeneradores eólicos, recipientes de alta presión.
- **Moldeo por centrifugación:** En este método se utiliza un molde en revolución, en el que se introducen continuamente el refuerzo (fibras cortadas) y la resina catalizada. La resina debe poseer baja viscosidad. La polimerización se realiza a temperatura ambiente o puede ser acelerada en un horno. Sus ventajas son la obtención de piezas con un diámetro y espesor bien definidos, el desmoldeo es sencillo por la contracción de la resina. Sus desventajas: no es posible orientar las fibras de refuerzo por lo que sus propiedades mecánicas son menores a otras técnicas y el equipo es costoso. Se obtienen piezas como tuberías, silos y fosas sépticas.

### **Molde cerrado.**

- **Moldeo por inyección:** El proceso se caracteriza por tener etapas cíclicas en las cuales el polímero es fundido y transportado a un molde cerrado donde se solidifica tomando la forma del molde. Se utiliza para el procesamiento de polímeros termoplásticos y materiales compuestos de matriz termoplástica. Existen dos maneras de incorporar las fibras de refuerzo en el material compuesto. La primera consta en la adición de las fibras al polímero mediante pultrusión para obtener pellets de aproximadamente 10 mm de longitud, los cuales son alimentados al equipo de inyección. Las piezas obtenidas poseen longitudes de fibra de 0.2 a 6 mm, debido al rompimiento de las fibras a su paso a través de la inyectora. El segundo método es acondicionar una preforma del refuerzo dentro del molde y posteriormente inyectar el polímero.

Su mayor ventaja es que permite producir grandes volúmenes y puede ser completamente automatizado con cortos ciclos de producción, disminuyendo los costos. Se obtienen además piezas complejas en un amplio rango de tamaños (5 gramos a 85 kilogramos), control dimensional bueno, buenos acabados y posibilidad de reciclado del polímero en el proceso (sobrantes). Su desventaja es la elevada inversión de capital, que incluye el costo del equipo, la puesta en marcha y el mantenimiento de este; también, el alto costo de los moldes y que sólo es factible para generar grandes volúmenes. Se utiliza a menudo en la industria automotriz, en la elaboración de bienes de consumo, partes de computadora, artículos deportivos, entre otros.

- **Inyección en resina:** El método consiste en la colocación de fibras en forma de tejido en el molde, el cual es cerrado posteriormente. Se inyecta la resina a baja presión en la cavidad, fluyendo entre las fibras hasta llenar los espacios en el molde. Una vez curada la resina se procede a desmoldar y a retirar la pieza consolidada.
- **Moldeo por inyección con relación forzada (RRIM):** El proceso consiste en un sistema de resina de curado rápido que se constituye de dos componentes que se mezclan inmediatamente antes de la inyección. Las fibras de refuerzo pueden ser colocadas en el molde cerrado previo a la inyección o pueden ser recortadas y desordenadas a uno de los componentes de la resina para formar una mezcla anterior a la inyección.
- **Pultrusión:** La técnica de pultrusión consta de un proceso continuo con alto grado de automatización. Es utilizado para generar grandes volúmenes de producción. Se emplea principalmente para matrices termoestables y en menor proporción para matrices termoplásticas. El método consiste en impregnar fibras de refuerzo en una matriz polimérica y hacerlas pasar a través de una boquilla a velocidad constante. La pieza final posee una sección transversal

constante con la forma de la boquilla del molde. Como refuerzo se utilizan filamentos continuos de fibras de vidrio, carbono y aramida; también pueden emplearse refuerzos tejidos y no tejidos para aumentar la resistencia mecánica del material en diversas direcciones. Se puede utilizar una proporción volumétrica del refuerzo de hasta el 50%. Las matrices termoestables más utilizadas son resinas de poliéster o viniléster; para la obtención de mejores acabados o propiedades eléctricas se emplean resinas epóxicas y fenólicas. Se pueden adicionar además rellenos como el carbonato de calcio y retardante de flama como trihidrato de alúmina o trióxido de antimonio. Las matrices termoplásticas más utilizadas son nylon, polipropileno y poliuretano.

El método de pultrusión posee una alta relación desempeño/costo. Las velocidades comunes de producción son de 2 a 10 ft/min. Generalmente las materias primas son de bajo costo. Las presiones y temperaturas empleadas no son elevadas, reduciendo así el costo de producción, además se permiten producir piezas de casi cualquier longitud. Sus desventajas son que sólo permite elaborar piezas de sección transversal constante y que el método no es adecuado para parte con paredes muy delgadas ya que la resistencia mecánica de las piezas es predominante en la dirección axial. Se utiliza en la elaboración de barras, vigas, perfiles rectos y tubos para el sector industrial, automotriz, comercial y en aplicaciones estructurales.

- Por prensado en frío: Técnica también denominada por “compresión”. Se utilizan moldes del tipo macho – hembra, con un diseño simple que permite la aplicación de presión de manera sencilla. Este método se utiliza en materiales termoplásticos (por compresión en caliente) y termoestables. Consiste en la intercalación de láminas de matriz y refuerzo en forma de preimpregnados en un molde que posteriormente es prensado.

Este método se utiliza para la producción a gran escala de compuestos con superficies lisas. En la industria automotriz se emplea en piezas de polipropileno reforzado con fibras naturales; también para la fabricación de compuestos híbridos tipo sándwich, generando piezas de bajo peso y con gran resistencia a la flexión. El moldeo por compresión resulta útil para la investigación y desarrollo de materiales compuestos, debido a que puede ser trabajado a pequeña escala. Las piezas obtenidas pueden ser reciclables. En sus desventajas están: sólo se pueden elaborar piezas simples como placas planas de espesor constante, no es posible fabricar estructuras de espesores muy grandes o diseños complejos, las piezas suelen necesitar de operaciones secundarias como el desbaste.

- Por compresión en caliente: También denominada compresión por vía húmeda. Consiste en calentar un molde por medio de un fluido térmico o por medio de resistencias. El tiempo de

aplicación de calor y presión depende del tiempo de polimerización de la resina (reactividad de la resina) y del espesor de la pieza. Entre sus ventajas destacan una productividad superior a la prensa en frío, se pueden conseguir piezas con buenas propiedades mecánicas ya que la técnica admite proporciones elevadas de refuerzo. Sus desventajas son: una mayor inversión que en el proceso en frío, sólo se pueden generar piezas simples. Se obtienen piezas como las placas para circuitos integrados.

### **Propiedades mecánicas de los materiales compuestos**

Las propiedades mecánicas de un material compuesto dependen principalmente de tres factores: su composición química (que depende de los elementos químicos de la matriz y el refuerzo), su método de procesamiento y la disposición del refuerzo en la matriz. Como se mencionó previamente, el modo específico de incorporación del refuerzo sobre la matriz depende de las propiedades y características que sean solicitadas por el fabricante. Cada tipo de refuerzo tendrá condiciones específicas que determinarán sus propiedades mecánicas, las cuales se mencionan abajo.

- **Materiales compuestos reforzados por partículas:**
  - **Partículas grandes:** Las partículas pueden poseer gran variedad de geometrías, sin embargo, lo ideal es que sean equiaxiales (tengan la misma dirección en todas las direcciones). En general, el comportamiento mecánico que presentan estos materiales es más eficiente en cuanto más pequeñas sean las partículas y mejor distribuidas se encuentren, además de que existe una relación proporcional entre el contenido de partículas y las propiedades mecánicas.
  - **Fortalecidas por dispersión:** La resistencia mecánica se da por la interacción entre las partículas y las dislocaciones que circulan por la matriz.
- **Materiales compuestos reforzados por fibras:** Las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados por fibras dependen tanto de las propiedades mecánicas de las fibras como del tamaño, la relación de diámetro - longitud, la orientación y la distribución de las fibras en la matriz.
  - **Longitud de la fibra:** Las cargas son transmitidas a las fibras por medio de la matriz por lo que es vital que exista una buena de adhesión entre las dos fases. Sin embargo, al aplicarse una fuerza de tensión, no se transmiten homogéneamente los esfuerzos a la fibra, siendo los extremos los menos sometidos a la carga, es decir, que en los extremos no se presenta una transmisión de carga desde la matriz. Existe una longitud de fibra crítica para

aumentar la resistencia y rigidez del material, siendo una relación entre el diámetro de la fibra, la resistencia a la tensión de la fibra, y la resistencia entre la unión matriz – fibra. Según la relación de esta medida, se determinan como fibras cortas o discontinuas cuando la longitud de la fibra es menor a 15 veces la longitud crítica y fibras largas o continuas cuando esta medida la longitud es mayor a 15 veces la longitud crítica. Entre más largas son las fibras, reciben un mayor esfuerzo, consiguiendo un material más eficaz.

- Orientación de la fibra: La orientación, concentración y distribución de las fibras influye de manera determinante en las propiedades del material. En cuanto a la orientación de las fibras se dan dos posibilidades: orientación alineada a cualquiera de los ejes (fibras continuas - comportamiento altamente anisotrópico) o desalineadas completa o parcialmente (fibras cortas).
- Compositos laminares: Los compositos laminares son isotrópicos en las dos direcciones del plano, lo cual se consigue mediante la unión de varias capas de materiales anisotrópicos, que se unen entre sí mediante un adhesivo; se acomodan de forma que la dirección de las capas varíe entre cada una de ellas.
- Paneles sándwich: En un panel tipo sándwich el núcleo posee dos funciones: separar las caras y resistir la deformación perpendicular a los planos de las caras. Además, aporta cierto grado de resistencia al cortante a lo largo de los planos perpendiculares de las caras.

### **Ensayos y evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos**

Para evaluar las propiedades mecánicas y obtener la caracterización de los materiales compuestos, comúnmente se realizan ensayos destructivos. El proceso consiste en determinar y utilizar una cantidad de las muestras del material para realizar un número de pruebas caracterizando su comportamiento mecánico. Los ensayos mecánicos se realizan en escenarios simulados y con equipo especializado, para obtener resultados con validez normalizada. Existen normas para determinar los procedimientos de caracterización mecánicas. Mundialmente encontramos institutos normalizadores como ASTM, ASME, ISO, UNE, ICONTEC, INEN, entre otros; los cuales se encargan de generar normas para diferentes propósitos, entre los que se encuentran los de caracterización del comportamiento mecánico. Las normas de la ASTM (American Society for Testing and Materials) son de las normas más utilizadas actualmente; este instituto se ha encargado de desarrollar normas para el ensayo de materiales compuestos. Entre los

análisis principales para la caracterización de los materiales compuestos ante esfuerzos mecánicos se encuentran los ensayos a esfuerzos de tensión, flexión e impacto (Guerrero, Dávila, & Galeas, 2011).

### **Ensayo a esfuerzos de tensión.**

El ensayo a esfuerzos de tensión es uno de los ensayos mecánicos más realizados. El material es deformado hasta la rotura del espécimen de prueba, mediante la aplicación de una fuerza uniaxial a tensión a lo largo del eje principal, que aumenta de manera gradual.

En los materiales compuestos reforzados con fibras, el ensayo a tensión puede ser realizado bajo las regulaciones de la norma D3039/D3039M-08; el cual se realiza utilizando una máquina universal de ensayos mecánicos. Para efectuar el ensayo debe utilizarse un elemento mecánico que garantice que la sujeción del espécimen de prueba sea adecuada, de tal manera que el deslizamiento sea mínimo; pueden utilizarse mordazas cuneiformes (mordazas con forma de cuña). A menudo se utiliza un extensómetro, el cual permite obtener resultados con un menor margen de error.

Los especímenes de prueba que son sometidos al ensayo deben tener las dimensiones específicas establecidas en la norma implementada. Además, los especímenes requieren mostrar superficies libres de defectos visibles, fisuras o imperfecciones. Las marcas ocasionadas por las y las superficies limadas deben ser “suavizadas” con un papel abrasivo. El acabado final se hará en la dirección paralela al eje largo del espécimen de prueba. En el caso de ser necesario se pueden colocar marcas sobre la superficie del espécimen de prueba; estas se harán con pinturas o tinta que no modifiquen el material.

### **Ensayo a esfuerzos de flexión.**

El ensayo a esfuerzos de flexión se puede realizar mediante la norma D7264/D7264M-07. Este método determina la rigidez a la flexión y las propiedades de resistencia de un compuesto de matriz polimérica. El procedimiento corresponde a un sistema de carga en tres puntos utilizando una carga central en una viga con apoyos simples. Las propiedades a flexión pueden variar dependiendo de la superficie del espécimen de prueba, ya que ningún laminado es perfectamente simétrico. Estas diferencias desviarán el eje neutral y los resultados pueden verse afectados incluso por la mínima asimetría presente en el laminado. De igual manera, las propiedades a flexión también pueden variar según el espesor del espécimen de prueba, los ambientes condicionantes o de las especificaciones del ensayo por el que se ejecutan las pruebas, como la velocidad de aplicación del esfuerzo. Cuando se realiza la evaluación de diversos materiales, los parámetros, mencionados previamente, deben ser equivalentes, para poder comparar todos los datos obtenidos.

En la ejecución de este tipo de ensayos se requieren comúnmente por lo menos cinco especímenes de prueba por cada condición de ensayo, a menos que se puedan obtener resultados válidos mediante el ensayo de menos especímenes, como en el caso de un diseño experimental. Las dimensiones de los especímenes de prueba de igual manera se encuentran indicadas en la normativa, además de las respectivas ecuaciones que permiten calcular los valores para determinar las propiedades a flexión analizadas. También los especímenes deben respetar las características establecidas de aspecto superficial y la ausencia de fisuras o defectos que puedan influir erradamente en los resultados del ensayo. Las marcas por operaciones de corte deben ser cuidadosamente eliminadas por una lima fina o abrasivo.

### **Ensayos de impacto.**

Generalmente se utilizan dos tipos de ensayos de impacto, mencionados a continuación:

- Ensayo de impacto mediante caída de dardo: Puede ser realizado mediante las especificaciones establecidas en la norma ASTM D5628. Una condición importante es que el área de impacto del dardo esté libre de fallas, de tal forma que los resultados obtenidos no se vean afectados. Con este método se determina la energía de falla del material, en el cual se presentan fisuras al dejar caer un dardo sobre el espécimen de prueba especificado. El procedimiento consiste en colocar el espécimen en la máquina y dejar caer el dardo. El dardo no debe golpear más de una vez al espécimen y no debe rebotar. Posteriormente se retira el espécimen y se examina si ha sufrido o no daño. Al analizar el espécimen, se considera como falla el apareamiento de una fisura en la superficie, la cual debe ser detectada a simple vista, bajo condiciones de luz normal. Se debe considerar que la energía de impacto será aquella necesaria para producir fallas en al menos 50% de los especímenes. Este criterio se tomará además para definir la altura y el peso del impactador. Es necesario observar que la falla generalmente ocurre en el lado opuesto al golpe de impacto, por lo que también es necesario revisar esa superficie.
- Ensayo para determinar la resistencia al impacto IZOD mediante péndulo: Este método se refiere a la determinación de la resistencia al impacto de materiales plásticos. La máquina utilizada en estos ensayos posee un martillo tipo péndulo; cuyo objetivo es romper el espécimen de prueba al momento del impacto y registrar la energía durante el mismo. En este método los especímenes pueden estar muescados o no. Cuando se utiliza un espécimen muescado, se genera una concentración de esfuerzos, lo que aumenta la probabilidad de una fractura frágil en lugar de dúctil. Se puede variar el lado sobre el que impacta el martillo, es decir, el martillo puede impactar sobre el lado muescado o se puede girar el espécimen 180° de tal forma que se impacte el lado que no posee la muesca. Las dimensiones de los especímenes de prueba se encuentran

especificadas en la normativa. La superficie de ensayo del espécimen debe estar libre de defectos o fisuras, para poder obtener datos certeros. Las marcas de corte deben retirarse cuidadosamente utilizando un elemento abrasivo. Cuando se utilicen especímenes con muesca, estas deben ser fabricadas cuidadosamente para que los resultados no se vean afectados por defectos de fabricación o dimensiones erróneas; se utilizan micrómetros con un comprobador de muesca, para determinar si los especímenes de prueba están correctamente manufacturados.

### **Ensayos a esfuerzos de compresión.**

El método consiste en determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas aplastantes. El espécimen de prueba es comprimido y se registra la deformación con distintas cargas. El esfuerzo y la deformación de compresión se calculan y son trazadas en un diagrama esfuerzo – deformación, utilizado para determinar el límite elástico, el límite proporcional, el punto de fluencia, el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la compresión. Algunas normas utilizadas son: ASTM C-773 (cerámicos de gran resistencia), ASTM E-9 (metales), ASTM E-209 (metales a temperaturas elevadas) y ASTM D-695 (plásticos).



## Capítulo V: Material compuesto de cartón y fibras de carbono

Con base en los capítulos anteriores, se determinaron las características y propiedades de las fases componentes que se implementarán en el proyecto de investigación. Inicialmente, según la investigación de proyectos análogos (como Shigeru Ban) y el uso que se pretende dar al producto final se hace la selección del material base, la matriz, la cual será reforzada para incrementar sus propiedades mecánicas a ciertos esfuerzos.

Fundamentada en el principio de acción combinada, se determina al cartón como el material matriz cuyas propiedades físicas y mecánicas lo hacen factible para ser aplicable a elementos estructurales ligeros que trabajen a esfuerzos de compresión; se busca mejorar su comportamiento mecánico a esfuerzos de tensión por medio de la incorporación de un tejido de fibras continuas de carbono (refuerzo), cuya disposición en la matriz será orientada con base al eje axial del tubo. La proporción de ambas fases ha sido determinada por medio de ensayos preliminares de experimentación y por el análisis de la literatura de los materiales compuestos.

Debido a que ambos materiales poseen diversa composición química, fue propuesto el uso de un tercer agente cuya función es la de aglomerante para ambas fases, una resina epóxica, ubicada en la zona de interface; de manera que se logre una unión físico – química entre las fibras de carbono y la resina, y una unión física entre el cartón y la resina (previando que pueda darse también una unión química entre estos materiales debido a los grupos hidróxidos de las fibras de celulosa), Figura 25.

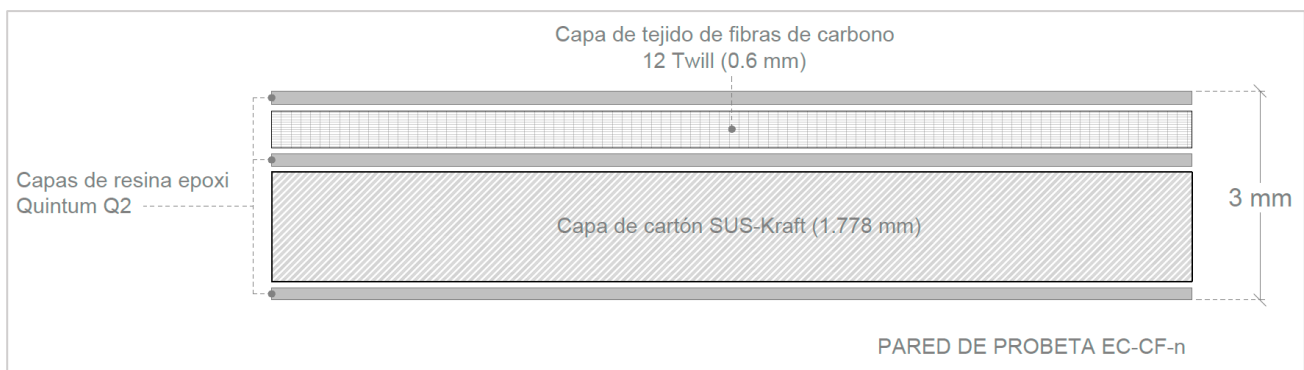


Figura 25. Disposición de las fases componentes del material compuesto en los especímenes de prueba del proyecto de investigación.

La selección de los materiales de las fases componentes, el proceso de manufactura y las propiedades físicas y mecánicas, para determinar que el material compuesto propuesto en el proyecto de investigación sea factible, se menciona a continuación; con la finalidad de que el producto pueda ser empleado en la

práctica de la Arquitectura, siendo competitivo frente a los materiales tradicionales de los sistemas constructivos y sistemas estructurales en los que se pretende aplicar.

### **Consideraciones de diseño – Ensayos de propiedades mecánicas, hídricas y deteriorativas**

El proyecto de investigación tiene por propósito el desarrollo y la aplicación práctica del material compuesto en elementos estructurales para la creación de edificaciones en Arquitectura. Debido a esto, es necesario que el material planteado cumpla con ciertos requisitos, como propiedades y estados de servicios mínimos, para su aplicación en la industria de la Construcción. Estas propiedades son traducidas en valores estándar derivados de pruebas físicas y químicas, establecidas por una autoridad en el campo. Las pruebas permiten comprobar el comportamiento del producto ante esfuerzos medibles y fenómenos específicos a los que pudiera estar sometido el material en circunstancias de aplicación práctica.

Debido a que el objetivo principal del material es que sea aplicado en elementos estructurales, el comportamiento mecánico de este ha sido el factor principal por tomar en consideración para el diseño del producto. Los resultados de los ensayos mecánicos efectuados son aquellos que determinarán las propiedades mecánicas generales (esfuerzos a tensión, esfuerzos a compresión) del material compuesto, así como su viabilidad de aplicación práctica en la Arquitectura. Aunado a esto, se plantearon ensayos de propiedades hídricas y deteriorativas como secundarios, para la recolección de mayor cantidad de información del material compuesto desarrollado. A continuación, se mencionan las propiedades que han sido analizadas para la conformación del material compuesto en el proyecto de investigación:

- **Propiedades mecánicas:** Las propiedades mecánicas seleccionadas, se deben al uso específico que se propone para el material compuesto en la geometría establecida (cilíndrica tubular); ya que la aplicación práctica de estos elementos (tubos de cartón reforzados con fibras) se prevé en barras estructurales para la composición de armaduras y estructuras espaciales; por lo que este tipo de elementos están sometidos a los siguientes tipos de esfuerzos:
  - Esfuerzos a tensión: Valores de deformación y resistencia de los especímenes por estiramiento uniaxial.
  - Esfuerzos a compresión: Valores de deformación y resistencia de los especímenes por compresión uniaxial.
- **Propiedades hídricas y deteriorativas:** En la aplicación práctica, el material compuesto como elemento constituyente de una estructura, puede estar sometido ante diversos factores del ambiente exterior como la lluvia, el viento y la radiación solar. Por esto, se planteó la necesidad

de analizar y efectuar pruebas ante los factores a continuación descritos, que pudiesen condicionar el comportamiento mecánico del material ante una aplicación práctica:

- Envejecimiento ante la intemperie: Comportamiento y deterioro del material por la radiación solar y/o por humedad en un entorno abierto.
- Absorción de humedad: Capacidad del material para absorber humedad (agua) del entorno.

### **Definición de variables dependientes e independientes**

Las variables dependientes que fueron analizadas en el desarrollo del material compuesto son las propiedades mecánicas de resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, ya que el uso del material se prevé para estructuras que están sujetas ante dichos esfuerzos. De manera general, las propiedades mecánicas de un material dependen de tres factores: la microestructura, la composición química y el procesamiento.

En el proceso de unión de las fases componentes, matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono, se ha implementado una resina epóxica como medio aglomerante en la zona de interface y como revestimiento protector de las superficies exteriores. Las propiedades mecánicas de una resina epóxica ante los esfuerzos mecánicos varía según el tipo de resina, valores proporcionados por el fabricante. Su selección se determina según los materiales a tratar, en este caso, la resina epóxica utilizada es especializada para el tejido de fibras de carbono; igualmente, es viable su uso en fibras de celulosa (cartón) debido a los grupos -OH (hidroxilos) que poseen estos materiales, favoreciendo la posible formación de enlaces químicos.

Las variables independientes que determinan la conformación del material compuesto del proyecto de investigación son las siguientes:

- Composición del material compuesto
  - Tipo de cartón: Se establecen cinco principales tipos de cartón, con base en la norma alemana DIN 19303, según su uso en la industria del papel – cartón para el embalaje e impresión.
    - Cartón plegable (Folding Boxboard – FBB)
    - Cartón sólido blanqueado (Solid Bleached Sulphate – SBS)
    - Cartón sólido no blanqueado (Solid Unbleached Board – SUB, Solid Unbleached Sulphate – SUS)

- Cartón de fibras recicladas (White Lined Chipboard – WLC)
  - Cartón para líquidos (Liquid Packaging Board – LPB)
- Tipo de fibras de carbono: Clasificadas con base en el precursor utilizado. Los valores de densidad y de las propiedades mecánicas de módulo de elasticidad y resistencia a la tensión se mencionan en la Tabla 9, del Capítulo III.
  - Rayón – celulosa
  - Poliacrilonitrilo – PAN (orden turbostrático)
  - Alquitrán (orden grafitico)
- Tipo de resina: Su selección se determina por los materiales a tratar. Se ha considerado una resina epóxica para el tratamiento de fibras de carbono.
- Estructura del material compuesto
  - Orientación de las fibras de celulosa en el cartón: En la elaboración de las láminas de cartón, las fibras de celulosa son orientadas relativamente en la Dirección de la Máquina (MD). El sentido perpendicular se denomina Dirección Transversal de Máquina (CD). El uso del cartón con las fibras de celulosa orientadas en la Dirección de Máquina presenta mejor comportamiento ante los esfuerzos mecánicos de compresión y tensión.
  - Formas geométrica del cartón (matriz): La disposición de la fase matriz de cartón determina las dimensiones y geometría del elemento estructural (vigas, columnas, barras tubulares, láminas).
  - Espesor y gramaje del cartón: Gramajes superiores a 200 g/m<sup>2</sup> por espesor mínimo de 0.5 mm.
  - de fibras de carbono: Se clasifican por el número de filamentos por fibra (1K, 3K, 6K, 12K, 18K, 24K).
  - Tipo de tejido de fibras de carbono: Twill (asargado), plano o unidireccional.
  - Disposición del cartón y las fibras de carbono, con la resina como agente aglomerante: Número de capas (por fase).
- Método de procesamiento

- Cantidad de resina (aglomerante) utilizada por porcentaje de peso y número de capas por fase.
- Tipo de elaboración de material compuesto:
  - Molde abierto: Contacto (estratificación manual), proyección, saco de vacío, presión autoclave, enrollamiento de filamentos, moldeo por centrifugación.
  - Molde cerrado: Moldeo por inyección, inyección en resina, RRIM, pultrusión, por prensado en frío, por compresión en caliente.

Con base en las variables mencionadas (composición, estructura y método de procesamiento), se hace selección de los materiales (fase matriz, fase de refuerzo, agente aglomerante en interface) implementados para la elaboración del material compuesto, así como su método de procesamiento.

### **Selección de materiales**

La selección de los materiales fase para la conformación del material compuesto ha sido realizada bajo el análisis de las propiedades de cada material, basada en valores numéricos establecidos en la literatura, por experimentos análogos y por las fichas técnicas de los fabricantes de estos materiales. El factor principal para la selección de los materiales es el comportamiento de cada material con base en sus propiedades mecánicas, debido a que el objetivo del producto final es que sea aplicado como elemento estructural para la composición de elementos estructurales. Además, se ha considerado la facilidad de adquisición de los materiales en el mercado y su relación costo – beneficio.

Se seleccionaron tres materiales base para la manufactura de los especímenes de prueba: cartón (fase matriz), fibras de carbono (fase de refuerzo) y resina epóxica (aglomerante en interface). Los motivos específicos de la selección de cada material se presentan a continuación:

#### **Cartón: Cartón sólido no blanqueado (SUS).**

Se ha optado por utilizar el cartón sólido no blanqueado (SUS) como material matriz (fase continua), para el desarrollo del material compuesto, debido a los siguientes fundamentos:

- Composición del cartón con base en el tipo de pulpa: El cartón SUS se compone de pulpa derivada de procesos químicos. Los procesos químicos de pulpado se caracterizan por la obtención de una pulpa con mayor grado de pureza, es decir, con mayor contenido de fibras de celulosa y por la eliminación de sustancias secundarias como la lignina y las hemicelulosas. La pulpa derivada del pulpado químico, posee un grado de entrelazamiento mayor al ser transformada en cartón, en

comparación a la pulpa obtenida por el proceso de pulpado mecánico; este factor da por resultado la obtención de un cartón más flexible, más denso y con mayor resistencia a esfuerzos mecánicos.

- **Ventajas del proceso químico Kraft:** Comercialmente, el cartón SUS puede ser encontrado como cartón Kraft, debido a que es derivado del proceso Kraft. Actualmente, el pulpado químico comprende aproximadamente el 82% de todos los procesos de pulpado producidos, siendo el más utilizado el proceso al sulfato (proceso Kraft). El método Kraft puede ser utilizado para procesar casi todos los tipos de madera (maderas suaves y maderas duras). Además, los agentes químicos empleados pueden ser recuperado y reutilizados en el proceso de manufactura del cartón.
- **Simplicidad del material:** Una de las ventajas del cartón SUS es su simplicidad con relación a su composición, ya que no posee aditivos o recubrimientos, los cuales puedan interferir con tratamientos que puedan ser agregados para la manufactura del material compuesto o con el comportamiento mecánico de la muestra; por este factor se descarta el uso del cartón sólido blanqueado (el cual posee una composición similar al cartón SUS). Al emplear un cartón con mayor pureza, que sólo este compuesto por fibras de celulosa, se obtiene mejor manejabilidad para que sea intervenido por la adición de otras sustancias que pudieran mejorar o incorporar nuevas propiedades; como agentes para la repelencia a la humedad. Además, en la manufactura del producto, no se buscan obtener características de apariencia como el color o textura, las cuales aumentarían el costo del material o dificultarían el manejo de este.
- **Facilidad de adquisición:** El cartón sólido no blanqueado denominado Kraft, es ampliamente utilizado en productos de la vida cotidiana, como cajas de embalaje, tubos, láminas, entre otros. Debido a su alto grado de comercialización, la facilidad de adquisición de este cartón se prevé como idóneo, para su aplicación futura en el producto propuesto en el proyecto de investigación (tubos estructurales de cartón).

### **Tejido de fibras de carbono de alta resistencia 12K.**

El material de refuerzo seleccionado es un tejido de fibras de carbono (precursor de Poliacrilonitrilo PAN) de alta resistencia, marca Quintum, modelo 12K Twill. Este material fue facilitado por el Área de Tecnologías del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM. La selección de este producto se debe a la excelente relación costo – beneficio que posee en comparación a otro tipo de fibras de carbono, como la alta resistencia a esfuerzos de tensión; la ventaja de su presentación en forma de tejido cruzado (tejido asargado – twill) que facilita su manipulación para ser incorporado sobre la matriz, ahorrando tiempo y costos; y al tipo de resina que requiere para ser aplicado, la cual es compatible con las fibras de celulosa del cartón.

### **Resina epóxica.**

Para efectuar la unión entre los materiales base del compuesto, matriz y refuerzo, es necesaria la incorporación de un agente aglomerante, cuya función principal es la creación de adherencia en la zona de interface. Para la elaboración de elementos de fibras de carbono del tejido 12K de la marca Quintum se han empleado resinas epóxicas con endurecedores.

Con el asesoramiento del Dr. Mikhail Zolotukhin, investigador del Instituto de Investigaciones en Materiales, se determinó que con el uso de resinas epóxicas se genera una buena interrelación con las fibras de celulosa, pudiéndose suscitar enlaces químicos entre los grupos hidróxidos de la resina y la celulosa, dando por resultado una buena unión entre ambos materiales. Esta primicia fue consolidada por medio de los resultados obtenidos a partir de pruebas físicas realizadas en laboratorio de la interacción de esta resina con un cartón Kraft.

### **Proceso de manufactura**

El método de manufactura del material compuesto se deriva directamente de las características específicas de dimensiones, geometría y disposición de fases del elemento a producir. En el proyecto de investigación el material compuesto, basado en una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill, se plantea utilizar en elementos estructurales para sistemas constructivos y estructurales en Arquitectura. Las características de ligereza, dimensiones, estandarización de piezas y propiedades mecánicas de resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, hacen factible su aplicación en forma de barras para elementos estructurales como armaduras planas y estructuras espaciales.

Cabe mencionar que, el método de manufactura condiciona notablemente la calidad de los elementos fabricados con el material compuesto; cuestión que se ejemplifica en la obtención de valores mayores de resistencia a esfuerzos mecánicos. Para el proyecto de investigación, se ha implementado el método de manufactura de Contacto (Hand Lay up – estratificación manual), de manera que los especímenes de prueba del material compuesto puedan ser elaborados de manera artesanal sin instrumentos especializados. Como fue mencionado en el Capítulo IV, este método de manufactura posee beneficios e inconvenientes frente a otros métodos de manufactura, debido a una falta de control precisa en la conformación de los elementos de materiales compuestos. Debido a esto, se plantea un método de manufactura automatizado con principios industriales.

Industrialmente, la manufactura de elementos estructurales del material compuesto se propone por el método de manufactura de pultrusión; proceso especificado en el Capítulo IV. El método de pultrusión consiste en un proceso automatizado continuo para la elaboración de perfiles reforzados con fibras continuas, denominados pultrusionados o perfiles RFV (Röchling, 2019).

En la elaboración de elementos estructurales del material compuesto del proyecto de investigación, se deben tomar en cuenta tres factores principales que determinan el proceso de pultrusión: la fase matriz de fibras de celulosa con resina epóxica, la fase de refuerzo de fibras de carbono y el molde de la sección transversal del perfil. Para la elaboración industrial por pultrusión de elementos estructurales, deben efectuarse las siguientes variaciones de estructura y composición del material compuesto:

- La fase matriz debe estar constituida por una masa de fibras de celulosa y resina epóxica, en lugar de láminas de cartón. La resina epóxica se convierte en parte de la fase matriz, en lugar de ser sólo un agente aglomerante.
- Las fibras de carbono pueden ser colocadas en la matriz de forma tejida (Twill, plano) o no tejida (unidireccional).
- Las fibras de carbono se disponen embebidas en la fase matriz, es decir, quedan recubiertas por la matriz en lugar de conformar la capa exterior del material compuesto.

El proceso de pultrusión del material compuesto comprende las siguientes etapas, Figura 26:

1. Colocación del refuerzo de fibras de carbono en áreas de embobinado.
2. Tanque de impregnación de la fase matriz de fibras de celulosa con resina epóxica. Las fibras son conducidas en el tanque, permitiendo la impregnación de estas con la fase matriz.
3. Etapa de molde. El compuesto formado es calentado en el molde y es elaborado con la geometría del perfil deseada.
4. Extracción en tándem: El perfil es extraído de manera continua, variando la velocidad del proceso en función del secado de la fase matriz y la sección del perfil.
5. Etapa de corte: El perfil es seccionado con la longitud especificada para conformar elementos estructurales.



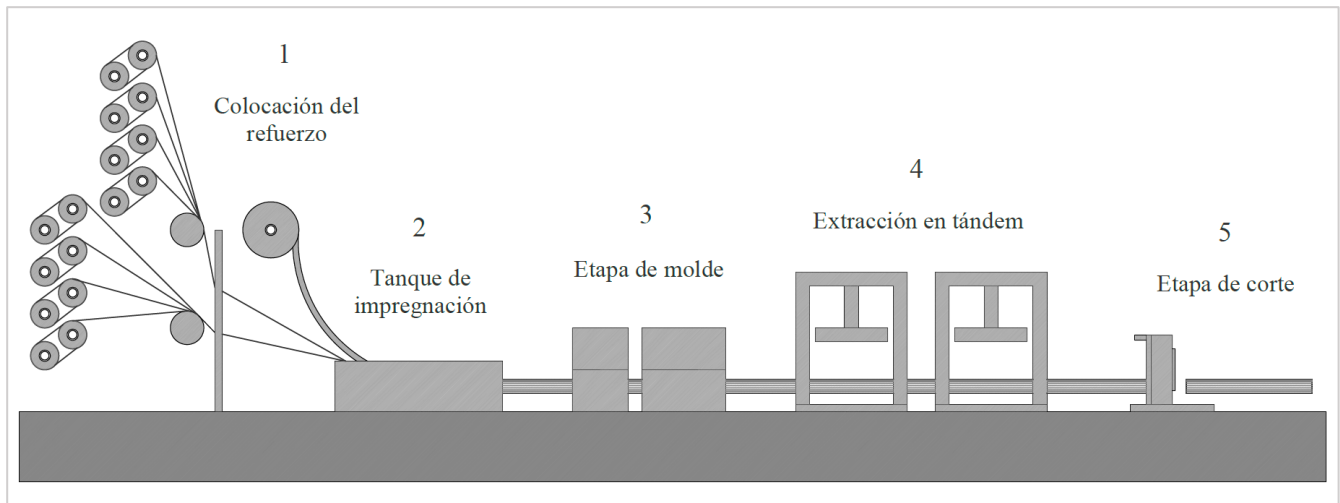


Figura 26. Proceso de manufactura por método de pultrusión de elementos estructurales del material compuesto.

### Propiedades físicas y mecánicas del material compuesto

En el desarrollo de la investigación se han contemplado las características de composición química, microestructura y procesos de procesamiento de las fases componentes (matriz, refuerzo y agente aglomerante en interface) que determinan las propiedades resultantes del material compuesto. Considerando que el propósito primordial del material compuesto es su aplicación en elementos estructurales para la Arquitectura, las propiedades físicas y mecánicas se establecen como los principales factores de análisis en la elaboración y ensayo del material compuesto. Las propiedades físicas y mecánicas que han sido analizadas son:

- **Rigidez:** Se analiza el cambio de la rigidez de la fase matriz de cartón al incorporar la resina epóxica como recubrimiento y al unir la fase matriz de cartón con el refuerzo de fibras de carbono para la conformación del material compuesto.
- **Ductilidad:** La fase matriz de cartón y el tejido de fibras de carbono se caracterizan por poseer un comportamiento y fallas de tipo dúctil.
- **Fragilidad:** La aplicación de la resina epóxica sobre las fases puede propiciar las fallas de tipo frágil al aumentar la rigidez del material.
- **Resistencia a esfuerzos de compresión:** Se prevé que la fase matriz de cartón funja como base del material compuesto, otorgando la estabilidad del material compuesto para soportar esfuerzos a compresión.

- Resistencia a esfuerzos de tensión: La incorporación de las fibras de carbono en la fase matriz de cartón, genera el incremento de la resistencia a esfuerzos de tensión en el material compuesto; permitiendo el uso de este en elementos estructurales que trabajen a dichos esfuerzos.
- Comportamiento elástico: Por sus características de microestructura la fase matriz de cartón no posee un comportamiento elástico definido, a diferencia de la fase de refuerzo y la resina epóxica. Se analiza el comportamiento elástico del material al efectuar la unión de las fases componentes.
- Comportamiento plástico: Se determina el grado de deformación y resistencia del material compuesto al efectuar la unión de las fases componentes, hasta la ruptura (en ensayo a esfuerzos de tensión).

### **Comportamiento esperado del material compuesto y su aplicación en Arquitectura**

Por medio del análisis de las propiedades físicas y mecánicas y los métodos de manufactura de las fases componentes (matriz de cartón, refuerzo de fibras de carbono, aglomerante de resina epóxica), se puede prever el comportamiento mecánico del material compuesto, así como su factible aplicación práctica en la Arquitectura.

El cartón ha sido implementado en la industria de la Construcción como material para elementos estructurales que trabajen a esfuerzos de compresión; debido a las características de microestructura que conforman al material (redes entrelazadas de fibras de celulosa). Estas características pueden ser modificadas con el fin de obtener mayor resistencia ante esfuerzos mecánicos, al incrementar el grado de compactación (gramaje – espesor) y la alineación de las fibras de celulosa. A nivel de macroestructura, el cartón se conforma como un material sólido, lo que permite su función como fase matriz al determinar la geometría y dimensiones de los elementos del material compuesto. Cabe mencionar, que el cartón utilizado se caracteriza por tener relativamente baja rigidez y un comportamiento dúctil.

La aplicación de la resina epóxica en el cartón como recubrimiento protector, impregna las fibras de celulosa, rellenando las oquedades de las redes entrelazadas; condición que consolida un material con mayor densidad y rigidez en comparación al cartón aislado. Al incrementar la rigidez de las capas impregnadas con resina, el comportamiento dúctil del material es transformado a un comportamiento de tipo frágil (el grado de fragilidad depende del tipo de resina implementada). En caso de que la resistencia mecánica de la resina epóxica sea mayor a la del cartón, la unión de ambos materiales puede generar un incremento en la resistencia a esfuerzos de compresión y tensión del cartón recubierto con resina epóxica.

Basada en la literatura de Ingeniería de materiales, la unión de una fase matriz de cartón y un refuerzo de fibras de carbono, conforma un material compuesto con la combinación de propiedades que no posee una fase aislada, incorporando las mejores características de los materiales que lo constituyen. Al incorporar las fibras de carbono como fase de refuerzo, sus propiedades mecánicas, permiten incrementar la resistencia a esfuerzos de tensión de la matriz de cartón; posibilitando así su uso en elementos estructurales que trabajen a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión.

Un factor determinante en la conformación del material compuesto es la orientación de las fibras de carbono en la fase matriz de cartón. Para la obtención óptima de las propiedades de resistencia a la tensión de las fibras de carbono, su orientación debe permanecer en el sentido de la aplicación del esfuerzo; siendo en el caso del material compuesto de la investigación, en el sentido del eje axial de los elementos estructurales. En el proyecto de investigación se plantea hacer uso de un tejido de fibras de carbono 12K Twill, de manera que la mitad de las fibras se encuentran orientadas en el sentido del eje axial de los especímenes de prueba; la otra mitad se dispone perpendicular al eje axial, funcionando como cinturón de contención (encamisado) para el material compuesto. Para efectuar la unión de la fase matriz y fase de refuerzo la resina epóxica es implementada en mayor cantidad, fungiendo tanto como agente aglomerante en interfaces como recubrimiento protector para intemperismo; cuestión que repercute en el incremento de la rigidez y fragilidad del material compuesto resultante.

Con base en las propiedades resultantes del material compuesto, se prevé que pueda ser implementado para elementos estructurales en Arquitectura, que se caractericen por ser de baja densidad y que trabajen a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión. Debido al costo elevado de los materiales de las fases componentes y a la relativa complejidad del proceso de fabricación, se plantea que el uso principal del material compuesto sea para elementos estructurales reducidos y estandarizables, como armaduras planas y estructuras espaciales tridimensionales; conformando así, sistemas estructurales ligeros para grandes claros. Como uso secundario en la Arquitectura, se anticipa que el material compuesto pueda ser implementado en la conformación de puntales, andamios y cimbras.

## Capítulo VI: Protocolo de experimentación

El proceso de experimentación ha sido planteado con un enfoque cuantitativo de tipo experimental. El libro Metodología de la Investigación de Hernández Sampieri, establece un proceso secuencial para el desarrollo de investigaciones con enfoque cuantitativo, el cual ha sido tomado en la investigación. La investigación cumple un tipo de diseño experimental, al haber establecido las variables independientes y las variables dependientes que son manipuladas para ser medidas en un ambiente controlado. Por lo tanto, para realizar un proceso de experimentación válido que englobe los conceptos mencionados previamente, se utilizará el método científico. En el siguiente apartado, se procede a mencionar las variables seleccionadas para realizar el proceso de experimentación.

### Variables de experimentación

Las variables independientes seleccionadas que fueron implementadas para la elaboración de los especímenes de prueba y el ensayo del material compuesto, se presentan en la Tabla 12. Algunas variables de composición, estructura y procesamiento, fueron designadas por principios teóricos de la Literatura, con el objetivo de seleccionar las condiciones de los materiales que logran la mayor resistencia a los esfuerzos mecánicos de compresión y tensión en el material compuesto ya aplicado a un elemento estructural. Igualmente, se ha realizado el análisis de las propiedades hídricas y deteriorativas (absorción de humedad y envejecimiento ante la intemperie), que se prevén fundamentales para el uso del material compuesto en elementos estructurales. Estas propiedades dependerán principalmente del medio aglomerante, resina epóxica, la cual se dispone como primera barrera ante el entorno exterior. Posteriormente la resistencia ante estas propiedades dependerá de la resistencia aislada de cada material (cartón, fibras de carbono) y de la adherencia en la zona de interface.

Variables independientes	Variables dependientes
<b>Composición del material compuesto</b>	Propiedades mecánicas:
<ul style="list-style-type: none"><li>• Tipo de cartón: Cartón Kraft-SUS, de maderas suaves, compuesto por fibras de celulosa largas, con elevada resistencia mecánica.</li></ul>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de fibras de carbono: Fibras de carbono PAN, buena relación entre resistencia a esfuerzos y tensión y economía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia a esfuerzos de compresión</li> <li>• Resistencia a esfuerzos de tensión</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipos de resina: Resina epóxica Quintum Q2 y Resineco FV, especiales para fibras de carbono, de media viscosidad y buena resistencia a esfuerzos mecánicos.</li> </ul>	
<b>Microestructura de materiales y estructura de producto</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientación de las fibras de celulosa en el cartón: Orientación en eje axial para obtener mayor resistencia en el elemento estructural (material anisotrópico).</li> </ul>	Propiedades hídricas:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma geométrica del cartón: En forma de tubos, por aplicación en elementos estructurales ligeros en armaduras.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorción de humedad</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espesores de pared (mm): 1.778 mm (0.07 pulgadas) y 1.524 mm (0.06 pulgadas).</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gramaje del cartón multicapa (g/m<sup>2</sup>): 1,350 g/m<sup>2</sup>.</li> </ul>	Propiedades deteriorativas:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medida de fibras de carbono: 12K (12 mil filamentos por fibra).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envejecimiento ante la intemperie</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de tejido de fibras de carbono: Tejido cruzado tipo Twill.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposición del cartón y las fibras de carbono (junto con la resina) para la elaboración de las especímenes de prueba (número de capas): Orientación en sentido ortogonal (90°), con una capa de cartón y una capa de fibras de carbono.</li> </ul>	Aplicación en el proyecto arquitectónico en elementos estructurales de baja densidad para estructuras de gran claro
<b>Procesamiento</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de resina utilizada: 3 capas de resina epóxica (6 gramos por capa), en total 18 gramos por especímenes de prueba.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de elaboración de material compuesto: Por contacto (Hand Lay-up) – estratificación manual, con brocha.</li> </ul>	

Tabla 12. Variables independientes seleccionadas para el proceso experimental del ensayo del material compuesto de cartón y fibras de carbono.

## Normativa

Para la obtención de valores y pruebas válidos de las propiedades previamente descritas del material compuesto, se ha utilizado la regulación de procedimientos para materiales establecida por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM – American Society for Testing and Materials, haciendo uso de los métodos de ensayo establecidos en la normativa ASTM, así como las especificaciones técnicas para la manufactura de los especímenes de prueba. Debido a que actualmente no existe una norma que establezca de manera exacta la manufactura y el ensayo del material compuesto del proyecto de investigación, se han utilizado las normas implementadas en materiales similares y en las aplicaciones de estos como elementos estructurales (tubos y barras estructurales de la Construcción). Las normas que han sido tomadas como referencia son las siguientes:

- Normas de ensayos mecánicos: Para obtener los valores del comportamiento mecánico del material compuesto, se ha propuesto el uso de las normas ASTM relacionadas a tubos estructurales de acero, debido al uso y comportamiento similar que tendría el material en su aplicación como elemento estructural para armaduras y estructuras espaciales.
  - Norma ASTM A500 / A500M (Especificación estándar para tubos estructurales de acero al carbono sin costura y soldados conformados en frío redondos y con formas): Se ha empleado para la manufactura del material en forma de tubos cilíndricos, cuyo fundamento proviene de la aplicación del material en elementos estructurales ligeros para la creación de armaduras y/o estructuras espaciales.
  - Norma ASTM A370 (Métodos y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero de prueba estándar): Se aplican los parámetros designados en esta norma debido a lo establecido en la norma A500, para prueba de elementos tubulares estructurales. Los valores de las propiedades mecánicas de la norma A370 obtenidos para el proyecto de investigación, son de resistencia a esfuerzos de tensión.
  - Norma ASTM E9 (Métodos de prueba estándar de ensayos de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente): Para complementar los métodos de ensayo mecánicos de la aplicación del material y siguiendo el tipo de normativa con base en elementos tubulares estructurales metálicos de las normas previas, se ha utilizado la norma E9, para determinar los valores de esfuerzo del material ante cargas a compresión.
  - Norma ASTM D38 (Método de prueba estándar para la tracción propiedades de los plásticos): Se ha empleado esta norma para el segundo tipo de ensayo para la determinación de los esfuerzos a tensión del material compuesto (ET2); sometido a prueba

con una geometría de prisma rectangular, obtenida de una sección del perfil tubular. Esta norma es implementada para el ensayo de materiales compuestos que contengan fases poliméricas, siendo las utilizadas en el material del proyecto de investigación.

- Normas para propiedades hídricas y deteriorativas: El material que se encuentra en mayor cantidad dentro del compuesto es el cartón (matriz), cuya composición se basa en fibras de celulosa, pudiendo clasificarlo como un biopolímero; además, las fibras de celulosa son clasificadas como materiales poliméricos debido a los precursores por las cuales son generadas. Con base en estos puntos las normas empleadas para el análisis de las propiedades hídricas y deteriorativas, han sido las de los plásticos.
  - Norma ASTM D570 (Método de prueba estándar para la absorción de agua de plásticos).
  - Norma ASTM G154 (Práctica estándar para funcionamiento fluorescente ultravioleta UV. Aparato de la lámpara para exposición de materiales no metálicos).

## **Fichas técnicas de materiales**

### **Cartón Kraft (cartón sólido no blanqueado SUS) – Matriz (fase continua).**

El uso del cartón en la manufactura de los especímenes de prueba se efectúa en forma de tubos cilíndricos. Los tubos de cartón han sido empleados como base primaria para la manufactura del compuesto; su propia geometría dada por el proceso de manufactura ha sido planteada en la aplicación del producto final (elemento estructural). La función principal del tubo de cartón es proveer la rigidez del elemento y la forma geométrica sobre la cual se enrollarán las siguientes capas del material.

#### ***Tubos de cartón Kraft.***

Los tubos de cartón han sido elaborados a partir de láminas de cartón Kraft (SUS) por medio del proceso de devanado en espiral. Se han empleado dos marcas de tubos de cartón para la realización de los ensayos mecánicos. Los tubos marca Uline presentan un ángulo de inclinación de lámina de 38° al eje axial, utilizados en los ensayos EC1 y ET1. Los tubos marca Ratioform poseen un ángulo de inclinación de lámina de 41° al eje axial utilizados en los ensayos EC2 y ET2. El ángulo de inclinación de lámina ha sido determinado con base en el espesor del tubo y el proceso de manufactura de cada empresa. Las dimensiones de los tubos se basan en la norma ASTM A500-03a, la cual establece un perímetro total del elemento tubular igual o menor a 1626 mm (64 in) y un espesor de la pared igual o menor a 15.88 mm (0.625 in), Tabla 13.

Los valores de esfuerzos mecánicos aquí presentados provienen de los análisis realizados en investigaciones análogas, siendo las pruebas mecánicas a tubos de cartón efectuadas para la creación de las estructuras del Arq. Shigeru Ban. Estos valores han sido obtenidos de las pruebas mecánicas de los elementos implementados en la edificación de los siguientes proyectos: Library of a Poet (pruebas en 1990), Paper House (pruebas en 1991), Paper Dome (pruebas en 1997) y Japan Pavilion (pruebas en 1991). Los datos de las investigaciones previamente mencionadas han sido tomados como referencia para las pruebas del proyecto de investigación.

<b>Tubos de Cartón</b>	<b>Cartón Kraft (Cartón sólido no blanqueado - SUS)</b>
Diámetros internos	50.80 mm (2 in) – marca Uline 50 mm – marca Ratioform
Diámetros externos	54.356 mm – marca Uline 53 mm – marca Ratioform
Espesores de pared	1.778 mm – marca Uline 1.5 mm – marca Ratioform
Resistencia a la compresión <sup>13</sup>	97.17 – 113.90 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad axial (tubos) <sup>1</sup>	16,009 – 24,065 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la flexión <sup>1</sup>	147.85 – 171.51 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad (flexión) <sup>1</sup>	14,887 – 22,127 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo máximo resistente a tensión (Ultimate stress tension) de cartón sólido en dirección de la máquina (MD) <sup>14</sup>	276.34 kg/cm <sup>2</sup>
Contenido de humedad	10%

*Tabla 13. Valores de las dimensiones y de las propiedades mecánicas de los tubos de cartón a implementar en el proyecto.*

<sup>13</sup> Datos obtenidos de las pruebas mecánicas efectuadas para la elaboración de las secciones de tubos de cartón en los proyectos del Arq. Shigeru Ban.

<sup>14</sup> Dato obtenido del documento Paper in Architecture, de la tabla de comparación esfuerzos mecánicos de los materiales de construcción. El valor del cartón sólido se obtuvo de los ensayos de la investigadora Julia Schonwalder.



### **Fibras de carbono 12 K, marca Quintum – Refuerzo (fase dispersa).**

Se ha empleado, como material de refuerzo en el compuesto, un tejido cruzado (asargado – twill) de fibras de carbono 12K de la marca Quintum, comercialmente denominado como Tejido 12K Twill. El tejido es designado con alta resistencia a esfuerzos de tensión. Este tipo de tejido es utilizado principalmente para la manufactura de elementos estructurales. En la Tabla 14 y Tabla 15 se muestran los datos técnicos relacionados a las propiedades mecánicas de la fibra y del tejido.

<b>Propiedades mecánicas - Fibras de carbono 12K</b>	
Esfuerzo máximo a tensión	49,966.09 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad (tensión)	2,447,000 kg/cm <sup>2</sup>
Densidad	1.82 g/cm <sup>3</sup>

*Tabla 14. Propiedades mecánicas de las fibras de carbono 12K de la marca Quintum.*

<b>Propiedades mecánicas – Tejido 12K Twill de fibras de carbono</b>	
Esfuerzo máximo a tensión	55,523.55 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad (tensión)	2,356,000 kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento de rotura	1.70%
Densidad	1.79 g/cm <sup>3</sup>
Ancho de lámina	1.27 m
Peso	650 g/m <sup>2</sup>
Tejido	Twill
Tamaño de hebra	12K

*Tabla 15. Propiedades mecánicas del tejido 12K Twill de fibras de carbono de la marca Quintum.*

### **Resina epóxica– Resina epóxica Q2 (aglomerante en interfaces).**

La resina epóxica implementada en los ensayos EC1 y ET1 proviene del proveedor Quintum. Esta resina es utilizada para la elaboración de compositos de fibras de carbono. Se basa en una resina epóxica líquida

tipo Bisfenol A y en un aducto amónico como endurecedor. Su presentación comercial es Quintum Q2. Se caracteriza por poseer resistencia a la humedad, alta resistencia y alto módulo de elasticidad, buena humectación sobre las fibras de carbono y de baja viscosidad; se emplea con el catalizador al 14%; posee un tiempo de curado de 24 horas, Tabla 16.

Se utiliza en la Construcción para la colocación de refuerzos estructurales en superficie de concreto y acero, en recubrimientos para incrementar la resistencia a la temperatura y como recubrimiento de superficies para evitar la corrosión, oxidación y deterioro por humedad.

Propiedades de resina epóxica Q2	
Viscosidad (cps a 25 °C)	11,500
Relación de mezcla	100g : 14g
Resistencia a temperatura °C	180 °C
Esfuerzo máximo a tensión	434 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo máximo a compresión	1,239 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo máximo a flexión	819 kg/cm <sup>2</sup>
Impacto	1.68 kg/cm <sup>2</sup>
Dureza	Shore D90

Tabla 16. Propiedades de la resina epóxica Q2 de la marca Quintum.

### **Resina epóxica – Resina epoxi FV (aglomerante en interfaces).**

La resina epóxica implementada en los ensayos EC2 y ET2 procede del proveedor Resineco – Green Composites. Esta resina es utilizada para la elaboración de composites de fibras de vidrio y fibras de carbono. Su presentación comercial es epoxi FV. Se caracteriza por poseer viscosidad media – alta para facilitar la impregnación en superficies verticales, tiempo de secado rápido y endurecimiento a temperatura ambiente sin post-curado; se emplea con el catalizador al 50%, posee un tiempo de curado de 24 horas, Tabla 17.

Propiedades de resina epoxi FV	
Viscosidad (a 20 °C)	1,500 – 2,000 mPa.s

Relación de mezcla	100g : 50g
Tiempo de gelado (100 g a 20 °C)	38 – 40 min
Tiempo de secado al tacto (25 °C)	8 horas
Tiempo de curado (lijado)	24 horas

Tabla 17. Propiedades de la resina epoxi FV de la marca Resineco.

### Muestreo de especímenes de prueba

Con base en las normas seleccionadas, el diseño del experimento ha contemplado la manufactura de 6 y 10 especímenes de prueba por cada variable (la normativa plantea como mínimo 5), en las que se analizará la correlación de las variables independientes con las variables dependientes de las propiedades mecánicas. Para las propiedades hídricas y deteriorativas se han contemplado 3 especímenes de prueba por variable. En las Tabla 18 – 23, se presentan los muestreos que han sido realizados durante el proceso de experimentación para el análisis de las variables dependientes.

<b>Muestreo para ensayo mecánico a esfuerzos de compresión EC1, norma ASTM E9</b>		
Dimensiones de muestras: Tubos cilíndricos, relación 2:1, longitud de 113.6 mm, diámetro interno de 50.8 mm, espesor de pared de 3 mm, diámetro externo de 56.8 mm.		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
10 muestras – Nomenclatura EC1-CA-n	10 muestras – Nomenclatura EC1-CR-n	10 muestras – Nomenclatura EC1-CF-n

Tabla 18. Muestreo para ensayo mecánico a compresión EC1, norma ASTM E9, para proyecto de experimentación.

### Muestreo para ensayo mecánico a esfuerzos de compresión EC2, norma ASTM E9

Dimensiones de muestras: Tubos cilíndricos, relación 2:1, longitud de 111 mm, diámetro interno de 50 mm, espesor de pared de 3 mm, diámetro externo de 55.5 mm.

Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
6 muestras – Nomenclatura EC2-CA-n	6 muestras – Nomenclatura EC2-CR-n	6 muestras – Nomenclatura EC2-CF-n

Tabla 19. Muestreo para ensayo mecánico a compresión EC2, norma ASTM E9, para proyecto de experimentación.

### Muestreo para ensayo mecánico a esfuerzos de tensión ET1, norma ASTM A370

Dimensiones de muestras: Tubos cilíndricos, longitud total de 600 mm (según instrumento Instron HVL Series), longitud de prueba de 200 mm, diámetro interno de 50.8 mm, espesor de pared de 3 mm, diámetro externo de 56.8 mm.

Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
10 muestras – Nomenclatura ET-CA-n	10 muestras – Nomenclatura ET-CR-n	10 muestras – Nomenclatura ET-CF-n

Tabla 20. Muestreo para ensayo mecánico a tensión ET1, norma ASTM A370, para proyecto de experimentación.

### Muestreo para ensayo mecánico a esfuerzos de tensión ET2, norma ASTM D638

Dimensiones de muestras: Prismas rectangulares planos, longitud de 165 mm, anchura de 19 mm, espesor de pared de 3 mm.

Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
6 muestras – Nomenclatura ET2-CA-n	6 muestras – Nomenclatura ET2-CR-n	6 muestras – Nomenclatura ET2-CF-n

Tabla 21. Muestreo para ensayo mecánico a tensión ET2, norma ASTM A370, para proyecto de experimentación.

<b>Muestreo para ensayo de envejecimiento ante la intemperie, norma ASTM G154</b>		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
3 muestras – Nomenclatura I-CA-n	3 muestras – Nomenclatura I-CR-n	3 muestras – Nomenclatura I-CF-n

Tabla 22. Muestreo para ensayo de envejecimiento ante la intemperie, norma ASTM D1435, para proyecto de experimentación.

<b>Muestreo para ensayo de absorción de humedad, norma ASTM D570</b>		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
3 muestras – Nomenclatura H-CA-n	3 muestras – Nomenclatura H-CR-n	3 muestras – Nomenclatura H-CF-n

Tabla 23. Muestreo para ensayo de absorción de humedad, norma ASTM D570, para proyecto de experimentación.

## **Especificaciones de ensayos y especímenes de prueba**

Los especímenes de prueba han sido fabricados con base en las especificaciones establecidas en las normas ASTM A500-03a, A370-03a, E9-89a y D638-03, cuyos diseños permiten efectuar los ensayos a esfuerzos de tensión y compresión para tubos estructurales de acero al carbono de forma circular y no circular, aplicación que se propone para el producto del proyecto de investigación. Para determinar la geometría y características de los especímenes se presenta de manera general el contenido de las normas utilizado para evaluar las propiedades mecánicas del material compuesto y su aplicación en tubos estructurales. En el Apéndice A se presentan más especificaciones técnicas de los ensayos por la normativa ASTM.

### **Normas de ensayos mecánicos.**

#### ***Norma ASTM A500-03a – Parámetros generales.***

La norma ASTM A500 especifica la geometría de los especímenes de ensayo y sus dimensiones, con base en su composición. Se evalúan tubos con sección circular, cuadrada, rectangular y con formas especiales, para uso estructural en construcciones de puentes y edificaciones, o usos estructurales. Las dimensiones establecidas son: perímetro no superior a 1626 mm (64 in) y espesor no superior a 15.88 mm (0.625 in). La norma A500-03a hace referencia a la norma A370-03a para describir el procedimiento de la ejecución de los ensayos mecánicos de los especímenes de prueba.

#### ***Norma ASTM A370-03a - Ensayo a esfuerzos de tensión ET1.***

Se emplean los parámetros designados en la norma ASTM A370 siguiendo la regulación de procedimientos de la norma ASTM A500, para el ensayo prueba de elementos tubulares estructurales. Los valores de las propiedades mecánicas de la norma ASTM A370 obtenidos para el proyecto de investigación, son de esfuerzos a tensión. El ensayo a tensión consiste en someter a un espécimen del material bajo análisis ante una carga a tensión determinada, suficiente para causar la ruptura.

En la Figura 27 se muestran las dimensiones de los especímenes de prueba sometidos al ensayo de tensión, teniendo una longitud efectiva de prueba de 200 mm. La longitud total de los especímenes para la prueba de tensión está condicionada según las características del instrumento de medición para el ensayo. Se ha utilizado una máquina universal marca Instron, modelo HVL Series con una capacidad de carga máxima de 2,000 kN. Este modelo precisa una sujeción de 200 mm en cada extremo, por lo que el espécimen del ensayo a tensión posee una longitud total de 600 mm. Las dimensiones de diámetro interno, diámetro externo y espesor han sido determinadas según las características de los materiales (matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill).

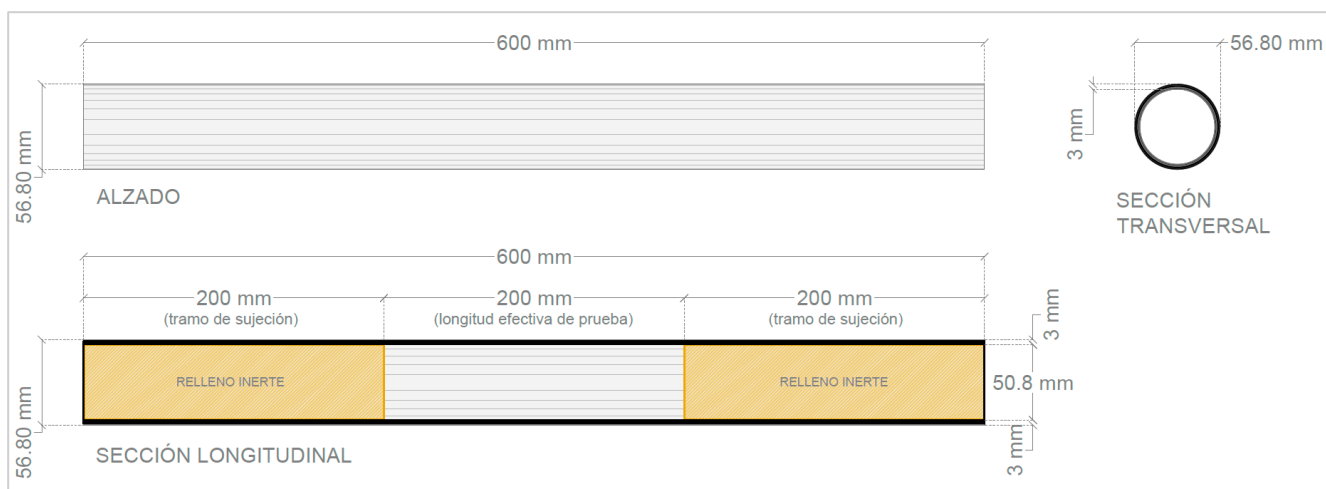


Figura 27. Dimensiones de los especímenes de prueba para el ensayo resistencia a la tensión ET1; variable 3, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

En la Tabla 24 se mencionan los parámetros de ensayo, las especificaciones de los especímenes de prueba y las características del instrumento de medición seleccionado, para la obtención de los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de las variables experimentadas.

<b>Ensayo de esfuerzos a tensión ET1, norma ASTM A370</b>	
<b>Parámetros de ensayo</b>	
Velocidad de ensayo	10 mm por minuto.
Valores obtenidos de propiedades a tensión por norma ASTM A370	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Límite de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Módulo de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Esfuerzo último a la rotura (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Diagrama esfuerzo – deformación.</li> </ul>
<b>Especificaciones de especímenes de prueba</b>	
Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable 1: Fase de cartón SUS-Kraft.</li> <li>• Variable 2: Fase de cartón SUS-Kraft con recubrimiento de resina epóxica.</li> <li>• Variable 3: Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill, con aglomerante en interfaces y recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>
Estructura	Tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.

Dimensiones específicas (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.778 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 38°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Uline.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Quintum modelo Q2.</li> </ul>
Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (tubo cilíndrico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro interior: 50.8 mm (2 pulgadas).</li> <li>• Espesor de pared: 3 mm.</li> <li>• Diámetro exterior: 56.8 mm.</li> <li>• Área de la sección: 507.0529 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 600 mm.</li> <li>• Longitud de prueba a tensión: 200 mm.</li> </ul>
Números de especímenes	30 especímenes (10 especímenes por variable).
Parámetros de especímenes	200 mm de longitud efectiva de prueba Con marcas de calibración gráfica para observar el alargamiento del espécimen de prueba.
Nomenclatura de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ET1-CA-n (cartón).</li> <li>• ET1-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>• ET1-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
<b>Instrumento de medición</b>	
Equipo	Máquina de Prueba Universal (Universal Testing Machine) con estación de trabajo.
Marca	Instron
Modelo	Serie industrial modelo HVL (HVL Series) – 400HVL
Sistema de carga	Sistema hidráulico
Descripción	Máquina universal para ensayos de tensión, compresión, flexión y cortante de alta capacidad, accionado mediante un sistema de bombeo hidráulico.
Capacidad máxima	2,500 kN
ID de calibración	400HVLB14362
Ubicación de equipo	Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE), Facultad de Arquitectura, UNAM.



Técnico académico de laboratorio

M. en Arq. Sofía B. Vargas López

Imagen de instrumento de medición



Tabla 24. Especificaciones de ensayo a esfuerzos de tensión ET1, norma ASTM A370.

### ***Norma ASTM D638-03 – Ensayo a esfuerzos de tensión ET2.***

El segundo tipo de ensayo a esfuerzos de tensión ha sido realizado bajo los parámetros designados en la norma ASTM D638, para la determinación de las propiedades de resistencia a la tensión de las tres variables analizadas. Los materiales han sido sometidos a prueba con una geometría de prisma rectangular, obtenida de una sección del perfil tubular. La norma D638 se emplea para el ensayo de materiales compuestos que contengan fases poliméricas, siendo las utilizadas en el material del proyecto de investigación (fibras de celulosa, fibras de carbono, resina epóxica).

En la Figura 28 se presentan las dimensiones de los especímenes de prueba que serán sometidos al ensayo de resistencia a la tensión ET2, según la norma ASTM D638. En la Tabla 25 se mencionan los parámetros de ensayo, las especificaciones de los especímenes de prueba y las características del instrumento de

medición seleccionado, para la obtención de los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de las variables experimentadas.

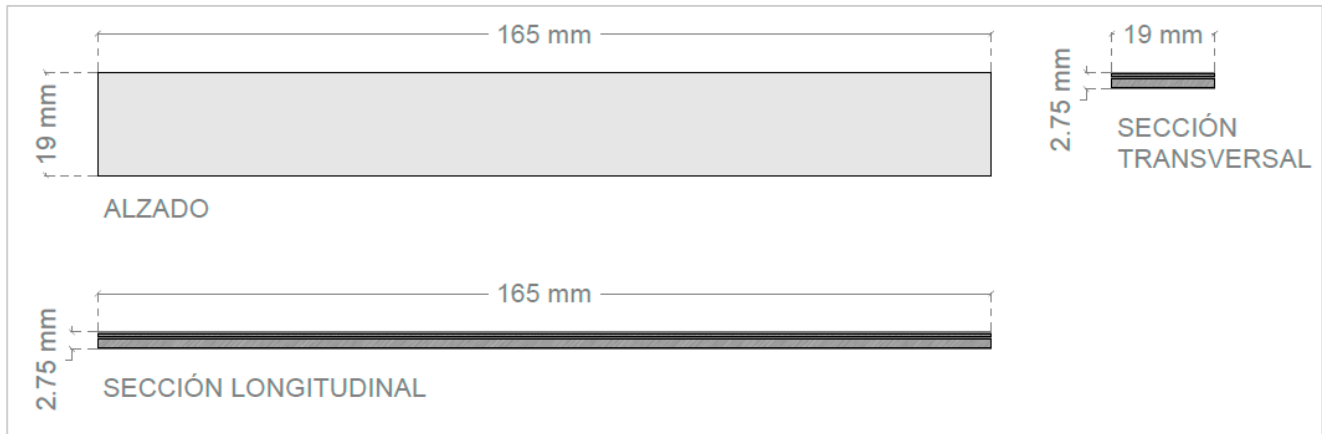


Figura 28. Dimensiones de los especímenes de prueba para el ensayo resistencia a la tensión ET2; variable 3, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

<b>Ensayo de esfuerzos a tensión ET2, norma ASTM D638</b>	
<b>Parámetros de ensayo</b>	
Velocidad de ensayo	5 mm por minuto $\pm$ 25%.
Valores obtenidos de propiedades a tensión por norma ASTM D638	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Límite de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Módulo de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Esfuerzo último a la rotura (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Diagrama esfuerzo – deformación.</li> </ul>
<b>Especificaciones de especímenes de prueba</b>	
Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable 1: Fase de cartón SUS-Kraft.</li> <li>• Variable 2: Fase de cartón SUS-Kraft con recubrimiento de resina epóxica.</li> <li>• Variable 3: Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill, con aglomerante en interfaces y recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>
Estructura	Láminas (prismas rectangulares) obtenidas a partir de tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.

Dimensiones específicas (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.5 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 41°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Ratioform.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Resineco modelo epoxi FV.</li> </ul>
Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (prisma rectangular)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espesor de pared: 2.75 mm.</li> <li>• Área de la sección: 57 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 165 mm.</li> <li>• Anchura: 19 mm.</li> </ul>
Números de especímenes	18 especímenes (6 especímenes por variable).
Parámetros de especímenes	165 mm de longitud total Con marcas de calibración gráfica para observar el alargamiento del espécimen de prueba.
Nomenclatura de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ET2-CA-n (cartón).</li> <li>• ET2-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>• ET2-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
<b>Instrumentos de medición</b>	
Equipos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo 1: Máquina de Prueba Universal (Universal Testing Machine) con estación de trabajo, marca MTS Insight 10 kN (Variables ET2-CA-n y ET2-CR-n).</li> <li>• Equipo 2: Actuador con célula de carga y mordazas en marco estructural, marca MTS 100 kN (Variable ET2-CF-n).</li> </ul>
Ubicación de equipos	Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE), Facultad de Arquitectura, UNAM, México. Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM), UPC, España.
Responsable de laboratorio	Dr. Lluís Gil Espert
Imágenes de instrumentos de medición	



Tabla 25. Especificaciones de ensayo a esfuerzos de tensión ET2, norma ASTM D638.

***Norma ASTM E9-89a - Ensayos a esfuerzos de compresión EC1, EC2.***

Se aplican los parámetros designados en la norma E9-89 con base en el tipo de normativa para elementos tubulares estructurales metálicos de las normas A500 y A370, para determinar los valores de esfuerzo del material ante cargas a compresión.

El ensayo a compresión consiste en someter los especímenes a una carga axial a compresión incrementada. En la se presentan las dimensiones de los especímenes de prueba sometidos al ensayo de resistencia a la compresión. Para la ejecución del ensayo EC1 se ha utilizado una prensa hidráulica marca Instron, modelo RD Series con una capacidad de carga máxima de 2,000 kN. El ensayo EC2 ha sido efectuado con una máquina universal marca MTS Insight con una capacidad de carga máxima de 10 kN.

En la Figura 29 y Figura 30 se presentan las dimensiones de las probetas que serán sometidas al ensayo de compresión. La superficie de apoyo de las especímenes y de los platos de sujeción de la máquina deben estar lisos y correctamente calibrados para garantizar la distribución uniforme de la carga. Las dimensiones de diámetro interno, diámetro externo y espesor han sido determinadas según las

características de los materiales (matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill).

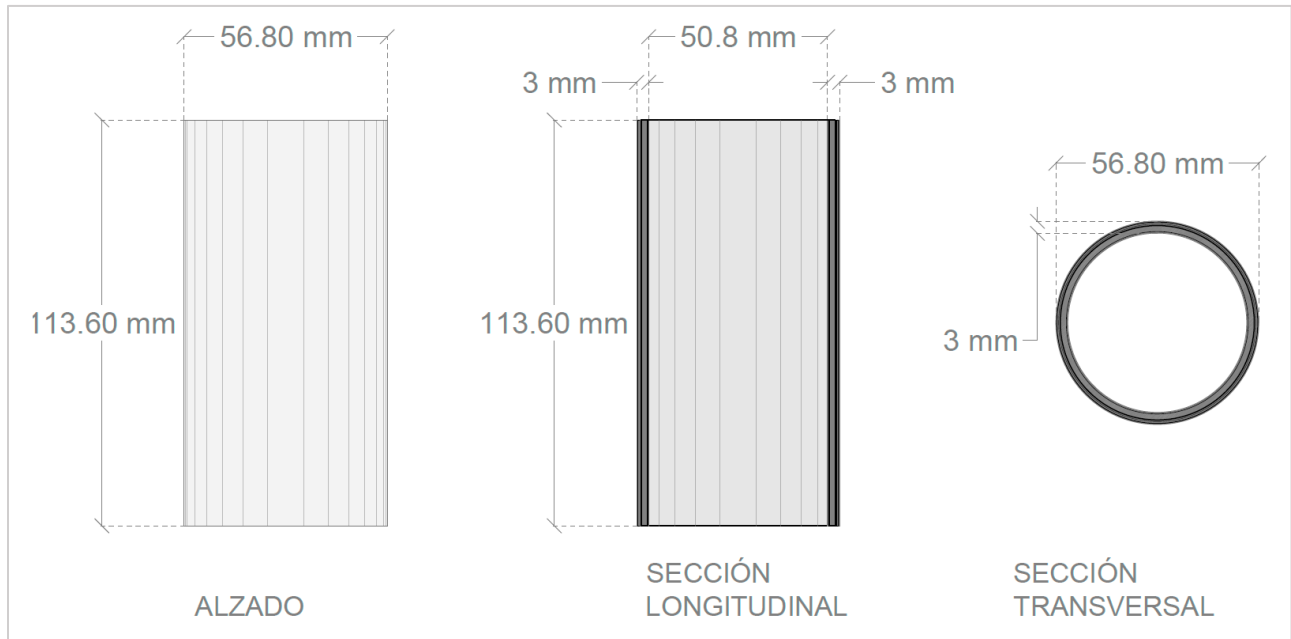


Figura 29. Dimensiones de especímenes de prueba para el ensayo a compresión EC1; variable 3, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

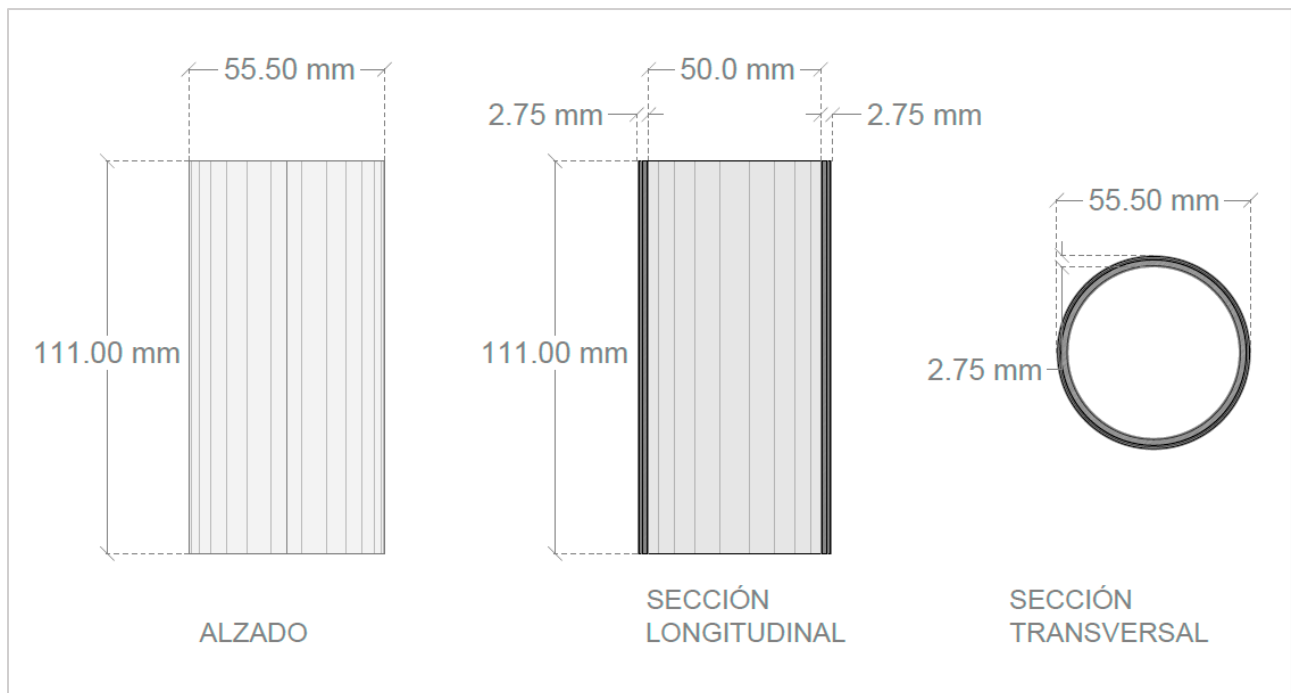


Figura 30. Dimensiones de especímenes de prueba para el ensayo a compresión EC2; variable 3, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

La Tabla 26 muestra los parámetros de ensayo, las especificaciones de los especímenes de prueba y las características del instrumento de medición seleccionado, para la obtención de los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de las variables experimentadas.

<b>Ensayo de esfuerzos a compresión EC1 y EC2, norma ASTM E9</b>	
<b>Parámetros de ensayo</b>	
Velocidad de ensayo	10 mm por minuto (Variables EC-CA y EC-CR). 2.5 mm por minuto (Variables EC-CF).
Valores obtenidos de propiedades a compresión por norma ASTM E9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Límite de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Módulo de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Esfuerzo último a la rotura (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Diagrama esfuerzo – deformación.</li> </ul>
<b>Especificaciones de especímenes de prueba</b>	
Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable 1: Fase de cartón SUS-Kraft.</li> <li>• Variable 2: Fase de cartón SUS-Kraft con recubrimiento de resina epóxica.</li> <li>• Variable 3: Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill, con aglomerante en interfaces y recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>
Estructura	Tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.
Dimensiones específicas para ensayo EC1 (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.778 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 38°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Uline.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Quintum modelo Q2.</li> </ul>
Dimensiones específicas para ensayo EC2 (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.5 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 41°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Ratioform.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Resineco modelo epoxi FV.</li> </ul>

Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (tubo cilíndrico), ensayo EC1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro interior: 50.8 mm (2 pulgadas).</li> <li>• Espesor de pared: 3 mm.</li> <li>• Diámetro exterior: 56.8 mm.</li> <li>• Área de la sección: 507.0529 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 113.60 mm.</li> </ul>
Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (tubo cilíndrico), ensayo EC2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro interior: 50 mm.</li> <li>• Espesor de pared: 2.75 mm.</li> <li>• Diámetro exterior: 55.50 mm.</li> <li>• Área de la sección: 455.73 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 111 mm.</li> </ul>
Números de especímenes, ensayo EC1	30 especímenes (10 especímenes por variable).
Números de especímenes, ensayo EC2	18 especímenes (6 especímenes por variable).
Parámetros de especímenes	Relación de 2/1 (L/D)
Nomenclatura de especímenes, ensayo EC1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EC1-CA-n (cartón).</li> <li>• EC1-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>• EC1-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
Nomenclatura de especímenes, ensayo EC2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EC2-CA-n (cartón).</li> <li>• EC2-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>• EC2-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
<b>Instrumentos de medición</b>	
Equipos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo 1 – Ensayo EC1: Máquina de Ensayos a Compresión (Compression Testing Machine) con estación de trabajo; marca Instron, Serie RD (RD Series - Hydraulic Compression Testers) – 400RD; sistema hidráulico; capacidad máxima de 2,000 kN; ID de calibración: 400RDB14248.</li> <li>• Equipo 2 – Ensayo EC2: Máquina de Prueba Universal (Universal Testing Machine) con estación de trabajo, marca MTS Insight 10 kN.</li> </ul>
Ubicación de equipos	Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE), Facultad de Arquitectura, UNAM, México. Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM), UPC, España.



Técnico académico de  
laboratorio LMSE  
Responsable de laboratorio  
LITEM

M. en Arq. Sofía B. Vargas López

Dr. Lluís Gil Espert

### Imágenes de instrumentos de medición



Tabla 26. Especificaciones de ensayos a esfuerzos de compresión EC1 Y EC2, norma ASTM E9.

### Normas para propiedades hídricas y deteriorativas.

Para la observación del comportamiento del material compuesto en elementos estructurales ante condiciones atmosféricas, se han efectuado los ensayos de intemperismo y absorción de humedad. La selección de las normas para efectuar los ensayos se basa en la matriz del material compuesto, componente que se encuentra en mayor proporción, siendo el cartón, cuya composición se basa en fibras de celulosa, pudiendo clasificarlo como un biopolímero; además, las fibras de carbono son clasificadas como materiales poliméricos debido a los precursores por las cuales son generadas. Con base en estos factores, se han seleccionado las normas ASTM referentes a materiales poliméricos para determinar estas propiedades de los materiales experimentados.



**Norma ASTM G154-06 – Ensayo de envejecimiento ante la intemperie I.**

Los métodos establecidos en la norma consisten en medir los efectos producidos en los especímenes ante condiciones climáticas variables de radiación ultravioleta, humedad y calor. Se ha utilizado una cámara de ensayo QUV que utiliza lámparas fluorescentes para proveer un espectro de radiación entre las ondas ultravioletas. La humedad es generada por condensación forzada; la temperatura es controlada por calentadores.

En la Tabla 27 se mencionan las especificaciones de los especímenes de prueba y las características del instrumento de medición utilizado para el ensayo de intemperismo acelerado según la norma ASTM G154; haciendo selección del ciclo número 6 descrito en la norma, al ser el que permite simular las condiciones de exposición con mayor intensidad.

<b>Ensayo de envejecimiento ante la intemperie, norma ASTM G154</b>				
<b>Parámetros de ensayo</b>				
<b>Ciclo de ensayo seleccionado (Tabla X2.1 Common Exposure Conditions) – Ciclo 6</b>				
<b>Número de ciclo</b>	<b>Tipo de lámpara</b>	<b>Valor de irradiancia</b>	<b>Longitud de onda (aproximada)</b>	<b>Ciclo de exposición</b>
6	UVA-340	1.55 W/m <sup>2</sup> /nm	340 nm	8 horas de UV a 60 (± 3) °C Temperatura de Panel Black. 4 horas de condensación a 50 (± 3) °C Temperatura de Panel Black.
<b>Especificaciones de especímenes de prueba</b>				
<b>Composición</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable 1: Fase de cartón SUS-Kraft.</li> <li>• Variable 2: Fase de cartón SUS-Kraft con recubrimiento de resina epóxica.</li> <li>• Variable 3: Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill, con aglomerante en interfaces y recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>			
<b>Estructura</b>	Láminas (prismas rectangulares) obtenidas a partir de tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.			

Dimensiones específicas (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.778 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 38°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Uline.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Quintum modelo Q2.</li> </ul>
Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (prisma rectangular)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud: 75 mm.</li> <li>• Anchura: 20 mm.</li> <li>• Espesor de pared: 3 mm.</li> <li>• Área de exposición frontal: 1,500 mm<sup>2</sup>.</li> </ul>
Números de especímenes	9 especímenes (3 especímenes por variable).
Nomenclatura de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• I-CA-n (cartón).</li> <li>• I-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>• I-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
<b>Instrumento de medición</b>	
Equipo	Cámaras de ensayo de intemperismo acelerado (QUV accelerated weathering tester).
Marca	Q-Lab
Modelo	QUV/spray
Descripción	La cámara permite simular el envejecimiento en exteriores, exponiendo a los materiales a ciclos alternados de luz ultravioleta (UV) y humedad, a temperaturas elevadas y controladas.
ID de equipo	14-3052-84-SPRAY-RP
Ubicación de equipo	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM.
Contacto en laboratorio	Dra. en Arq. Ilse García Villalobos
Imagen de instrumento de medición	



Tabla 27. Especificaciones de ensayo de envejecimiento ante la intemperie I, norma ASTM G154.

### ***Norma ASTM D570-06 – Ensayo de absorción de humedad H.***

El método señalado en la norma consiste en determinar el grado de absorción de agua en los especímenes tras haberlos sumergidos durante un periodo de dos horas en agua destilada, para calcular el cambio en peso de los especímenes y el porcentaje de porosidad (vacíos) de los materiales experimentados, así como analizar de manera cualitativa los efectos que se presentan ante un ambiente húmedo.

Para efectuar el ensayo, primeramente, los especímenes de prueba fueron secados en una mufla durante 24 horas a una temperatura de  $50 \pm 3$  °C, seguido, fueron enfriados en una desecadora y pesados en una báscula con una precisión mínima de 0.001 gramos. Posteriormente, los especímenes son sumergidos durante dos horas en un recipiente inerte (vasos de precipitados) con agua destilada. Al finalizar, fueron retirados del recipiente para secarlos parcialmente y ser pesados nuevamente. En la Tabla 28 se hace mención de los instrumentos de medición utilizados para la prueba según la norma ASTM D570.

**Ensayo de absorción de humedad, norma ASTM D570**

**Especificaciones de especímenes de prueba**

Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable 1: Fase de cartón SUS-Kraft.</li> <li>• Variable 2: Fase de cartón SUS-Kraft con recubrimiento de resina epóxica.</li> <li>• Variable 3: Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill, con aglomerante en interfaces y recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>
Estructura	Tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.
Dimensiones específicas (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.778 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 38°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Uline.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Quintum modelo Q2.</li> </ul>
Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (prisma rectangular)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro interior: 50.8 mm (2 pulgadas).</li> <li>• Espesor de pared: 3 mm.</li> <li>• Diámetro exterior: 56.8 mm.</li> <li>• Área de la sección: 507.0529 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 25.40 mm.</li> </ul>
Números de especímenes	9 especímenes (3 especímenes por variable).
Nomenclatura de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• H-CA-n (cartón).</li> <li>• H-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>• H-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
<b>Instrumentos de medición</b>	
Equipos	Balanza marca Ohaus, modelo Pioneer. Mufla marca Felisa, modelo FE-340.
Descripción	Balanza con precisión de medición de 0.0001 gramos. Mufla electrónica con capacidad máxima de 1,100 °C.
ID de equipos	2383419 1310067
Ubicación de equipos	Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrado, UNAM.
Contacto en laboratorio	Dra. en Arq. Ilse García Villalobos
Imágenes de instrumentos de medición	



Tabla 28. Especificaciones de ensayo de absorción de humedad H, norma ASTM D570.

### Manufactura de especímenes de prueba

Los especímenes de prueba han sido elaborados mediante el método de Contacto (Hand Lay-up – estratificación manual), técnica implementada para la fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable. El método consiste en una manufactura manual artesanal sin instrumentos especializados, a temperatura ambiente.

El proyecto de investigación contempla la experimentación de tres tipos de especímenes de prueba en su composición (CA-n, CR-n, CF-n) por lo que el método de manufactura de cada uno es distinto. Las características de composición y microestructura de los especímenes para cada tipo de ensayo han sido fabricados con las mismas especificaciones, teniendo tres tipos de variables, de manera que la geometría de estos sólo es modificada para la correcta ejecución de cada ensayo según los parámetros de las normas ASTM utilizadas. El proceso de elaboración de cada tipo de especímenes de prueba se menciona en el Apéndice B (especímenes EC1 ET1, I, H) y en el Anexo I (especímenes EC2 y ET2), mencionando las especificaciones que cada Variable requiere.

En la Figura 31 y Figura 32 se observa la relación de la conformación multicapa del material compuesto del proyecto de investigación (Variable 3), realizada por la unión de la matriz de cartón con la capa de refuerzo del tejido de fibras de carbono 12K Twill, por medio de la incorporación de la resina epóxica como agente aglomerante en la zona de interface; por medio del método de estratificación manual.

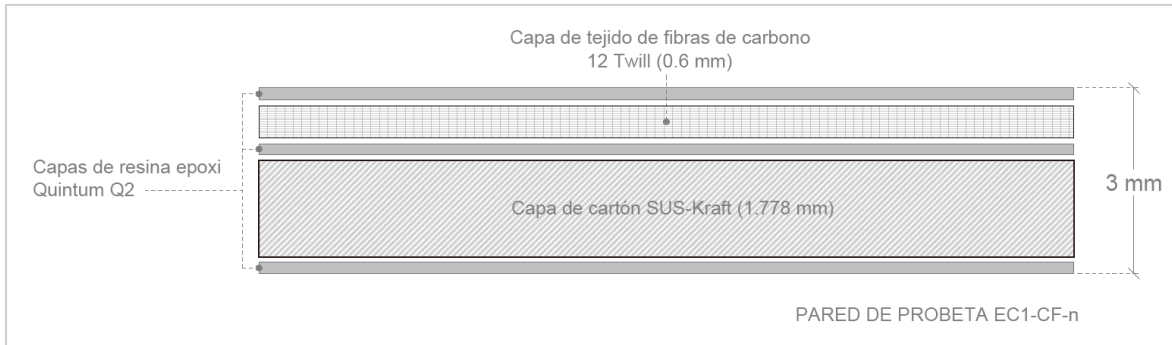


Figura 31. Detalle de sección de espécimen de prueba EC1-CF-n, para el ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión.



Figura 32. Vista de sección de especímenes de prueba EC1-CF-n, para el ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión.



## **Capítulo VII: Elaboración de ensayos y análisis de resultados**

### **Ensayos mecánicos a esfuerzos de compresión – EC1, EC2**

El ensayo a esfuerzos de compresión consiste en someter los especímenes de prueba a una carga axial incrementada a compresión. La obtención de las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión se ha realizado mediante los métodos de ensayo y parámetros establecidos en la norma ASTM E9-89a. Se efectuaron dos muestreos de las tres variables (CA-n, CR-n, CF-n) bajo la denominación EC1 y EC2.

El muestreo EC1 fue elaborado y ensayado en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura, UNAM; contemplando 10 especímenes de prueba por cada variable. El muestreo EC2 fue elaborado y ensayado en el Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales de la Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Terrassa, UPC; contemplando 6 especímenes de prueba por cada variable. Ambos muestreos fueron elaborados bajo las mismas especificaciones de composición de fases, geometría, relación L/D, estructura multicapa y proceso de fabricación; con variaciones menores en la composición química (se utilizaron dos tipos de resina epóxica) y las dimensiones de los especímenes de prueba (se utilizaron dos espesores de la fase matriz de cartón). Las variaciones dependieron de la obtención de la materia prima disponible en el sitio de ensayo; especificadas en el Capítulo VI.

#### **Resultados de Variable 1 – Especímenes de prueba EC1-CA-n, EC2-CA-n.**

El ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión de la Variable 1 (CA-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de cartón, con el fin de observar las propiedades mecánicas a la compresión del material que funge como matriz en el material compuesto propuesto en la investigación.

En el muestreo EC-1 se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de diez especímenes de prueba con la denominación EC1-CA-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS sin aditamentos o aditivos) con los parámetros presentados en la Tabla 26, Figura 33. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC1-CA-n se muestran en la Tabla 29. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó una deformación límite de 0.10 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.10 mm/mm)
EC1-CA-01	261	88.87	0.0268	70.82
EC1-CA-02	281	95.68	0.0333	88.53
EC1-CA-03	306	104.19	0.0422	91.59
EC1-CA-04	263	89.55	0.0325	75.59
EC1-CA-05	300	102.15	0.0500	91.59
EC1-CA-06	282	96.02	0.0363	77.29
EC1-CA-07	304	103.51	0.0969	98.06
EC1-CA-08	228	77.63	0.0253	65.72
EC1-CA-09	304	103.51	0.0963	98.74
EC1-CA-10	291	99.08	0.0413	98.74

Tabla 29. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC1-CA.



Figura 33. Especímenes de prueba EC1-CA-n para ensayo a la compresión.



En el muestreo EC-2 se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de seis especímenes de prueba con la denominación EC2-CA-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS sin aditamentos o aditivos) con los parámetros presentados en la Tabla 26, Figura 34. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC2-CA-n se muestran en la Tabla 30. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó una deformación límite de 0.10 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

Espécimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.10 mm/mm)
EC2-CA-01	213	87.79	0.0631	73.52
EC2-CA-02	206	85.02	0.0543	71.79
EC2-CA-03	198	81.96	0.0708	74.02
EC2-CA-04	205	84.56	0.0612	76.03
EC2-CA-05	209	86.28	0.0643	67.18
EC2-CA-06	199	82.25	0.0854	76.79

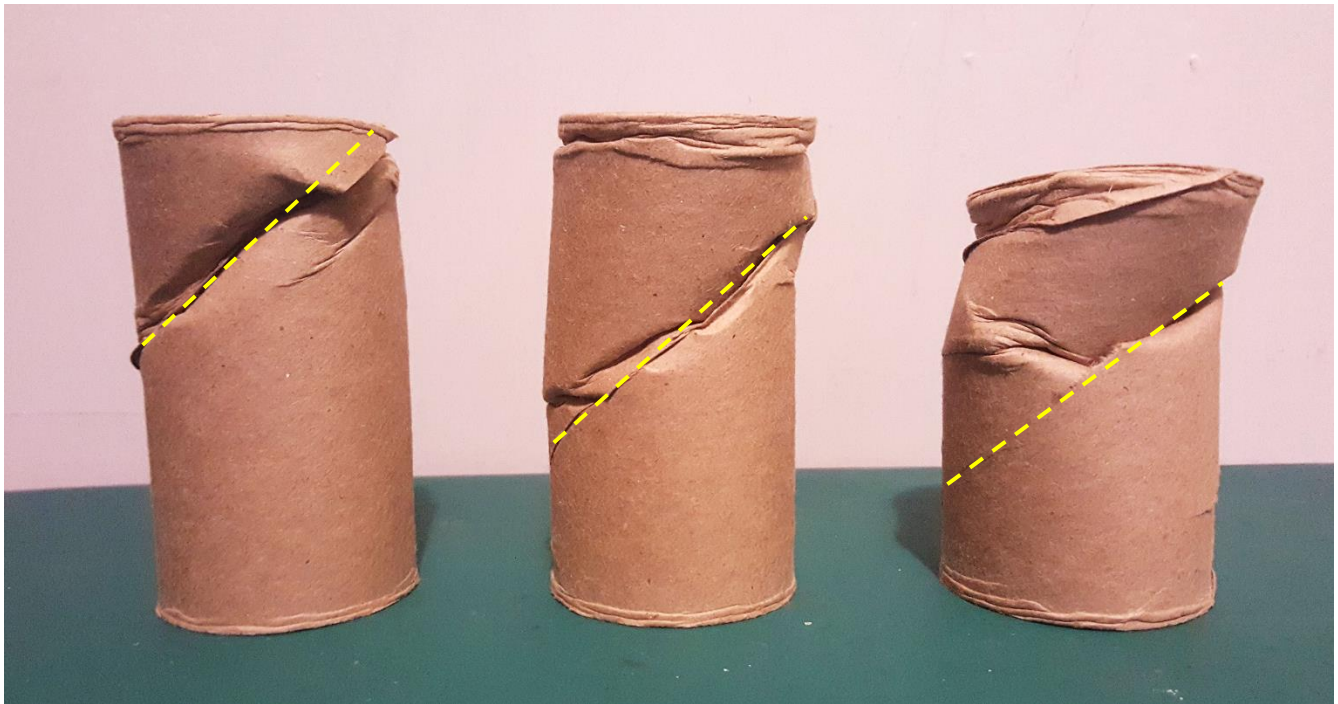
Tabla 30. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC2-CA.



Figura 34. Especímenes de prueba EC2-CA-n para ensayo a la compresión.

### ***Comportamiento mecánico de Variable 1, especímenes EC1-CA, EC2-CA.***

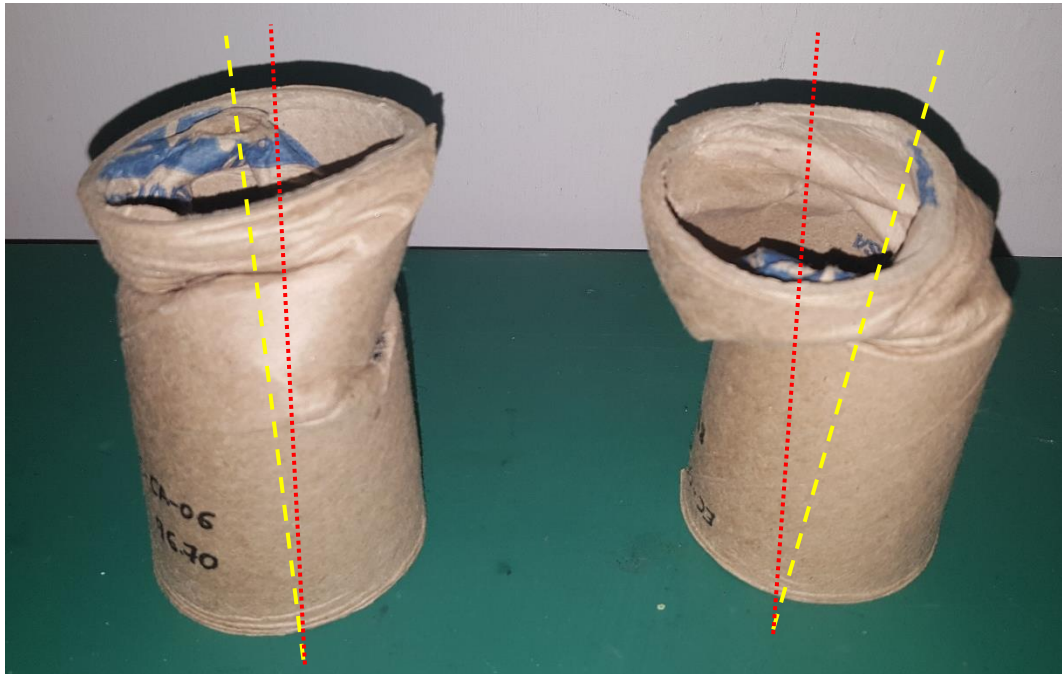
En el ensayo a esfuerzos de compresión de las muestras EC1-CA y EC2-CA fueron identificados patrones generales que condicionaron el comportamiento mecánicos de los especímenes y sus valores de resistencia. De manera conjunta, en todos los especímenes se presentó un comportamiento del tipo dúctil, al producirse deformación plástica sin fractura; igualmente, se observó una susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal (generado en la fabricación de los tubos de cartón), cuyas aristas de unión no mantienen un elemento geométrico uniforme, Figura 35. Durante la ejecución del ensayo de los especímenes de prueba, se presentó el aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial, desde las superficies de apoyo hacia el centro; exhibido primordialmente desde las superficies de apoyo del cabezal desplazable, Figura 35.



*Figura 35. Especímenes EC1-CA-02, EC1-CA-06, EC1-CA-10. Al centro se presenta la susceptibilidad de plegado en las aristas de unión por el devanado multicapa helicoidal; esta geometría es generada durante la fabricación de los tubos de cartón. En los extremos se observa el aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial.*

Para el ensayo de especímenes a esfuerzos de compresión, es necesario un careo apropiado de las superficies de apoyo. De ser insuficiente, se genera un aplastamiento no uniforme con áreas de sobrecarga, lo cual propicia un plegado discontinuo y zonas con pandeo local. La distribución no uniforme de la carga en la sección de los especímenes, produce el desplazamiento del eje axial de su centroide, menor estabilidad y posteriormente fallas dúctiles de plegado discontinuo; comportamiento

traducido en el remetimiento de las secciones y en la obtención de valores menores de resistencia a la compresión, Figura 36.



*Figura 36. Especímenes ECI-CA-04 y ECI-CA-06; el eje axial de los especímenes fue desplazado de su centroide, propiciando una distribución de esfuerzos no uniforme y menor resistencia a la compresión.*

En los especímenes que se obtuvo mayores valores de resistencia a la compresión, se observa un pandeo global, de manera que la carga aplicada fue transmitida uniformemente desde la base (cabezal desplazable) hacia el apoyo superior a lo largo del eje axial, Figura 39. En algunos especímenes se presentó una delaminación entre capas debido a defectos de manufactura en la fabricación de los tubos de cartón (baja unión entrecapas), provocando áreas de sobrecarga, lo que dio lugar al desprendimiento de las capas externas.



Figura 37. Los especímenes de prueba EC1-CA-03, EC1-CA-05, EC1-CA-07 y EC1-CA-09 obtuvieron la mayor resistencia en el ensayo; se observa que en el comportamiento de estos elementos se distribuyó la carga uniforme sobre el eje axial, generando un pandeo global del elemento hasta que se produjo la falla debido a las uniones del devanado multicapa helicoidal.

### ***Propiedades mecánicas de Variable 1, especímenes EC1-CA, EC2-CA.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de la Variable 1 (EC-CA) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba EC1-CA y EC2-CA, implementando el método de regresión polinomial de grado 5, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Para cada muestreo (EC1-CA y EC2-CA) fue desarrollada una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular.

En el análisis estadístico del muestreo EC1-CA se utilizaron los valores de nueve especímenes de prueba: EC1-CA-02, EC1-CA-03, EC1-CA-04, EC1-CA-05, EC1-CA-06, EC1-CA-07, EC1-CA-08, EC1-CA-09, EC1-CA-10. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC1-CA se presentan en la Tabla 31.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 1, especímenes EC1-CA</b>	
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>92.46 kg/cm<sup>2</sup></b>

Esfuerzo último a una deformación de 0.10 cm/cm	<b>88.51 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>6,031.50 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>65.49 kg/cm<sup>2</sup></b>

Tabla 31. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 1, ensayo EC1-CA.

En el análisis estadístico del muestreo EC2-CA se utilizaron los valores de los seis especímenes de prueba: EC2-CA-01, EC2-CA-02, EC2-CA-03, EC2-CA-04, EC2-CA-05, EC2-CA-06. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC2-CA se presentan en la Tabla 32.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 1, especímenes EC2-CA</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>82.61 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a una deformación de 0.10 cm/cm	<b>69.45 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>2,332.40 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>76.96 kg/cm<sup>2</sup></b>

Tabla 32 Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 1, ensayo EC2-CA.

En la Figura 40 y Figura 41 se presentan las gráficas esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes EC1-CA y EC2-CA. En ambos muestreos, los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación



del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. Cabe destacar, que debido a las condiciones de microestructura del material (fibras de celulosa entrelazadas), no presenta una deformación elástica completamente regular.

Posterior al límite elástico convencional, se establece su zona plástica, a partir de la cual el material presenta una deformación plástica, es decir, irreversible. En la zona plástica, el material de la Variable 1 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de compresión a una deformación de 0.03 cm/cm a 0.05 cm/cm. Debido a las características de microestructura del cartón (material fibroso), se produce un reacomodo repetitivo de las fibras de celulosa, llegando a adquirir un aplastamiento por plegado continuo y, por lo tanto, una zona plástica muy amplia sin una disminución de resistencia considerable.

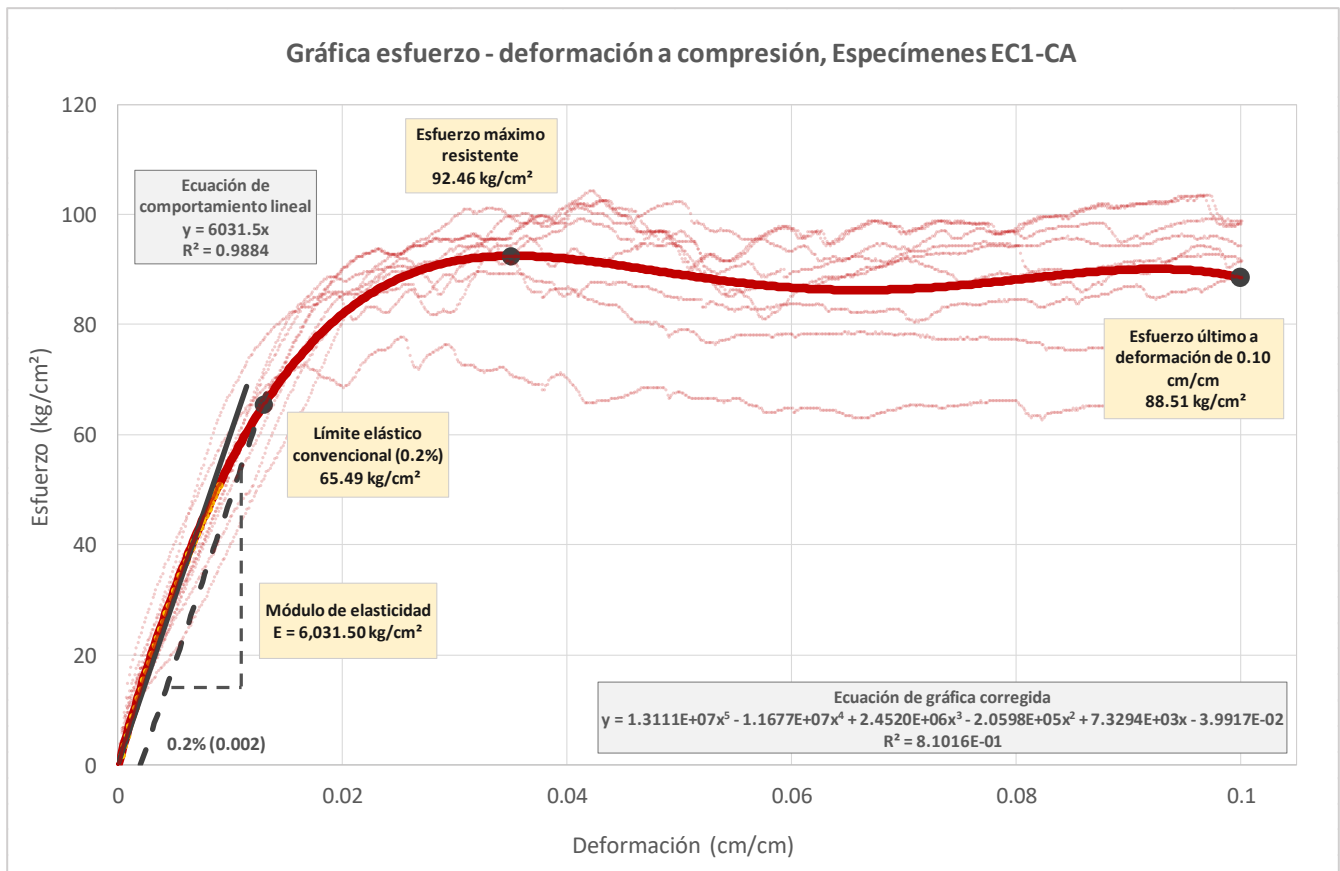


Figura 38. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 1, ensayo EC1-CA.

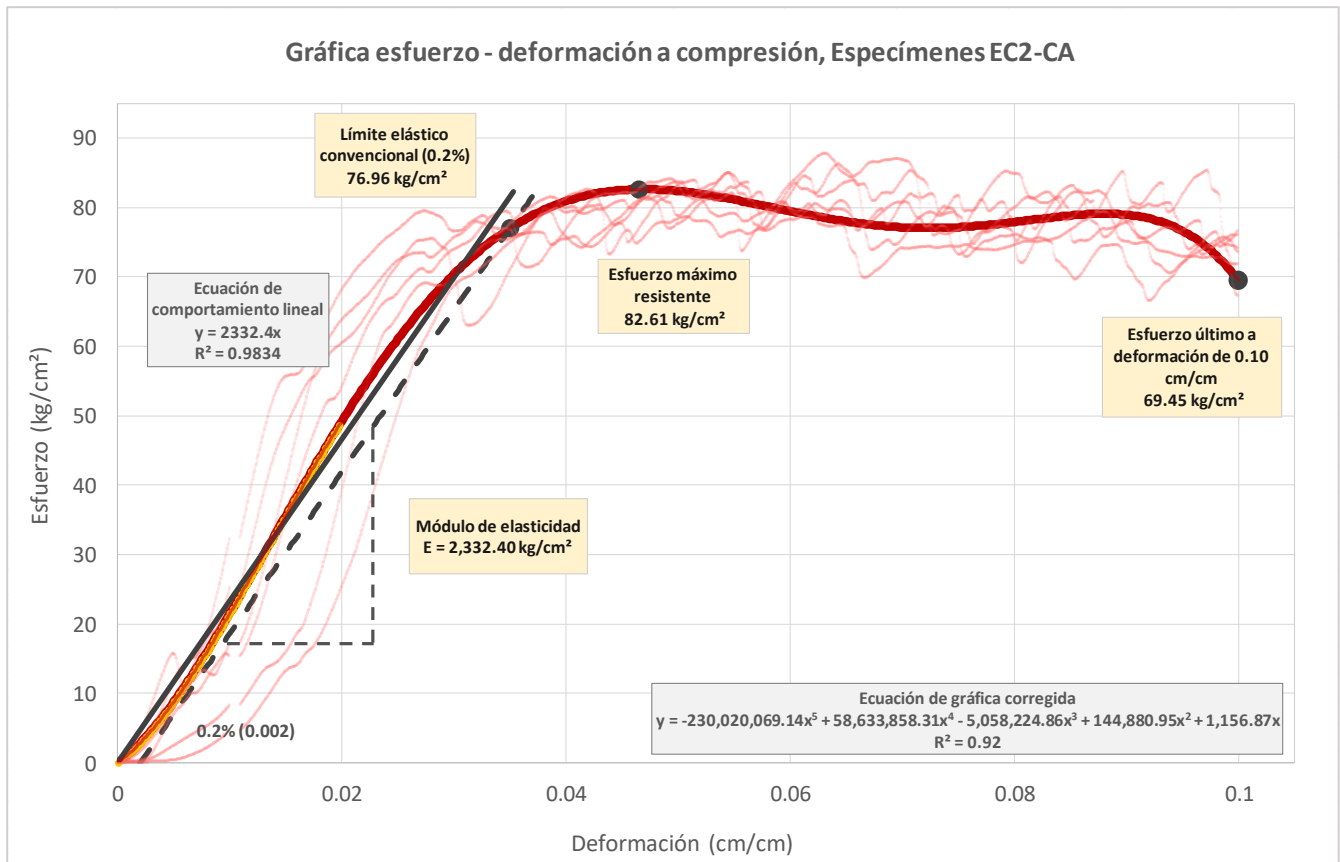


Figura 39. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 1, ensayo EC2-CA.

Al analizar la Figura 40 y Figura 41, se observa que los especímenes del muestreo EC1-CA obtuvieron valores de resistencia mayores con deformaciones menores. Con base en la literatura de las propiedades mecánicas del cartón, este hecho se debe a que los especímenes del muestreo EC1-CA poseen un mayor grado de compactación de las fibras de celulosa, dando por resultado gramaje y densidades mayores.

El límite elástico convencional para el muestreo EC1-CA (cartón Uline) se encuentra a una deformación de 0.013 cm/cm, mientras que, para el muestreo EC2-CA (cartón Ratioform) se encuentra a una deformación de 0.035 cm/cm; apuntando que las características del cartón utilizado, el ángulo de devanado helicoidal y el grado de unión entrecapas ha sido más eficiente en los especímenes del muestreo EC1-CA. Respecto al módulo de elasticidad, en los especímenes del muestreo EC2-CA, el valor obtenido es notablemente menor (39% del valor del módulo de elasticidad de EC1-CA), denotando una menor rigidez en comparación a los especímenes EC1-CA.

En ambos muestreos se presenta un comportamiento plástico de larga permanencia, debido a las características de microestructura del cartón (fibras de celulosa entrelazadas), con una descenso de resistencia ligeramente mayor en los especímenes EC2-CA.

### **Resultados de Variable 2 – Especímenes de prueba EC1-CR-n, EC2-CR-n.**

El ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión de la Variable 2 (CR-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de cartón con un recubrimiento interno y externo de resina epóxica. El uso del recubrimiento de resina epóxica aplicado sobre el cartón se ha establecido como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo. Se observó que la aplicación de la resina epóxica sobre el cartón modifica las propiedades físicas de las capas externas, tornando al material más rígido y frágil, suceso que condicionó el comportamiento mecánico del material.

En el muestreo EC-1 se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de diez especímenes de prueba con la denominación EC1-CR-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Quintum Q2) con los parámetros presentados en la Tabla 26, Figura 42. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC1-CR-n se muestran en la Tabla 29. 33. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó una deformación límite de 0.045 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

<b>Especimen de prueba</b>	<b>Carga máxima soportada (kg)</b>	<b>Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)</b>	<b>Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.045 mm/mm)</b>
<b>EC1-CR-01</b>	427	145.39	0.0450	145.39
<b>EC1-CR-02</b>	510	173.65	0.0381	143.01
<b>EC1-CR-03</b>	430	146.41	0.0307	116.79
<b>EC1-CR-04</b>	421	143.35	0.0385	125.98
<b>EC1-CR-05</b>	446	151.86	0.0443	151.52
<b>EC1-CR-06</b>	416	141.65	0.0353	120.20
<b>EC1-CR-07</b>	433	147.44	0.0399	139.26
<b>EC1-CR-08</b>	395	134.50	0.0363	122.24
<b>EC1-CR-09</b>	396	134.84	0.0428	132.79



<b>EC1-CR-10</b>	406	138.24	0.0302	124.28
------------------	-----	--------	--------	--------

Tabla 33. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC1-CR.



Figura 40. Especímenes de prueba EC1-CR-n para ensayo a la compresión.

En el muestreo EC-2 se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de seis especímenes de prueba con la denominación EC2-CR-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV) con los parámetros presentados en la Tabla 26, Figura 43. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC2-CR-n se muestran en la Tabla 29. 34. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó una deformación límite de 0.045 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

<b>Especimen de prueba</b>	<b>Carga máxima soportada (kg)</b>	<b>Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)</b>	<b>Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.045 mm/mm)</b>
<b>EC2-CR-01</b>	223	92.07	0.0450	92.07
<b>EC2-CR-02</b>	229	94.17	0.0388	92.28
<b>EC2-CR-03</b>	227	93.33	0.0440	93.00
<b>EC2-CR-04</b>	225	92.83	0.0450	92.83

<b>EC2-CR-05</b>	225	92.75	0.0434	86.95
<b>EC2-CR-06</b>	216	89.18	0.0332	83.38

*Tabla 34. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC2-CR.*



*Figura 41. Especímenes de prueba EC2-CR-n para ensayo a la compresión.*

### ***Comportamiento mecánico de Variable 2, especímenes EC1-CR, EC2-CR.***

En el ensayo a esfuerzos de compresión de las muestras EC1-CR y EC2-CR fueron identificados patrones generales que condicionaron el comportamiento mecánicos de los especímenes y sus valores de resistencia. De manera conjunta, en todos los especímenes se presentó un comportamiento de tipo dúctil a semirrígido, ya que algunos especímenes presentaron deformación plástica sin fractura, mientras que otros exhibieron fracturas de tipo frágil en algunas zonas del elemento. En comparación a los especímenes tipo EC-CA de la Variable 1, se observó una disminución de la susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal, debido que el recubrimiento de resina epóxica aumentó la rigidez de las capas externas y, relleno las aristas de unión, conformando un elemento geométrico con mayor uniformidad. El aumento de la rigidez de los especímenes, produjo una transmisión de los esfuerzos más eficiente, lo que resultó en la disminución de la deformación del elemento y del efecto de áreas de sobrecarga por careo insuficiente y, la reducción del aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial, Figura 44.



Figura 42. Especímenes ECI-CR-01, ECI-CR-02. La adición de la resina epóxica como recubrimiento aumentó la rigidez de los elementos, permitiendo una transmisión de esfuerzos sobre el eje axial más eficiente y, una menor deformación y aplastamiento.

Los especímenes que obtuvieron valores mayores de resistencia a esfuerzos de compresión mostraron un ligero aplastamiento en las superficies de contacto y escasa deformación a lo largo del elemento. En estos especímenes la transmisión de los esfuerzos se mantuvo uniforme a lo largo del eje axial generando un ligero pandeo global, Figura 44.

En los especímenes que se obtuvo menor resistencia a esfuerzos de compresión, se presentó delaminación de las capas externas que poseían mayor rigidez por el recubrimiento de resina epóxica, por lo que, al desprenderse estas capas, las capas internas estuvieron sujetas al aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial; efecto observado en los especímenes de prueba compuestos sólo por cartón de la Variable 1 (EC-CA), Figura 45.





Figura 45. Espécimen de prueba EC1-CR-08. Efecto de delaminación de las capas externas recubiertas por resina epóxica.

Los especímenes EC1-CR-07, EC1-CR-08, EC1-CR-09 y EC1-CR-10 fueron sometidos a una mayor duración del ensayo a esfuerzos de compresión; en los que se observó un efecto de reacomodo de las capas del material por el aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial, dando por resultado un comportamiento plástico muy amplio, Figura 46.



Figura 46. En los especímenes EC1-CR-07, EC1-CR-08, EC1-CR-09 y EC1-CR-10 fueron sometidos a una mayor duración del ensayo, observando un reacomodo de las capas del material por el aplastamiento de plegado continuo a lo largo del eje axial.

***Propiedades mecánicas de Variable 2, especímenes EC1-CR, EC2-CR.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de la Variable 2 (EC-CR) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba EC1-CR y EC2-CR, implementando el método de regresión polinomial de grado 4 y 5, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Para cada muestreo (EC1-CR y EC2-CR) fue desarrollada una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular.

En el análisis estadístico del muestreo EC1-CR se utilizaron los valores de nueve especímenes de prueba: EC1-CR-01, EC1-CR-02, EC1-CR-04, EC1-CR-05, EC1-CR-06, EC1-CR-07, EC1-CR-08, EC1-CR-09, EC1-CR-10. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC1-CR se presentan en la Tabla 35.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 2, especímenes EC1-CR</b>	
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>139.96 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Esfuerzo último a una deformación de 0.045 cm/cm</b>	<b>132.49 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>10,958.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>68.48 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 35. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 2, ensayo EC1-CR.*

En el análisis estadístico del muestreo EC2-CR se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: EC2-CR-01, EC2-CR-02, EC2-CR-03, EC2-CR-04, EC2-CR-06. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC2-CR se presentan en la Tabla 36.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 2, especímenes EC2-CR</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>99.24 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a una deformación de 0.045 cm/cm	<b>99.24 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>3,995.50 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>85.90 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 36. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 2, ensayo EC2-CR.*

En la Figura 47 y Figura 48 se presentan las gráficas esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes EC1-CR y EC2-CR. En ambos muestreos, los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. El comportamiento lineal y el límite elástico convencional de los especímenes EC-CR son muy similares a los de la Variable 1, con un ligero incremento en los valores de esfuerzo; debido al aumento de rigidez de los especímenes por la aplicación de la resina epóxica como recubrimiento.

En la zona plástica, el material de la Variable 2 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de compresión a una deformación de 0.035 cm/cm a 0.05 cm/cm. En su microestructura, el efecto de aplastamiento por plegado continuo de las fibras de celulosa se produce ligeramente aplazado en comparación a los especímenes de la Variable 1, a causa de que los elementos poseen mayor rigidez; una vez que ocurre el desprendimiento de las capas externas que poseen la resina epóxica de las capas externas, el efecto de aplastamiento por plegado continuo, sin la disminución de resistencia considerable, se presenta de manera análoga a los especímenes de la Variable 1.

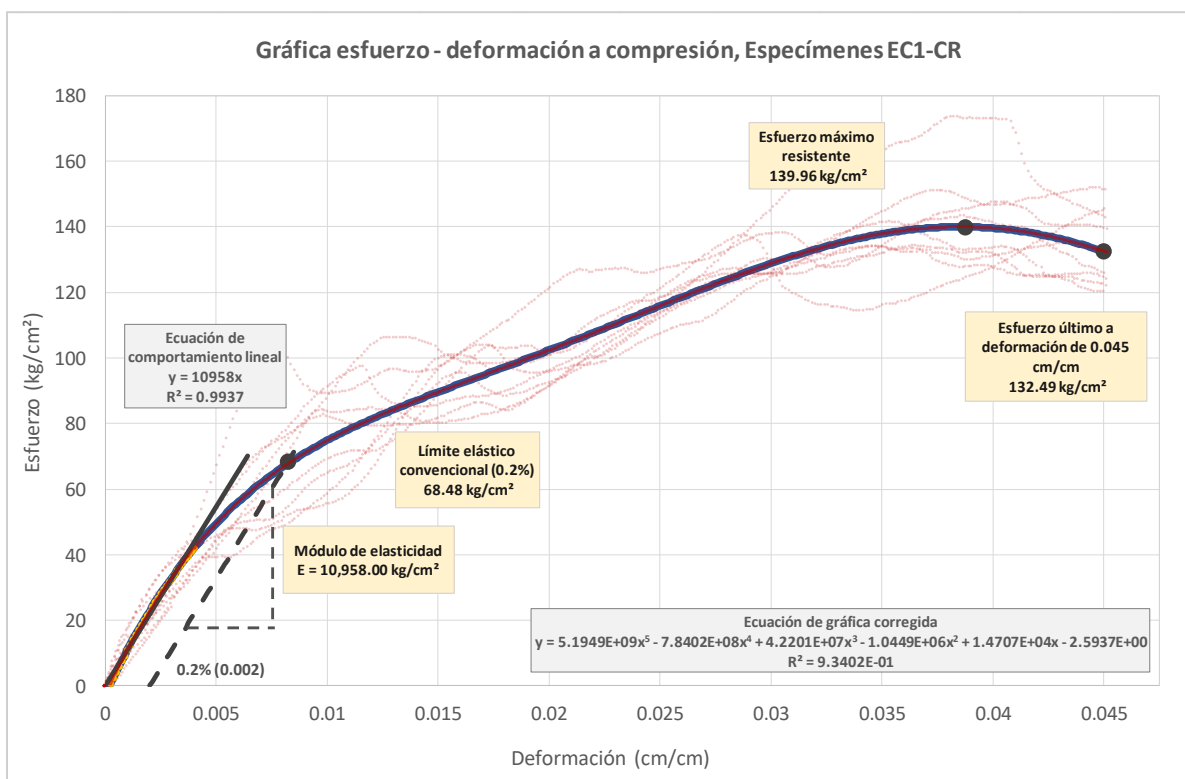


Figura 47. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 2, ensayo EC1-CR.

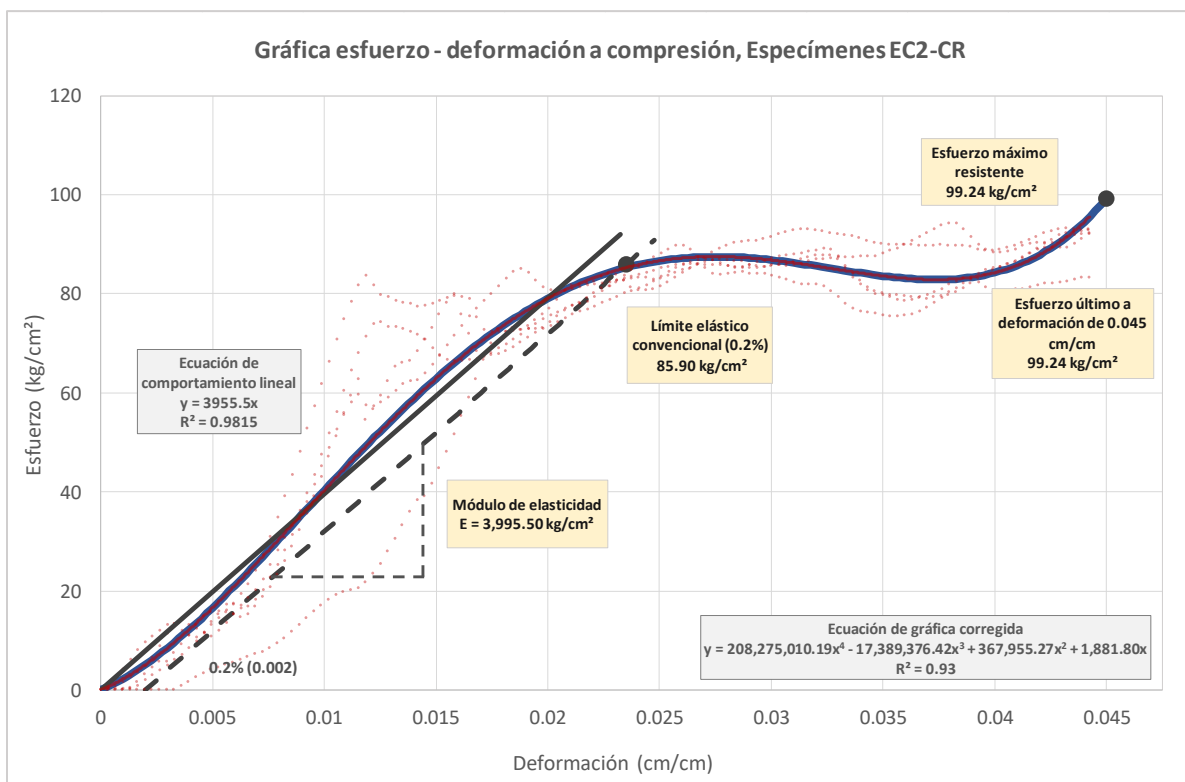


Figura 48. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 2, ensayo EC2-CR.

De manera similar al análisis de la Variable 1 (cartón Kraft SUS sin aditivos), en las Figuras 47 y 48, se observa que los especímenes del muestreo EC1-CR obtuvieron valores de resistencia mayores con deformaciones menores que los del muestreo EC2-CR; por el mayor grado de compactación de las fibras de celulosa.

El límite elástico convencional para el muestreo EC1-CR (cartón Uline) se encuentra a una deformación de 0.008 cm/cm, mientras que, para el muestreo EC2-CR (cartón Ratioform) se encuentra a una deformación de 0.023 cm/cm; reiterando que las características del cartón de la marca Uline han sido más eficientes en el ensayo mecánicos a esfuerzos de compresión de la Variable 1 y Variable 2. Además, en el ensayo de la muestra EC2-CR la deformación de los especímenes es más amplia que los especímenes EC1-CR.

En ambos muestreos de la Variable 2, el valor del módulo de elasticidad aumentó un 182% (EC1-CR) y un 171% (EC2-CR) con respecto a los especímenes de la Variable 1; debido al aumento de la rigidez de los elementos por la incorporación del recubrimiento de resina epóxica.

### **Resultados de Variable 3 – Especímenes de prueba EC1-CF-n, EC2-CF-n.**

El ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (CF-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de una matriz de cartón reforzada con un tejido tipo Twill de fibras de carbono 12K, unido por medio de una resina epóxica, que funge como agente aglomerante en las zonas de interface. Al igual que en la Variable 2, el interior del tubo cilíndrico fue recubierto con resina epóxica como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo.

La Variable 3 consiste en el material compuesto planteado para el proyecto de investigación, con el objetivo de optimizar las propiedades mecánicas del cartón y de las fibras de carbono para generar un material compuesto de baja densidad con buena resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión para estructuras ligeras de gran claro. Los valores de resistencia a esfuerzos de compresión obtenidos del ensayo son comparados más adelante con las Variables 1 y 2, y con la madera como material tradicional de la industria de la Construcción.

En el muestreo EC-1 se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de diez especímenes de prueba con la denominación EC1-CF-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill) con los parámetros presentados en la Tabla 26, Figura 49. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC1-CF-n se muestran en la



Tabla 29. 37. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó una deformación límite de 0.021 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.021 mm/mm)
EC1-CF-01	2,724	537.22	0.0113	405.48
EC1-CF-02	2,083	410.81	0.0081	311.41
EC1-CF-03	1,657	326.79	0.0134	261.31
EC1-CF-04	1,960	386.55	0.0100	308.65
EC1-CF-05	1,291	254.61	0.0132	216.94
EC1-CF-06	2,212	436.25	0.0127	346.71
EC1-CF-07	1,504	296.62	0.0191	275.51
EC1-CF-08	1,088	214.57	0.0164	172.96
EC1-CF-09	48	9.47	0.0094	9.27
EC1-CF-10	1,820	358.94	0.0186	286.95

Tabla 37. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC1-CF.

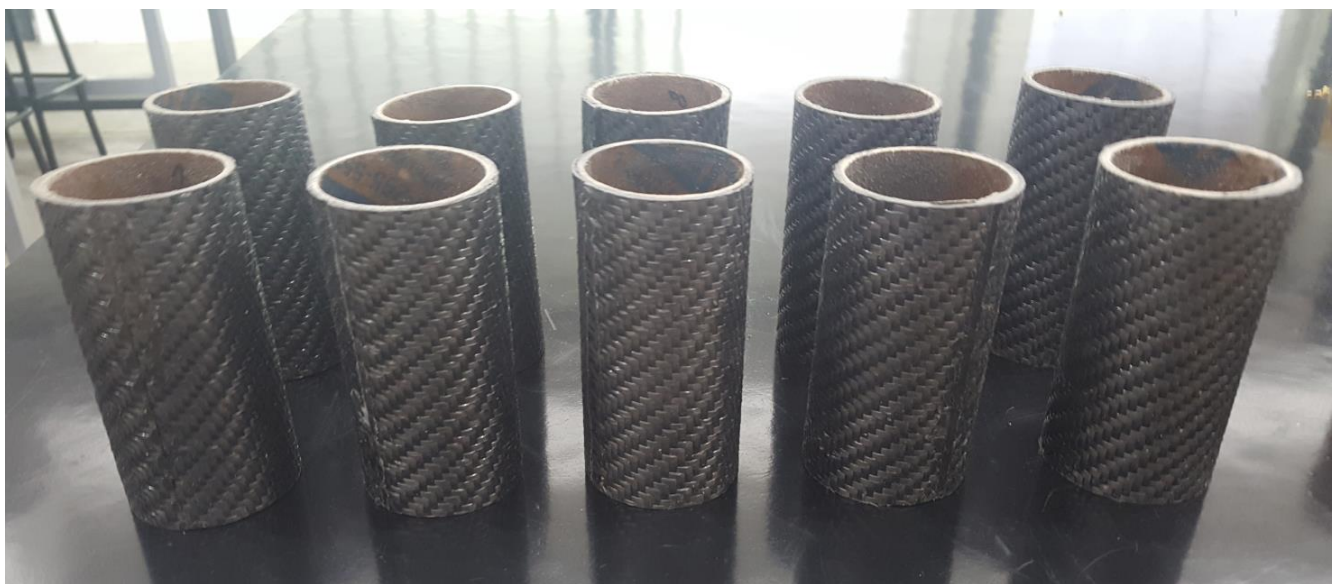


Figura 49. Especímenes de prueba EC1-CF-n para ensayo a la compresión.

En el muestreo EC-2 se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de seis especímenes de prueba con la denominación EC2-CF-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill) con los parámetros presentados en la Tabla 26, Figura 33. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC2-CF-n se muestran en la Tabla 38. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó a una deformación límite de 0.021 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.045 mm/mm)
EC2-CF-01	1,431	314.00	0.0114	250.81
EC2-CF-02	1,705	374.13	0.0148	318.39
EC2-CF-03	2,593	568.98	0.0166	531.46
EC2-CF-04	1,054	231.28	0.0167	207.36
EC2-CF-05	1,413	310.05	0.0129	282.84
EC2-CF-06	2,260	495.91	0.0135	395.41

Tabla 38. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC2-CF.



Figura 43. Especímenes de prueba EC2-CF-n para ensayo a la compresión.

### *Comportamiento mecánico de Variable 3, especímenes EC1-CF, EC2-CF.*

En el ensayo a esfuerzos de compresión de las muestras EC1-CF y EC2-CF fueron identificados patrones generales que condicionaron el comportamiento mecánico de los especímenes y sus valores de resistencia. La conformación del material compuesto por medio de capas de cada fase (matriz, refuerzo, agente aglomerante) incrementó las áreas de sección, lo que generó un aumento notable en la rigidez de los elementos, propiciando fallas de tipo frágil. Debido a la elevada rigidez de los elementos, la susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal (observada en las Variables 1 y 2) es casi nula. En el interior de los tubos cilíndricos se hacen notables las fallas de tipo frágil, presentes al centro, observadas como un efecto de plegado perpendicular al eje axial del elemento, Figura 51.

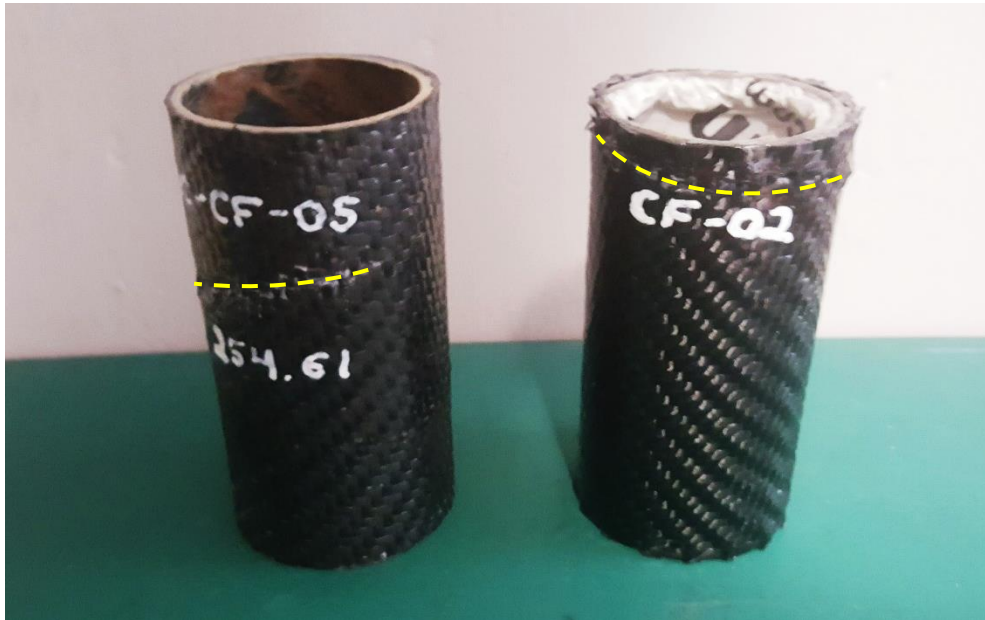


*Figura 51. Espécimen de prueba EC2-CF-02. Debido a la elevada rigidez del material compuesto, el elemento presenta escasa deformación. Al interior del tubo se observa la deformación de la fase matriz de cartón que sirve como base para el tejido de fibras de carbono.*

La unión de la capa de fibras de carbono, en forma de tejido, sobre la matriz de cartón, actúa como cinturón de contención, restringiendo la deformación por aplastamiento continuo del elemento, y, por lo tanto, manteniendo la distribución de los esfuerzos de manera uniforme a lo largo del eje axial, lo que permite un notable incremento en la resistencia a la compresión en comparación a las Variables 1 y 2.

Cabe destacar que, el comportamiento mecánico del material compuesto y sus valores de resistencia, están condicionados por la calidad de manufactura de los especímenes de prueba, haciendo énfasis en la

importancia de una correcta adherencia de las capas en la zona de interface (unión entre capas de la fase de refuerzo con la fase matriz), el careo de las superficies de contacto y, en menor medida, la distribución uniforme de la resina epóxica en el elemento. Al haber una correcta unión entre capas de las fases componentes, estas trabajan en conjunto para transmitir los esfuerzos a compresión de manera más eficiente, adquiriendo valores de resistencia mayores y deformaciones menores.



*Figura 52. A la izquierda espécimen EC1-CF-05; a la derecha espécimen EC2-CF-02. Se observa la escasa deformación de los especímenes del muestreo EC1-CF en comparación a los especímenes EC2-CF, así como la ausencia del fenómeno de aplastamiento de las superficies de contacto.*

Al realizar la comparación de los dos muestreos de la Variable 3, EC1-CF y EC2-CF, se observó que la fase matriz de cartón, determina ampliamente el tipo de falla del elemento. Los especímenes del muestreo EC2-CF que poseían un cartón con una compactación menor de las fibras de celulosa y menor rigidez, manifestaron mayores deformaciones, por aplastamiento continuo desde las superficies de apoyo hacia el centro. En cambio, en aquellos especímenes del muestreo EC1-CF, este tipo de deformación es inexistente, Figura 52. Cuando la fase matriz cede por aplastamiento continuo, la capa de tejido de fibras de carbono comienza a desprenderse de esta y a fracturarse desde las superficies de apoyo, al no poder asimilar la deformación plástica del cartón y al obstaculizarse con el resto del tejido a lo largo del eje axial, Figura 53.



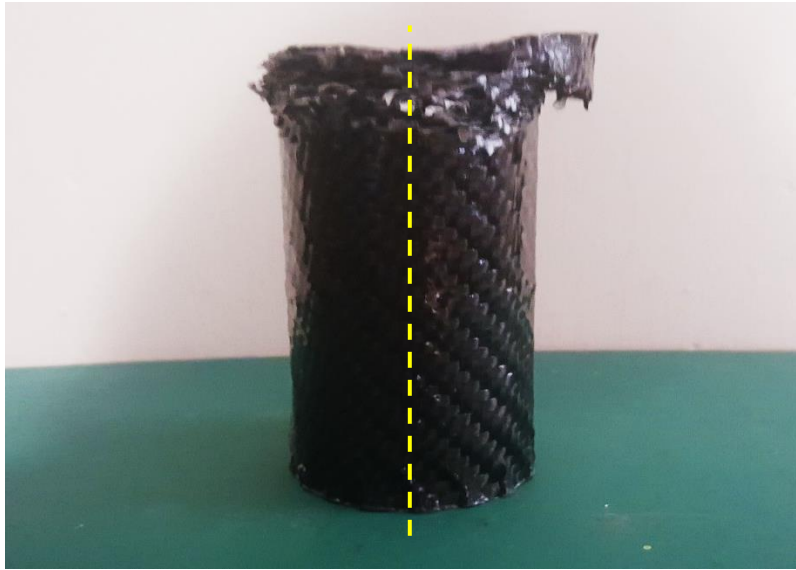


Figura 53. Especimen EC2-CF-03. Desprendimiento de la capa externa de tejido de fibras de carbono sobre la capa matriz de cartón.

Los elementos que obtuvieron valores de resistencia mayores a esfuerzos de compresión presentaron una ligera deformación por pandeo global hasta llegar a la fractura de tipo frágil al centro; mientras que en los especímenes que se obtuvo menor resistencia, se exhibió el efecto de desprendimiento entre capas y el desplazamiento de la carga sobre el eje axial del elemento, Figura 54.

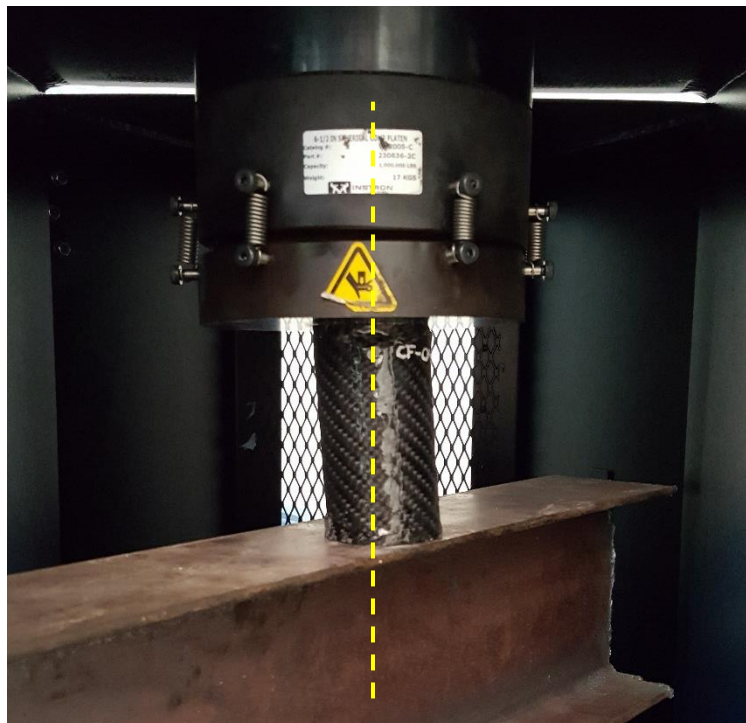


Figura 54. Ejecución de ensayo a esfuerzos de compresión de espécimen tipo EC2-CF, en el que se observa el desplazamiento de la carga del eje axial del elemento, generando una distribución de esfuerzos no uniforme.

***Propiedades mecánicas de Variable 3, especímenes EC1-CF, EC2-CF.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (EC-CF) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba EC1-CF y EC2-CF, implementando el método de regresión polinomial de grado 5 y 3, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Para cada muestreo (EC1-CF y EC2-CF) fue desarrollada una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular.

En el análisis estadístico del muestreo EC1-CF se utilizaron los valores de siete especímenes de prueba: EC1-CF-03, EC1-CF-04, EC1-CF-05, EC1-CF-06, EC1-CF-07, EC1-CF-08, EC1-CF-10. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC1-CF se presentan en la Tabla 39.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 3, especímenes EC1-CF</b>	
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>273.47 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Esfuerzo último a una deformación de 0.021 cm/cm</b>	<b>238.58 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>29,532.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>269.47 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 39. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 3, ensayo EC1-CF.*

En el análisis estadístico del muestreo EC2-CF se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: EC2-CF-01, EC2-CF-02, EC2-CF-03, EC2-CF-04, EC2-CF-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC2-CF se presentan en la Tabla 40.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 3, especímenes EC2-CF</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>341.67 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a una deformación de 0.021 cm/cm	<b>298.75 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>25,036.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>337.98 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 40. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 3, ensayo EC2-CF.*

En la Figura 55 y Figura 56 se presentan las gráficas esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes EC1-CF y EC2-CF. En ambos muestreos, los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.21%. El comportamiento lineal y el límite elástico convencional de los especímenes EC-CF son más regulares en comparación a los de las Variables 1 y 2, debido a la elevada rigidez del material compuesto y a la geometría de los especímenes (mayor espesor de la sección por la unión de las fases).

En la zona plástica, el material compuesto (Variable 3) adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de compresión a una deformación de 0.013 cm/cm a 0.017 cm/cm. Se ha determinado que el cartón utilizado para el muestreo EC1-CF presenta mejor comportamiento mecánico por el mayor grado de compresibilidad de las fibras de celulosa; además de conformar un mayor espesor de pared del tubo cilíndrico de cartón, logrando un elemento más rígido y estable. Debido a esto, los especímenes del muestreo EC1-CF no presentaron una deformaciones sobresalientes; en comparación a los especímenes del muestreo EC2-CF, en los cuales se observa un ligero efecto de aplastamiento por plegado continuo.

Cabe mencionar que, la elaboración de los especímenes EC2-CF fue mejorada por retroalimentación a partir de los resultados obtenidos por la manufactura de los especímenes EC1-CF, logrando una mejor adhesión entre las fases componentes, factor reflejado en la obtención de valores de resistencia más elevados.

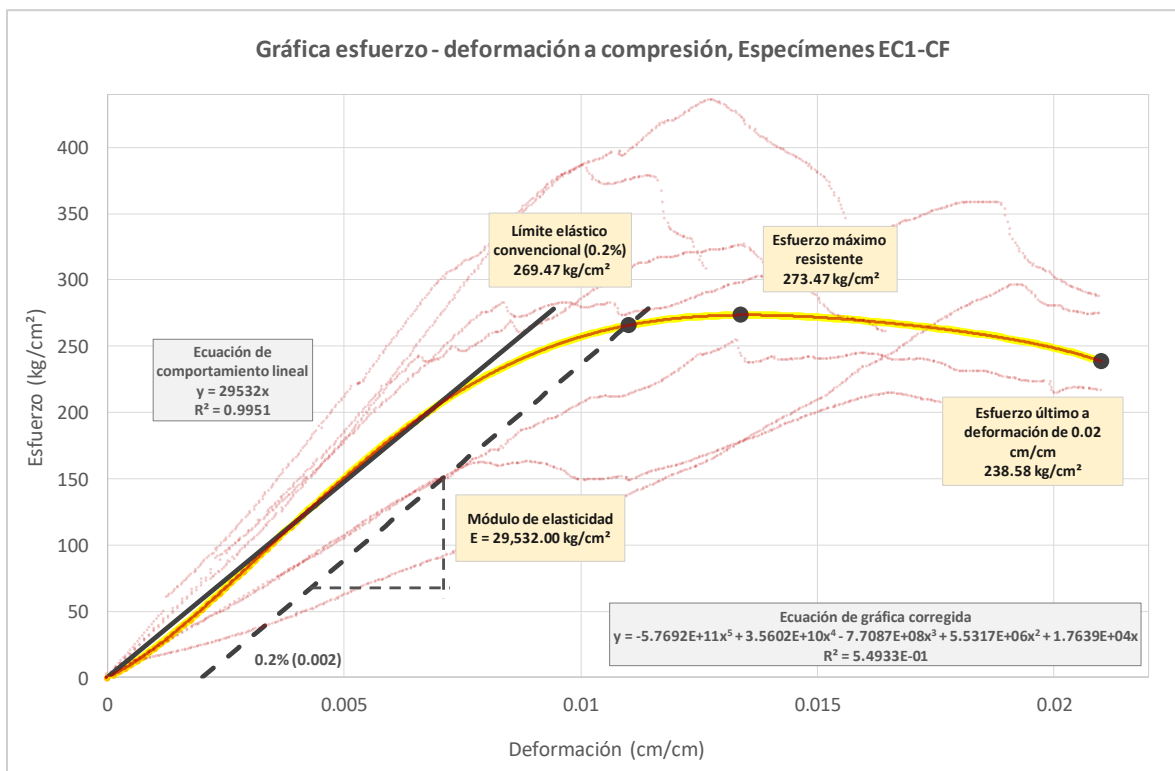


Figura 55. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (material compuesto), ensayo EC1-CF.

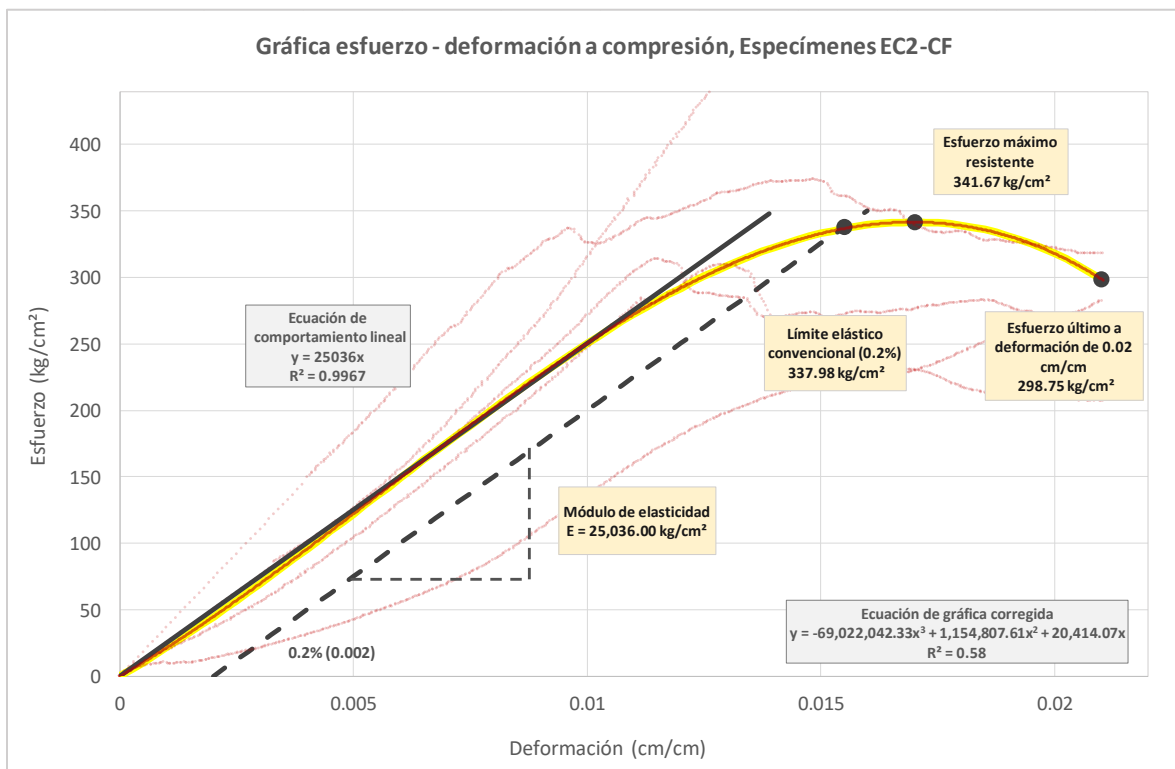


Figura 56. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (material compuesto), ensayo EC2-CF.



De manera general, se observa que el comportamiento mecánico de los especímenes de la Variable 3 (EC-CF) es menos previsible que las Variables 1 y 2, por el aumento de factores que influyen en la conformación del material compuesto; como son, la manufactura de los especímenes por el método de estratificación manual, la precisión del espesor de las capas de las fases componentes y/o la ausencia de oquedades en las zonas de interface.

Analizando las gráficas esfuerzo – deformación de la Variable 3, se determina que los especímenes del muestreo EC2-CF poseen menor rigidez que los del muestreo EC1-CF, al presentar una mayor deformación y un módulo de elasticidad menor. No obstante, los valores de resistencia a esfuerzos de compresión obtenidos, fueron mayores en un 25% en el ensayo del muestreo EC2-CF.

El límite elástico convencional para el muestreo EC1-CF (cartón Uline) se encuentra a una deformación de 0.011 cm/cm; para el muestreo EC2-CF (cartón Ratioform) se encuentra a una deformación de 0.0155 cm/cm. En la Variable 3 del muestreo EC1-CF, el valor del módulo de elasticidad aumentó un 390% en comparación a la Variable 1 y en un 170% respecto a la Variable 2. Del muestreo EC2-CF, el valor del módulo de elasticidad aumentó un 973% en comparación a la Variable 1 y en un 527% respecto a la Variable 2.

### **Análisis comparativo de variables – Ensayo a esfuerzos de compresión**

El análisis comparativo de las variables pretende determinar el comportamiento y las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de las fases constituyentes del material compuesto, con el objetivo de establecer el grado de refuerzo que le otorga la fase dispersa (tejido de fibras de carbono 12K Twill) a la fase matriz de cartón, Figura 57. En el ensayo de la Variable 1 (especímenes EC1-CA-n) se obtuvieron valores de resistencia similares a pruebas realizadas en investigaciones sobre tubos de cartón estructurales aplicados en la Arquitectura<sup>15</sup>, concluyendo que la fase matriz de cartón utilizada posee las características de microestructura, composición química y procesamiento, para ser implementada en elementos estructurales arquitectónicos.



*Figura 57. Comparación de especímenes de prueba EC1 de las tres variables experimentadas, posterior al ensayo a esfuerzos de compresión.*

De manera general, el comportamiento mecánico de los especímenes EC-CA-n (Variable 1) fue primordialmente de tipo dúctil, ya que la deformación elástica de estos elementos fue breve en comparación con su deformación plástica. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, propiciadas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), ejemplificándose por el aplastamiento de las superficies de contacto y el plegado diagonal en las zonas de unión multicapa. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo EC1-CA-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de  $92.46 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $6,031.50 \text{ kg/cm}^2$ ; en los especímenes

---

<sup>15</sup> En las pruebas de resistencia para tubos de cartón, realizadas por el Arq. Shigeru Ban, se obtuvieron valores de esfuerzo máximo resistente de  $97.17 \text{ kg/cm}^2$  a  $113.90 \text{ kg/cm}^2$ .

del muestreo EC2-CA-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 82.61 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 2,332.40 kg/cm<sup>2</sup>.

Los especímenes de prueba EC-CR-n (Variable 2) presentaron un comportamiento semirrígido y dúctil. La incorporación de la resina epóxica como agente protector de recubrimiento aumentó la rigidez y resistencia de la fase de cartón, produciendo inicialmente fallas de tipo frágil en ciertas áreas de los especímenes de prueba. Una vez fracturadas las capas exteriores con recubrimiento de resina epóxica, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. Cabe mencionar que, la aplicación de la resina epóxica sobre el cartón se realizó con el objetivo principal de ser un agente protector de barrera ante los efectos de intemperismo. Aun así, la incorporación de la resina epóxica generó un aumento en las capacidades de resistencia mecánica de la fase de cartón. En los especímenes del muestreo EC1-CR-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 139.96 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 51% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 10,958.00 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo EC2-CR-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 99.24 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 20% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 3,995.50 kg/cm<sup>2</sup>.

Los especímenes de prueba EC-CF-n (Variable 3) comprenden el material compuesto del proyecto de investigación, constituidos a base de una matriz de cartón reforzada por un tejido de fibras de carbono 12K Twill. La unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de compresión, elevando los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes; en comparación a las Variables 1 y 2. El comportamiento mecánico y la falla de los especímenes EC-CF-n fue de tipo frágil, al presentar deformaciones relativamente bajas, siendo ligeramente perceptibles a la vista en el caso del muestreo EC1-CF-n. Cabe destacar que, el incremento de la rigidez del material estuvo ampliamente condicionado por el aumento del espesor de pared de los especímenes; lo que a su vez disminuyó las fallas de plegado continuo por devanado multicapa helicoidal, observadas en las Variables 1 y 2. En los especímenes del muestreo EC1-CF-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 273.47 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 196% en relación con la Variable 1 y del 95% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 29,532.00 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo EC2-CF-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 341.67 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 314% en relación con la Variable 1 y del 244% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 25,036.00 kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla 41, Figura 58 y Figura 59, se presentan las propiedades mecánicas y las gráficas esfuerzo - deformación del ensayo a esfuerzos de compresión de las tres variables experimentadas. En las gráficas de las Figura 58 y 59 se observa el notable incremento de la rigidez y de la resistencia mecánica de la fase matriz de

cartón con la incorporación de la resina epóxica como recubrimiento y, con la combinación de la fase de refuerzo de fibras de carbono para la conformación del material compuesto.

<b>Propiedades mecánicas de variables a esfuerzos de compresión</b>			
	<b>Muestreo EC1-CA Variable 1</b>	<b>Muestreo EC1-CR Variable 2</b>	<b>Muestreo EC1-CF Variable 3</b>
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>92.46 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>139.96 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>273.47 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>6,031.50 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>10,958.00 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>29,532.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>65.49 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>68.48 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>269.47 kg/cm<sup>2</sup></b>
	<b>Muestreo EC2-CA Variable 1</b>	<b>Muestreo EC2-CR Variable 2</b>	<b>Muestreo EC2-CF Variable 3</b>
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>82.61 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>99.24 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>341.67 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>2,332.40 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>3,995.50 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,036.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>76.96 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>85.90 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>337.98 kg/cm<sup>2</sup></b>

Tabla 41. Comparación de valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de las tres variables experimentadas.

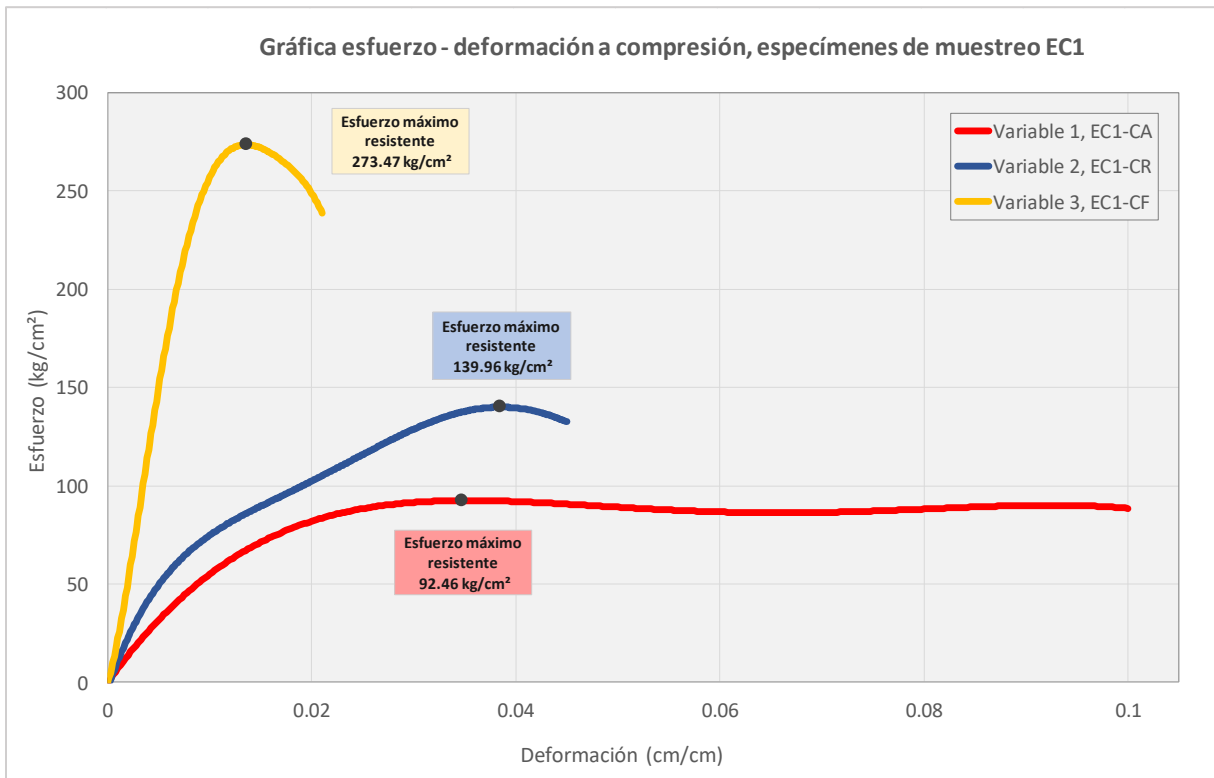


Figura 58. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de las tres variables experimentadas, muestreo EC1.

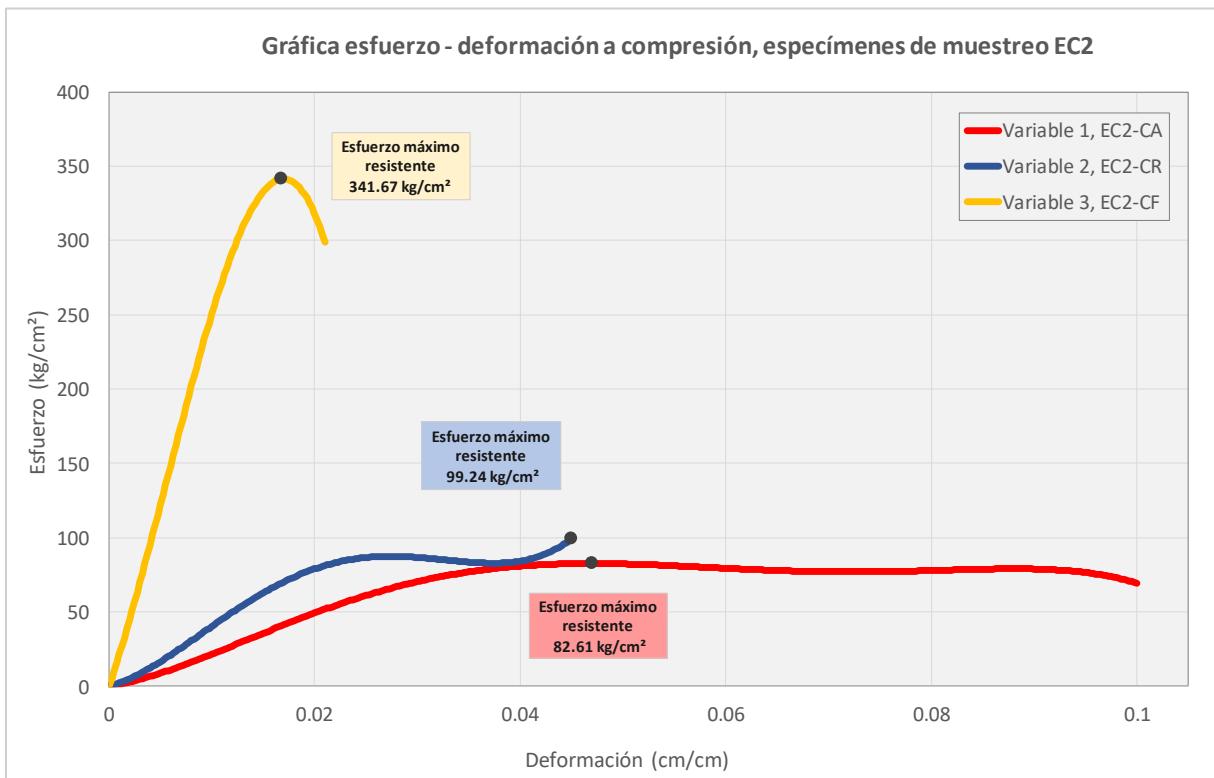


Figura 59. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de las tres variables experimentadas, muestreo EC2.

## **Ensayos mecánicos a esfuerzos de tensión – ET1, ET2**

El ensayo a esfuerzos de tensión consiste en someter los especímenes de prueba a una carga axial incrementada a tensión, suficiente para causar rotura. La obtención de las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión se ha realizado mediante los métodos de ensayo y parámetros establecidos en las normas ASTM A370-03a y ASTM D638-03. Con base en las especificaciones de cada norma, se elaboraron dos muestreos de las tres variables (CA-n, CR-n, CF-n) bajo la denominación ET1 y ET2.

El muestreo ET1 fue elaborado y ensayado en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura, UNAM; contemplando 6 especímenes de prueba por cada variable. El muestreo ET2 fue elaborado y ensayado en el Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales de la Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Terrassa, UPC; contemplando 6 especímenes de prueba por cada variable. Ambos muestreos fueron elaborados bajo las mismas especificaciones de composición de fases, estructura multicapa y proceso de fabricación; con variaciones en la geometría (los especímenes ET1 como tubos cilíndricos; los especímenes ET2 como prismas rectangulares planos), la composición química (se utilizaron dos tipos de resina epóxica) y las dimensiones de los especímenes de prueba (se utilizaron dos espesores de la fase matriz de cartón). Las variaciones dependieron de la obtención de la materia prima disponible en el sitio de ensayo; especificadas en el Capítulo V. El objetivo de esto fue observar el comportamiento de los materiales de las tres variables, con distintas características geométricas (tubos cilíndricos y prismas rectangulares planos).

En el ensayo de los especímenes ET1, que presentan una geometría tubular cilíndrica, se implementaron rellenos sólidos en las áreas de sujeción, de manera que las mordazas no produjeran deformaciones o aplastamientos de los especímenes previamente y durante el ensayo, ajenos a los esfuerzos de tensión de la prueba. Durante la realización de ensayos preliminares de los especímenes del muestreo ET2, se observó que la rotura se presentaba en las áreas de sujeción de las mordazas, es decir, en los extremos<sup>16</sup>; fenómeno que era influenciado por la curvatura en el sentido perpendicular al eje axial (láminas obtenidas de una sección de tubos cilíndricos de cartón). Para minimizar este efecto, se procedió a colocar unas placas de aluminio en las áreas de sujeción, unidas por medio de resina epóxica, permitiendo así una sujeción precisa de los especímenes.

---

<sup>16</sup> Al efectuar ensayos de resistencia a esfuerzos de tensión, se procura que la falla por rotura ocurra al centro del espécimen, de manera que los esfuerzos hayan sido transmitidos eficientemente, y así obtener valores más precisos del material ensayado.

### Resultados de Variable 1 – Especímenes de prueba ET1-CA-n, ET2-CA-n.

El ensayo de resistencia a esfuerzos de tensión de la Variable 1 (CA-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de cartón, con el fin de observar las propiedades mecánicas a la tensión del material que funge como matriz en el material compuesto propuesto en la investigación.

En el muestreo ET-1 se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con geometría tubular cilíndrica, bajo la denominación ET1-CA-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS sin aditamentos o aditivos) con los parámetros presentados en la Tabla 24, Figura 33. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET1-CA-n se muestran en la Tabla 29. 42.

Espécimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
ET1-CA-01	342	116.38	0.0254	113.32
ET1-CA-02	338	115.02	0.0113	110.26
ET1-CA-03	380	129.31	0.0337	128.63
ET1-CA-04	352	119.79	0.0245	111.62
ET1-CA-05	350	119.10	0.0149	116.72
ET1-CA-06	387	131.70	0.0205	128.97

Tabla 42. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET1-CA.

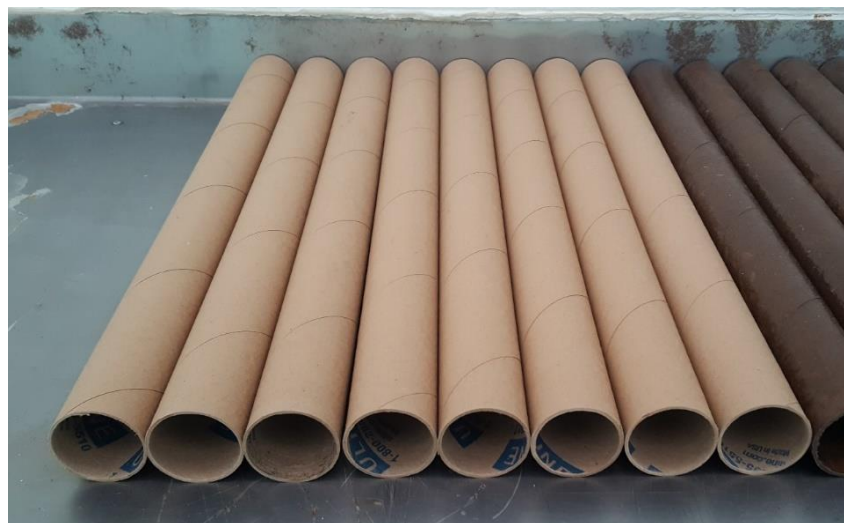


Figura 60. Especímenes de prueba ET1-CA-n para ensayo a la tensión.

En el muestreo ET-2 se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con geometría prismática rectangular plana, bajo la denominación ET2-CA-n (láminas de cartón Kraft SUS sin aditamentos o aditivos) con los parámetros presentados en la Tabla 25, Figura 61. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET2-CA-n se muestran en la Tabla 29. 43.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
ET2-CA-01	42.84	150.32	1.0395	132.06
ET2-CA-02	39.67	139.22	1.0660	129.20
ET2-CA-03	50.08	175.73	0.9670	162.12
ET2-CA-04	37.23	130.63	0.9050	126.33
ET2-CA-05	48.55	170.36	1.1770	159.26
ET2-CA-06	36.00	126.33	0.7925	118.10

Tabla 43. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET2-CA.

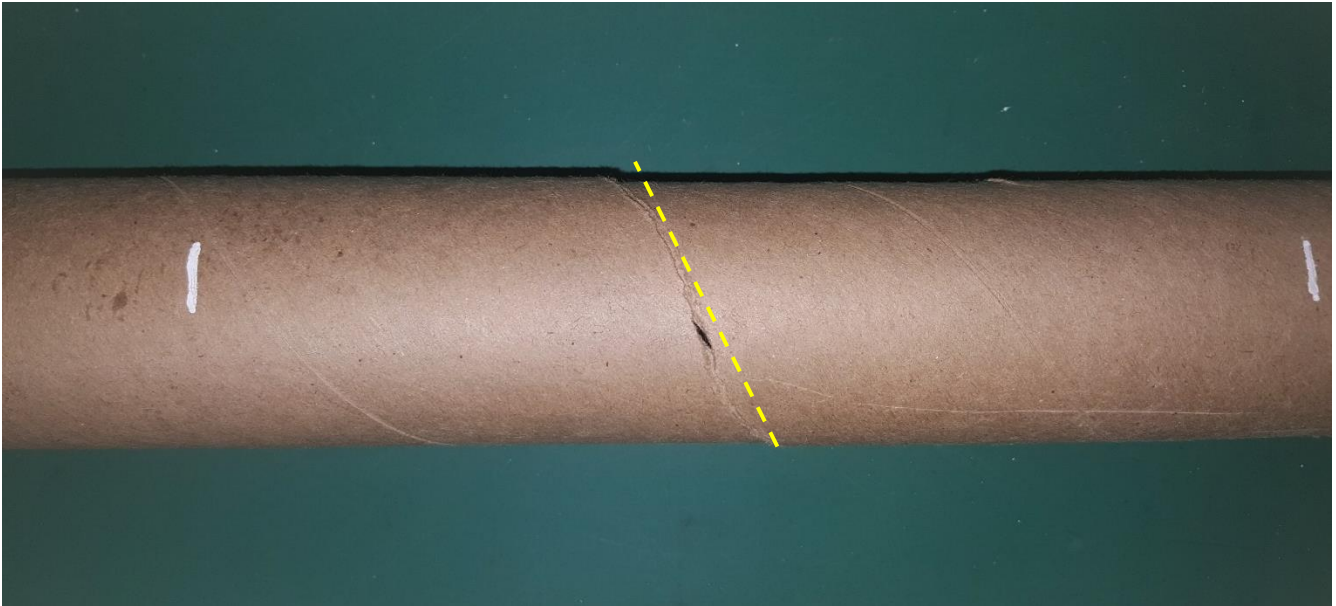


Figura 61. Especímenes de prueba ET2-CA-n para ensayo a la tensión.



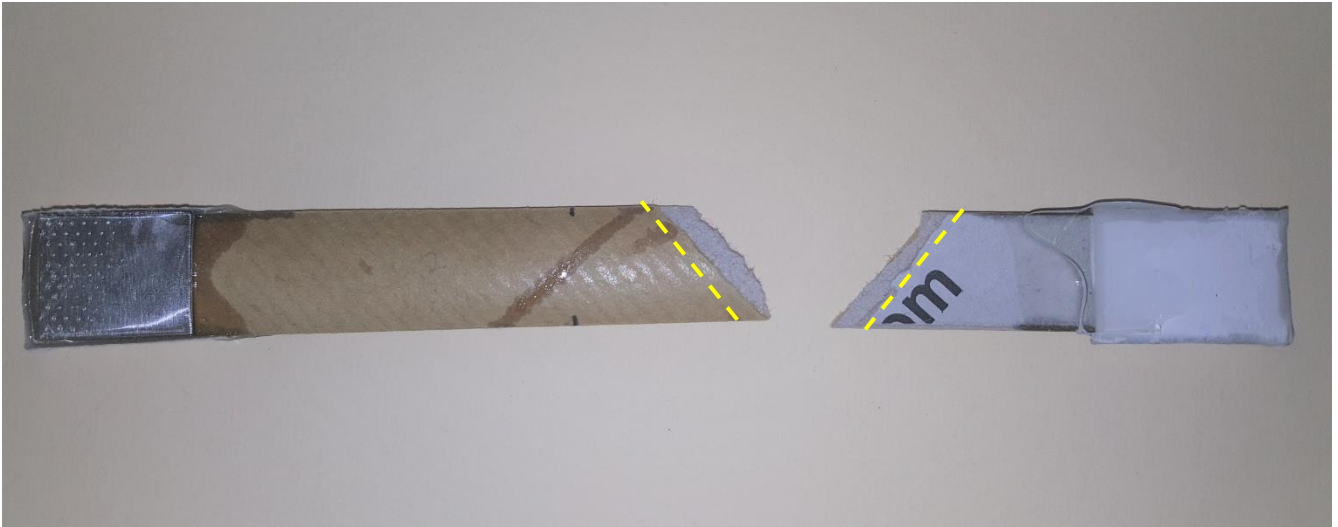
### ***Comportamiento mecánico de Variable 1, especímenes ET1-CA, ET2-CA.***

En el ensayo a esfuerzos de tensión de las muestras ET1-CA y ET2-CA se identificó que todos los especímenes fueron susceptibles al devanado multicapa helicoidal, como fue observado en el ensayo de los especímenes a esfuerzos de compresión, de manera que las fallas se presentaron de manera diagonal en las áreas de unión del multicapa del cartón, Figura 62. La deformación de los especímenes fue de tipo dúctil, al producirse una amplia deformación previo a la rotura. Cabe destacar que, al efectuar estos ensayos, el proceso de colocación de los especímenes en los equipos de prueba tuvo que ser efectuado cuidadosamente, para evitar ejercer una precarga o provocar una rotura ajena a los esfuerzos de tensión del ensayo.



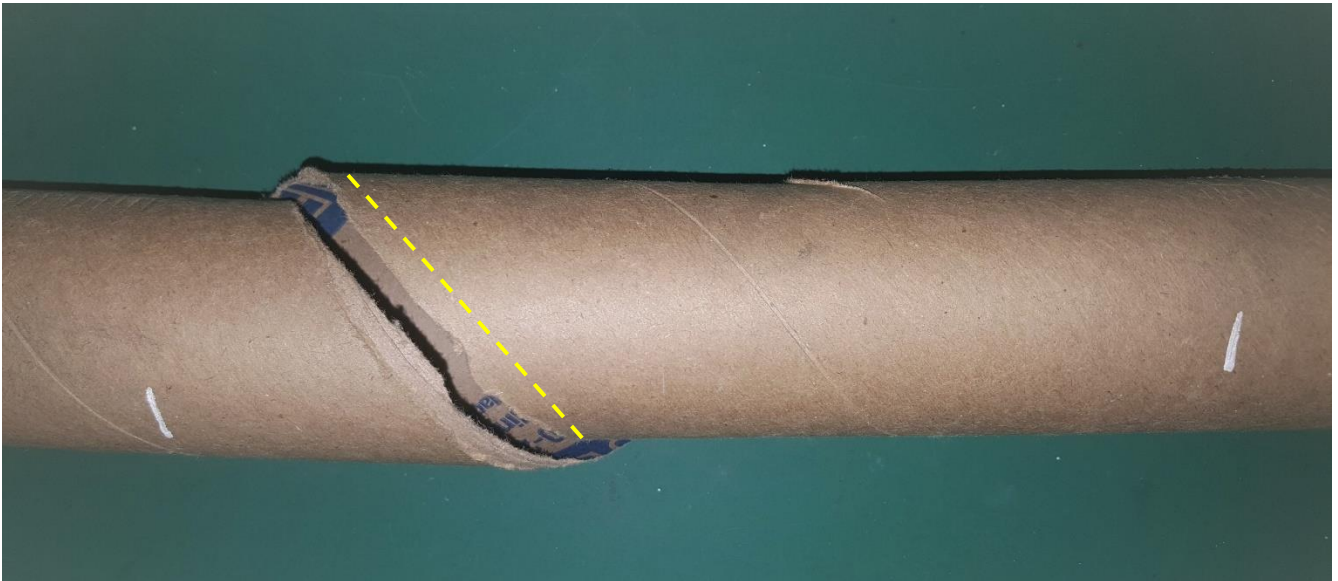
*Figura 62. Especimen de prueba ET1-CA-06. Falla por rotura al centro del espécimen, influenciada por las uniones del devanado multicapa helicoidal.*

A nivel de microestructura, en las fallas por rotura que fueron propiciadas por el devanado multicapa helicoidal, las fibras de celulosa se separaron entre sí, en distintos niveles del multicapa, debido a una relativamente baja resistencia de adherencia entre capas del cartón, Figura 63. Se prevé que este efecto podría ser disminuido al manufacturar el cartón en una sola capa del mismo espesor, de manera que el material se comportase como un sólido entero.



*Figura 63. Especimen de prueba ET2-CA-02. Se observa la rotura por delaminación de la fase de cartón, mostrando relativamente baja resistencia entre capas.*

En los especímenes ET1-CA, las fallas por rotura se presentaron al centro, en forma diagonal, comportamiento debido a las características del devanado multicapa helicoidal. Estas fallas por rotura no produjeron que los especímenes se separen completamente en dos partes, ya que, por las características de los tubos cilíndricos, este efecto de rotura helicoidal continuaría presentándose desde el centro hacia los extremos, generando un prolongado efecto de delaminación, Figura 64.



*Figura 64. Especimen de prueba ET1-CA-05. Efecto de rotura helicoidal producido desde el centro hacia los extremos.*

En los especímenes ET2-CA, las fallas por rotura se generaron en una posición media entre el centro y los extremos de sujeción; repitiendo el fenómeno de delaminación y la separación de las fibras de celulosa, visto en los especímenes ET1-CA, pero en menor proporción, debido a que, si presentaron rotura total, Figura 65.



*Figura 65. Espécimen de prueba ET2-CA-02. Se observa que en los especímenes del muestreo ET2-CA-n las fallas por rotura se presentaron en una posición media entre el centro y los extremos de sujeción.*

### ***Propiedades mecánicas de Variable 1, especímenes ET1-CA, ET2-CA.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de la Variable 1 (ET-CA) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba ET1-CA y ET2-CA, implementando el método de regresión polinomial de grado 5 y grado 4, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Para cada muestreo (ET1-CA y ET2-CA) fue desarrollada una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular.

En el análisis estadístico del muestreo ET1-CA se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET1-CA-01, ET1-CA-02, ET1-CA-04, ET1-CA-05, ET1-CA-06. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET1-CA se presentan en la Tabla 44.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 1, especímenes ET1-CA</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>117.20 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>116.99 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>14,303.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>82.95 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 44. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 1, ensayo ET1-CA.*

En el análisis estadístico del muestreo ET2-CA se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET2-CA-01, ET2-CA-02, ET2-CA-03, ET2-CA-04, ET2-CA-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET2-CA se presentan en la Tabla 45.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 1, especímenes ET2-CA</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>143.45 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>143.87 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>488.35 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>28.32 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 45. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 1, ensayo ET2-CA.*

En la Figura 66 y Figura 67 se presentan las gráficas esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes ET1-CA y ET2-CA. En ambos muestreos, los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. Del mismo modo que, en el ensayo a esfuerzos de compresión, por las condiciones de microestructura del material (fibras de celulosa entrelazadas), no se presenta una deformación elástica completamente regular.

En la zona plástica, el material de la Variable 1 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de tensión a una deformación de 0.02 cm/cm a 1.1 cm/cm. A nivel de microestructura, durante el ensayo a esfuerzos de tensión, no se produce el efecto de reacomodo repetitivo de las fibras de celulosa; en cambio, las fibras son tensadas en la dirección axial del eje del espécimen hasta la rotura de los enlaces y los entrelazamientos de las redes del cartón, y la delaminación entre capas.

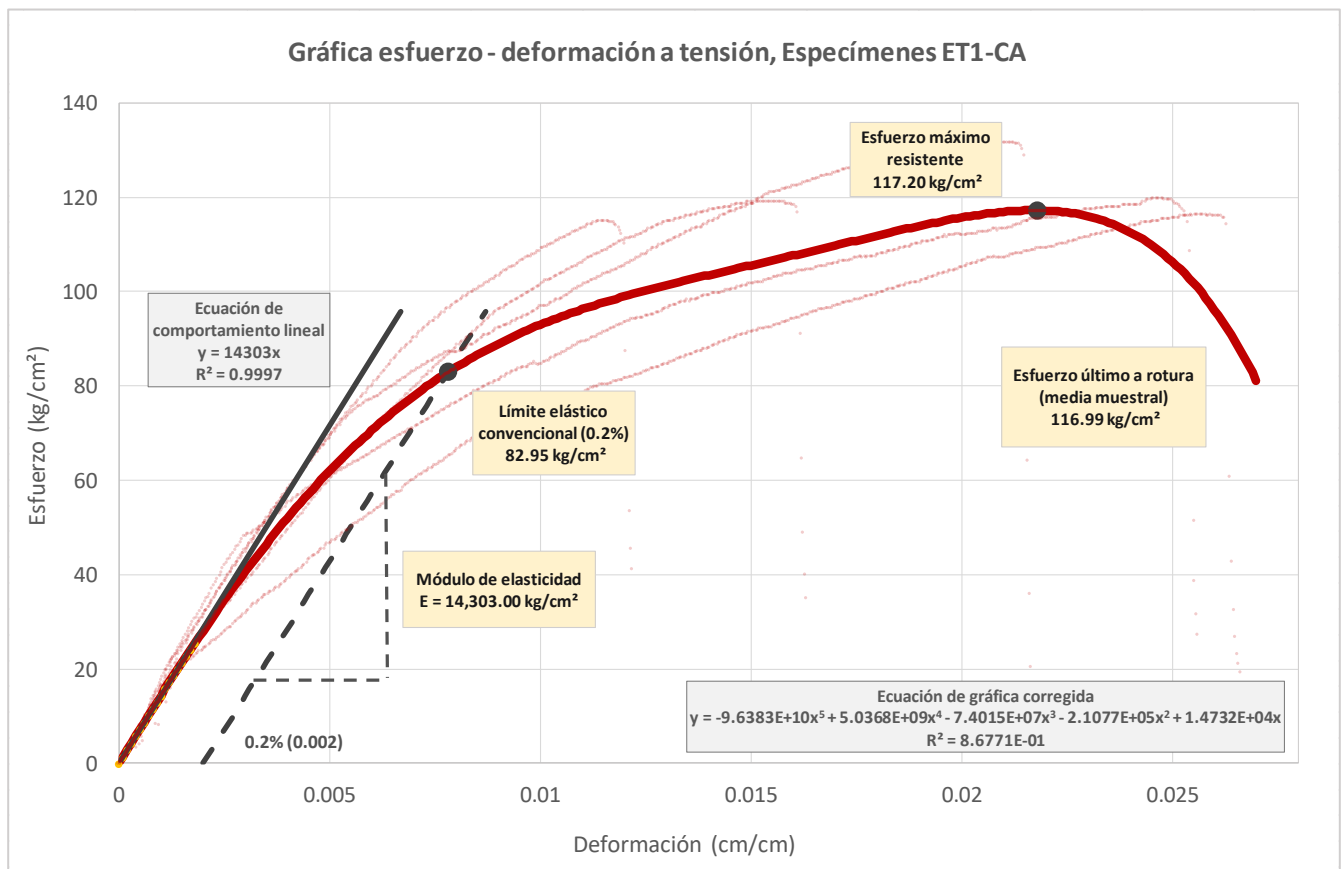


Figura 66. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de la Variable 1, ensayo ET1-CA.

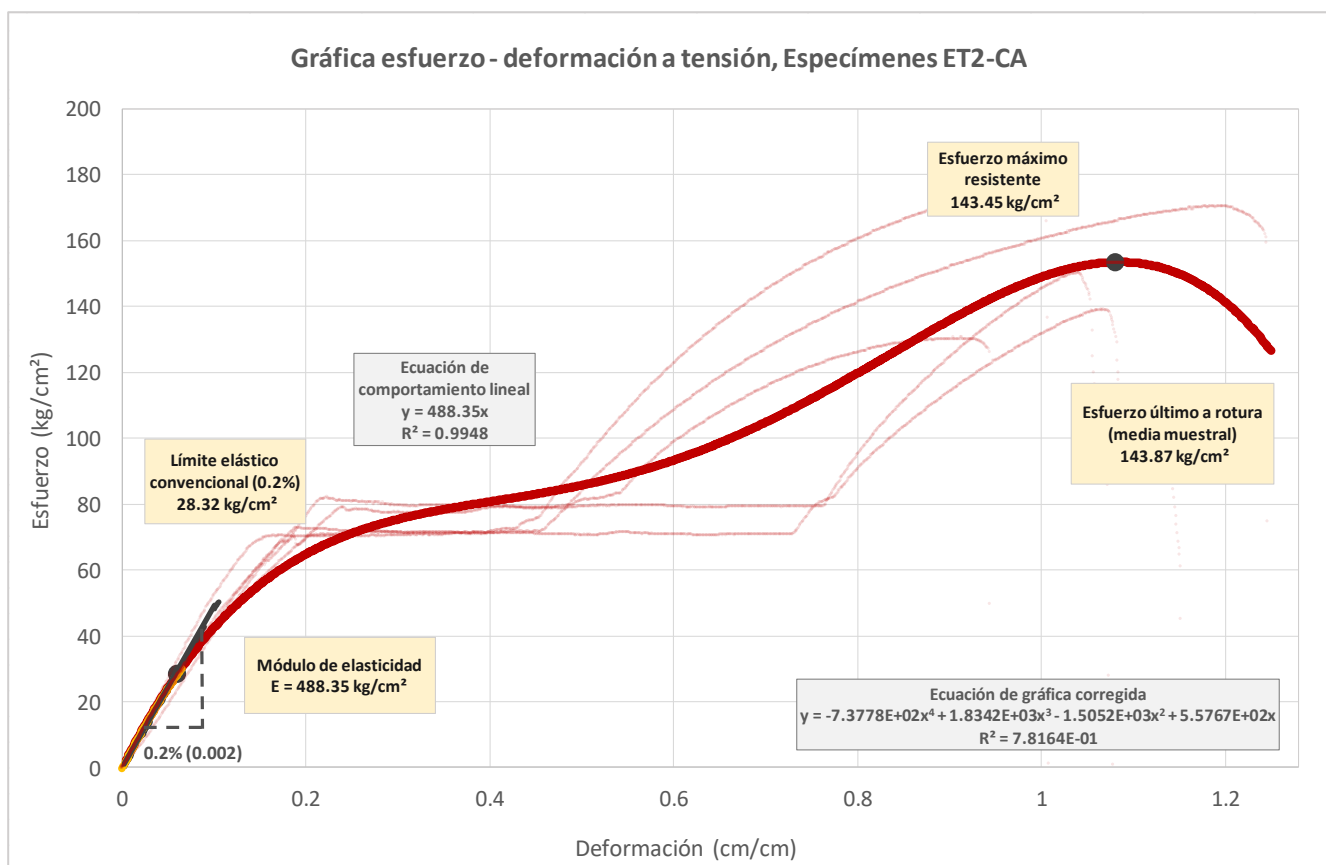


Figura 67. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de la Variable 1, ensayo ET2-CA.

Observando la Figura 66 y Figura 67, se observa que los especímenes del muestreo ET2-CA obtuvieron resistencia mayores, con valores de deformación elevados. El comportamiento de estos especímenes se muestra ampliamente dúctil, con una zona elástica muy breve que adquiere su límite elástico convencional a los 28.32 kg/cm<sup>2</sup>. Al alcanzar un esfuerzo de 70 kg/cm<sup>2</sup> se observa una zona de transición que significa el reacomodo de las fibras de celulosa y/o del espécimen con las mordazas de sujeción. Posteriormente los valores de resistencia vuelven a aumentar hasta obtener el esfuerzo máximo resistente del material (143.45 kg/cm<sup>2</sup>), seguido de la caída por la rotura total de los especímenes. Cabe mencionar que el material constituido en la geometría de láminas obtuvo un módulo de elasticidad relativamente bajo (488.35 kg/cm<sup>2</sup>), significando la poca rigidez del elemento.

En los especímenes tipo ET1-CA se observa un comportamiento con mayor uniformidad en comparación al ensayo de los especímenes a esfuerzos de compresión, con un incremento sustancial en el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo resistente; comportamiento mencionado en la Literatura de las



propiedades mecánicas del cartón (las propiedades mecánicas del cartón a esfuerzos de tensión son mayores que a esfuerzos de compresión, debido a su microestructura de redes de fibras de celulosa).

El límite elástico convencional para el muestreo ET1-CA (cartón Uline) se encuentra a una deformación de 0.0078 cm/cm, mientras que, para el muestreo ET2-CA (cartón Ratioform) se encuentra a una deformación de 1.08 cm/cm; apuntando que las características del cartón utilizado, el ángulo de devanado helicoidal y el grado de unión entrecapas ha sido más eficiente respecto a la rigidez en los especímenes en el muestreo ET1-CA, pero con valores de resistencia menores en un 22%.

### **Resultados de Variable 2 – Especímenes de prueba ET1-CR-n, ET2-CR-n.**

El ensayo de resistencia a esfuerzos de tensión de la Variable 2 (CR-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de cartón con un recubrimiento interno y externo de resina epóxica. El uso del recubrimiento de resina epóxica aplicado sobre el cartón se ha establecido como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo. Se observó que la aplicación de la resina epóxica sobre el cartón modifica las propiedades físicas de las capas externas, tornando al material más rígido y frágil, suceso que condicionó el comportamiento mecánico del material.

En el muestreo ET-1 se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con la denominación ET1-CR-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Quintum Q2) con los parámetros presentados en la Tabla 24, Figura 68. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET1-CR-n se muestran en la Tabla 29. 46.

<b>Especímen de prueba</b>	<b>Carga máxima soportada (kg)</b>	<b>Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)</b>	<b>Esfuerzo último a rotura (media muestral)</b>
<b>ET1-CR-01</b>	451	153.48	0.0763	130.33
<b>ET1-CR-02</b>	493	167.77	0.0713	167.43
<b>ET1-CR-03</b>	466	158.58	0.0616	157.90
<b>ET1-CR-04</b>	505	171.85	0.0592	155.18
<b>ET1-CR-05</b>	480	163.34	0.0807	159.94
<b>ET1-CR-06</b>	494	168.11	0.0866	164.02

*Tabla 46. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET1-CR.*



Figura 68. Especímenes de prueba ET1-CR-n para ensayo a la tensión.

En el muestreo ET-2 se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con la denominación ET2-CR-n (láminas de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV) con los parámetros presentados en la Tabla 25, Figura 69. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET2-CR-n se muestran en la Tabla 29. 47.

Espécimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
<b>ET2-CR-01</b>	64	224.76	1.1545	216.88
<b>ET2-CR-02</b>	47	163.92	0.8440	162.12
<b>ET2-CR-03</b>	61	214.02	1.0280	211.15
<b>ET2-CR-04</b>	58	202.57	0.9115	176.44
<b>ET2-CR-05</b>	61	212.95	1.0680	210.80
<b>ET2-CR-06</b>	62	217.60	0.9490	217.24

Tabla 47. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET2-CR.





*Figura 69. Especímenes de prueba ET2-CR-n para ensayo a la tensión.*

### ***Comportamiento mecánico de Variable 2, especímenes ET1-CR, ET2-CR.***

En el ensayo a esfuerzos de tensión de las muestras ET1-CR y ET2-CR se observa una ligera disminución del efecto de falla por rotura por el devanado multicapa helicoidal, debido al aumento de uniformidad del elemento por la aplicación de la resina epóxica como recubrimiento; cuestión que facilitó la manipulación de los especímenes al ser emplazados en las mordazas de los equipos de prueba. La deformación de los especímenes de la Variable 2, fue de tipo semirrígido y dúctil; semirrígido al haber presentado un aumento en los valores de resistencia iniciales en comparación a la Variable 1, Figura 70.



*Figura 70. Especimen de prueba ET1-CR-04. Se observa la susceptibilidad de falla por ruptura por el devanado multicapa helicoidal, disminuido por la aplicación de la resina epóxica como recubrimiento.*

De manera similar a los especímenes de prueba a esfuerzos de compresión (EC-CR-n), se presentó delaminación de las capas exteriores con resina epóxica que le otorgaban mayor resistencia a la fase de cartón, una vez dado este desprendimiento, el comportamiento del material es de tipo dúctil, manifestando amplia deformación, comportamiento similar al presentado por los especímenes de la Variable 1, Figura 71.



*Figura 71. Especimen de prueba ET1-CR-03. Fenómeno de desprendimiento entre capas de las capas exteriores con resina epóxica de la fase matriz de cartón.*

El efecto de falla por rotura, observado en la Variable 1 fue repetido en estos especímenes (ET1-CR y ET2-CR), con un aumento aproximado del 40% de los valores de resistencia de los esfuerzos a tensión. Cabe destacar que, al aplicar la resina epóxica como recubrimiento en los especímenes para el ensayo a esfuerzos de tensión, no se generó un incremento en la rigidez del elemento; inclusive el comportamiento del muestreo ET1-CR hubo una disminución de esta, significando que la rigidez del material sigue condicionada por la fase matriz de cartón.

De manera similar a la Variable 1, en los especímenes ET2-CR, una vez presentando el desprendimiento de las capas exteriores con resina epóxica, las fallas por rotura se generaron en una posición media entre el centro y los extremos de sujeción; repitiendo el fenómeno de delaminación y la separación de las fibras de celulosa, Figura 72.

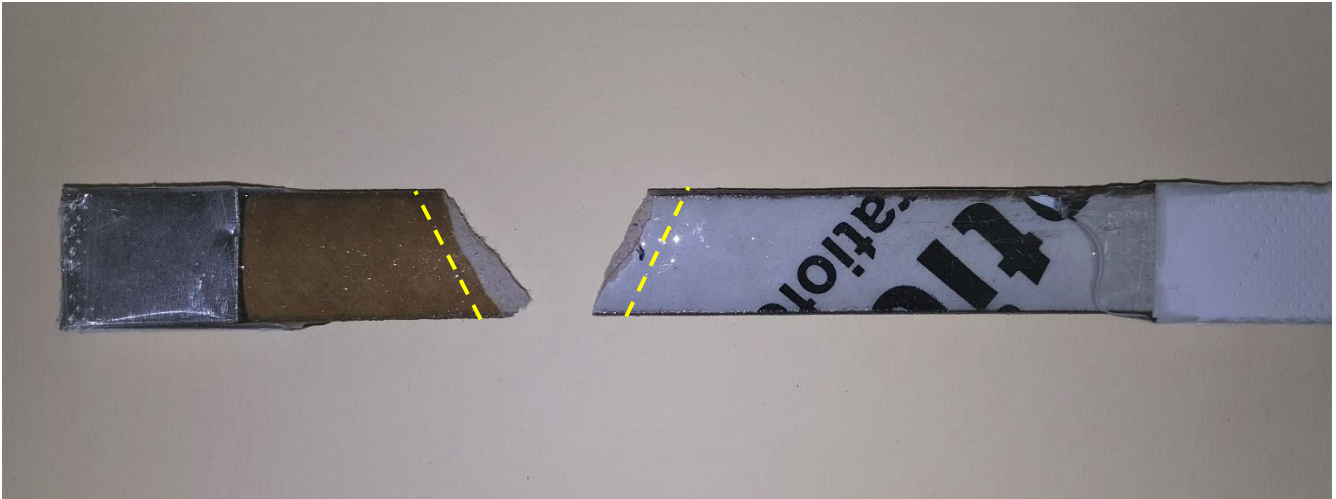


Figura 72. Espécimen de prueba ET2-CR-03. Se observa que en los especímenes del muestreo ET2-CR-n las fallas por rotura se presentaron en una posición media entre el centro y los extremos de sujeción, de manera similar a los especímenes ET2-CA-n.

Los especímenes que obtuvieron valores de resistencia mayores, se caracterizaron por poseer una mayor cantidad de resina epóxica, así como un recubrimiento más uniforme de esta; mostrando una tendencia de que el aumento de la resina sobre la fase de cartón, incrementa la resistencia del material, tanto como recubrimiento, como en el grado de penetración y relleno de oquedades en la red de fibras de celulosa.

#### ***Propiedades mecánicas de Variable 2, especímenes ET1-CR, ET2-CR.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de la Variable 2 (ET-CR) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba ET1-CR y ET2-CR, implementando el método de regresión polinomial de grado 5 y grado 4, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Para cada muestreo (ET1-CR y ET2-CR) fue desarrollada una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular.

En el análisis estadístico del muestreo ET1-CR se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET1-CR-01, ET1-CR-02, ET1-CR-03, ET1-CR-04, ET1-CR-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET1-CR se presentan en la Tabla 48.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 2, especímenes ET1-CR</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>147.52 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>153.55 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>4,382.90 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>56.97 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 48. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 2, ensayo ET1-CR.*

En el análisis estadístico del muestreo ET2-CR se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET2-CR-01, ET2-CR-02, ET2-CR-03, ET2-CR-04, ET2-CR-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET2-CR se presentan en la Tabla 49.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 2, especímenes ET2-CR</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>216.91 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>195.26 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>544.69 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>26.68 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 49. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 2, ensayo ET2-CR.*

En la Figura 73 y Figura 74 se presentan las gráficas esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes ET1-CR y ET2-CR. Los especímenes de los dos muestreos exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. El comportamiento lineal y el límite elástico convencional del muestreo de los especímenes ET2-CR es muy similar al de la Variable 1 (ET2-CA), mientras que en el muestreo ET1-CR se presentó una disminución de la rigidez del material. En ambos muestreos, ET1-CR y ET2-CR, hubo un incremento sustancial del esfuerzo máximo resistente, debido a la aplicación de la resina epóxica como recubrimiento.

En la zona plástica, el material de la Variable 2 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de tensión a una deformación de 0.07 cm/cm a 1.05 cm/cm. De manera similar al ensayo de la Variable 1, una vez desprendidas las capas exteriores con resina epóxica, las fibras de celulosa son tensadas en la dirección axial del eje del espécimen hasta la rotura de los enlaces y los entrelazamientos de las redes del cartón, y la delaminación entre capas.

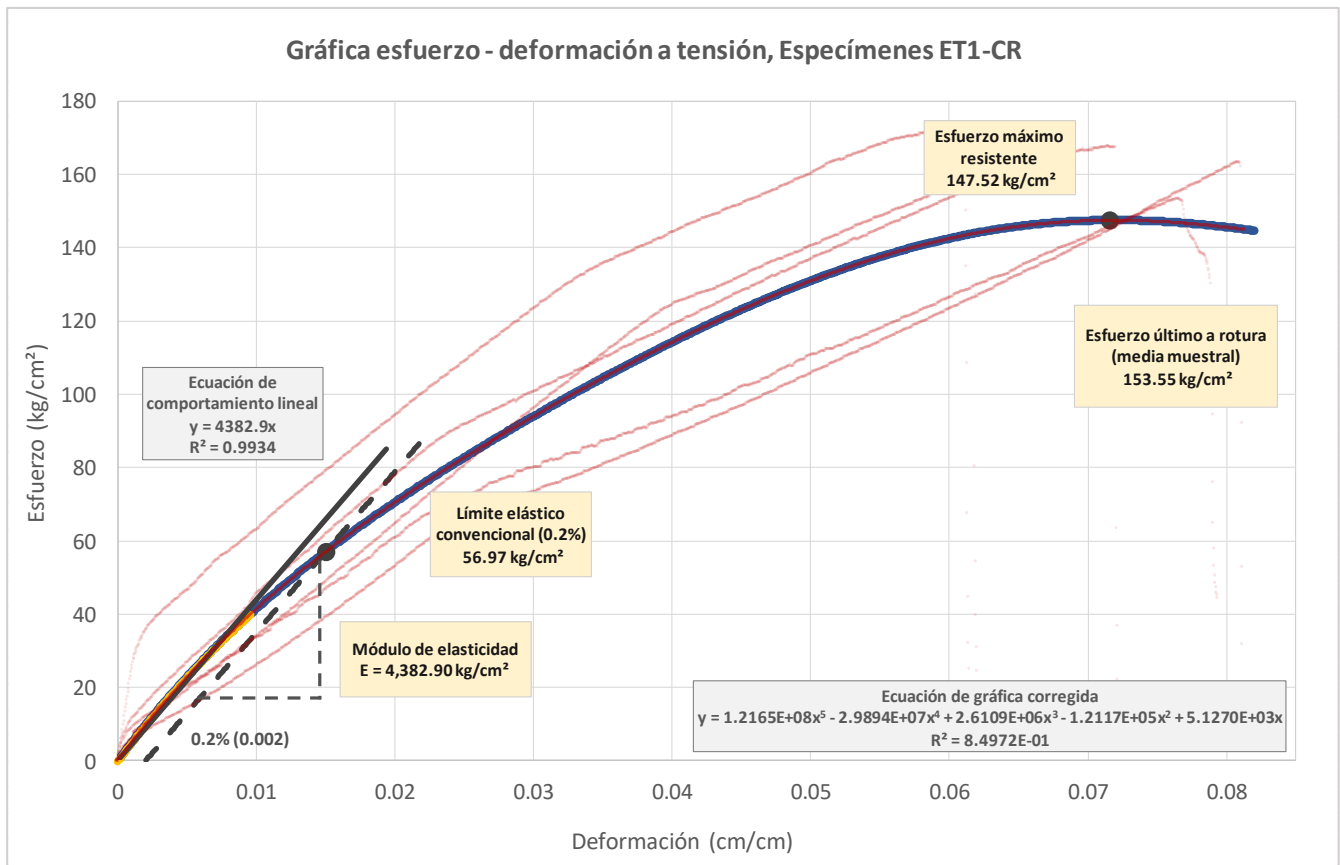


Figura 73. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de la Variable 2, ensayo ET1-CR.



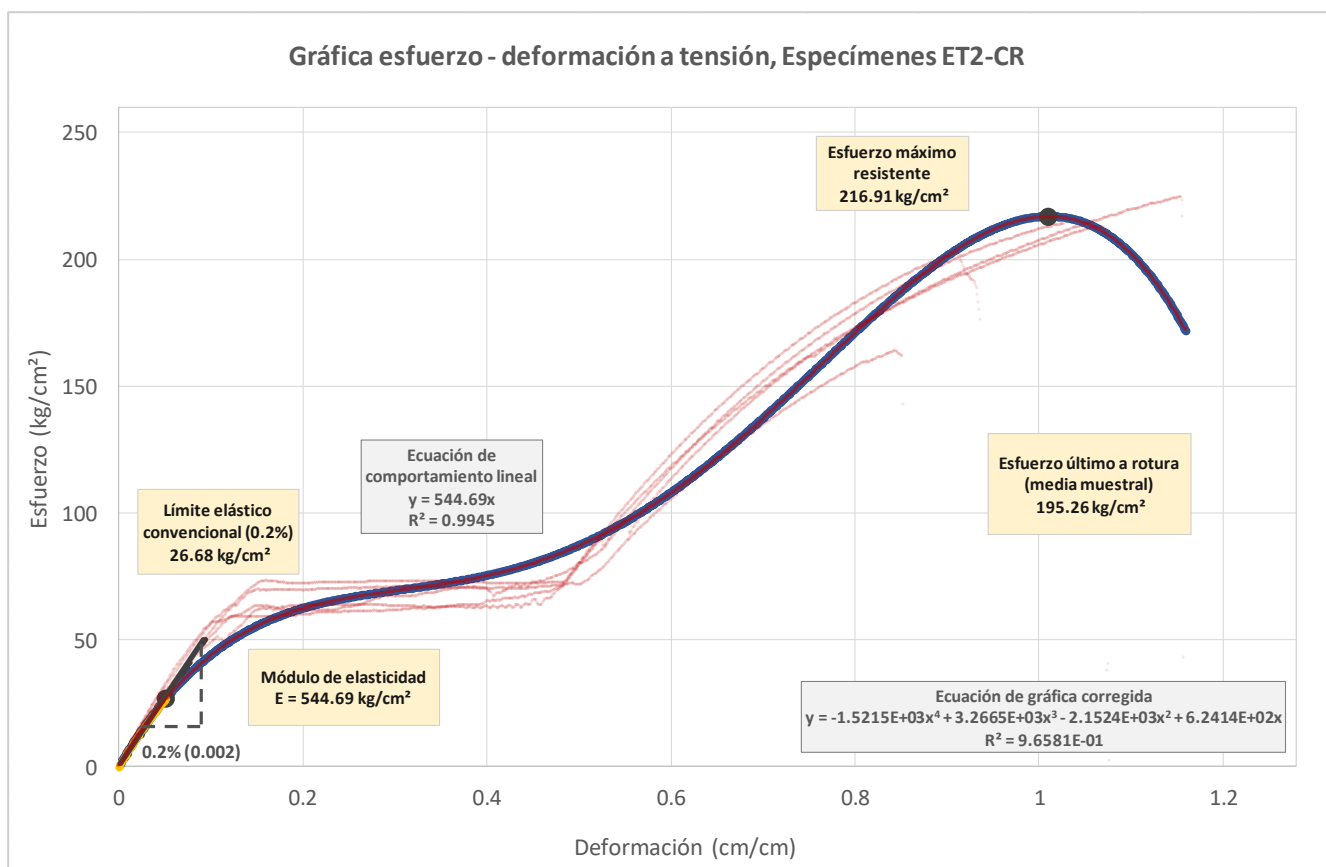


Figura 74. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de la Variable 2, ensayo ET2-CR.

Al realizar el análisis de la Figura 73 y la Figura 74, se observa que los especímenes del muestreo ET2-CR obtuvieron resistencia mayores, con valores de deformación elevados. El comportamiento de ambos muestreos es inicialmente semirrígido y posteriormente dúctil, con zonas elásticas breves, adquiriendo sus límites elásticos convencionales a los 56.97 kg/cm<sup>2</sup> y 28.32 kg/cm<sup>2</sup>.

En los especímenes tipo ET2-CR, al obtener un esfuerzo superior a los 70 kg/cm<sup>2</sup> se observa una zona de transición (visto del mismo modo que en los especímenes ET2-CA de la Variable 1) por el reacomodo de las fibras de celulosa y del espécimen con las mordazas de sujeción. En estos especímenes se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 216.91 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 544.69 kg/cm<sup>2</sup>.

En los especímenes del muestreo ET1-CR, se presentó un comportamiento mecánico con mayor ductilidad que en la Variable 1, efecto que pudo deberse a la conformación de un material con mayor uniformidad y blandura al emplear la resina epóxica como recubrimiento (en estos especímenes la incorporación de la resina epóxica como recubrimiento, no tuvo un efecto en el aumento de la rigidez de

la fase matriz de cartón); aun así, los valores de resistencia a esfuerzos de tensión, tuvieron un aumento del 26% (147.52 kg/cm<sup>2</sup>).

El límite elástico convencional para el muestreo ET1-CR (cartón Uline con resina epóxica Quintum Q2) se encuentra a una deformación de 0.014 cm/cm, mientras que, para el muestreo ET2-CA (cartón Ratioform con resina epóxica Resineco FV) se encuentra a una deformación de 0.052 cm/cm; ratificando que el cartón del muestreo ET1-CR ha sido más eficiente respecto a la rigidez, pero con valores de resistencia menores en un 47%.

### **Resultados de Variable 3 – Especímenes de prueba ET1-CF-n, ET2-CF-n.**

El ensayo de resistencia a esfuerzos de tensión de la Variable 3 (CF-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de una matriz de cartón reforzada con un tejido tipo Twill de fibras de carbono 12K, unido por medio de una resina epóxica, que funge como agente aglomerante en las zonas de interface. Al igual que en la Variable 2, el interior de los tubos cilíndricos (muestreo ET1-CF) y la cara inferior de las láminas (muestreo ET2-CF) fueron recubiertos con resina epóxica como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo.

La Variable 3 consiste en el material compuesto planteado para el proyecto de investigación, con el objetivo de optimizar las propiedades mecánicas de las fases componentes para la elaboración de estructuras ligeras de gran claro. Los valores de resistencia a esfuerzos de tensión obtenidos del ensayo son comparados más adelante con las Variables 1 y 2, y con la madera como material tradicional de la industria de la Construcción.

En el muestreo ET-1 se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con la denominación ET1-CF-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill) con los parámetros presentados en la Tabla 24, Figura 75. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET1-CF-n se muestran en la Tabla 29. 50.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
ET1-CF-01	7,214	1,422.73	0.2447	1,059.65
ET1-CF-02	8,172	1,611.67	0.2543	859.28
ET1-CF-03	6,381	1,258.45	0.2135	1,016.07
ET1-CF-04	6,006	1,184.49	0.2003	757.91
ET1-CF-05	6,630	1,307.56	0.2466	1,078.39
ET1-CF-06	6,584	1,298.48	0.0602	1,031.84

Tabla 50. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET1-CF.



Figura 75. Especímenes de prueba ET1-CF-n para ensayo a la tensión.

En el muestreo ET-2 se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con la denominación ET2-CF-n (láminas de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill) con los parámetros presentados en la Tabla 25, Figura 76. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET2-CF-n se muestran en la Tabla 51.



Espécimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
ET2-CF-01	670	1,282.36	0.1948	1,032.68
ET2-CF-02	671	1,283.34	0.1694	937.03
ET2-CF-03	647	1,238.83	0.1478	1,138.30
ET2-CF-04	514	983.57	0.1209	849.38
ET2-CF-05	456	871.90	0.1011	815.47
ET2-CF-06	494	945.42	0.1192	856.80

Tabla 51. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET2-CF.

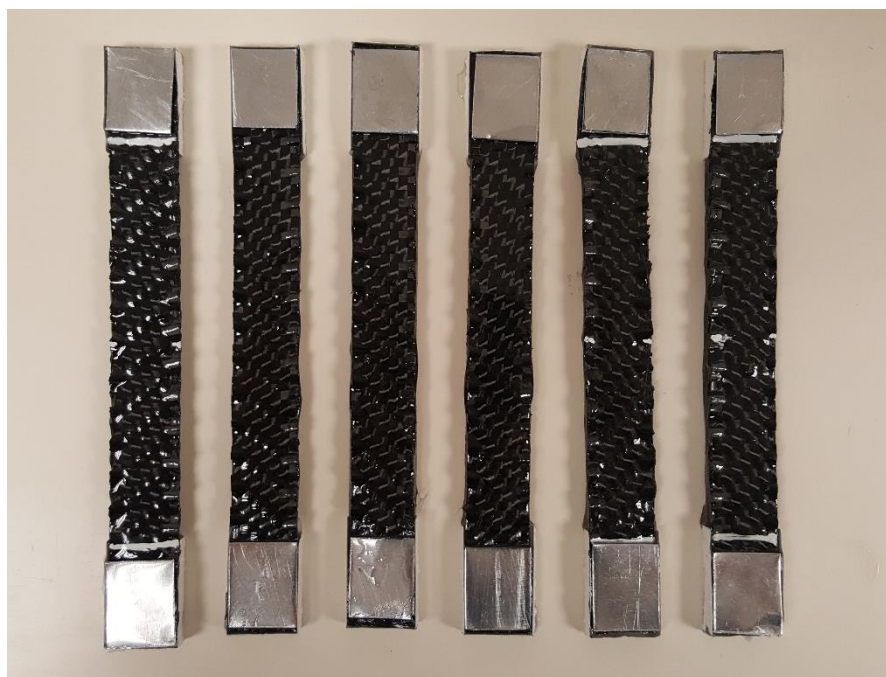


Figura 76. Especímenes de prueba ET2-CF-n para ensayo a la tensión.

### **Comportamiento mecánico de Variable 3, especímenes ET1-CF, ET2-CF.**

En el ensayo a esfuerzos de tensión de las muestras ET1-CF y ET2-CF, el comportamiento de los especímenes fue ampliamente condicionado por la fase matriz, que funge como base de incrustación para la fase de refuerzo. A diferencia del ensayo a esfuerzos de compresión (EC-CF-n), en el ensayo a

esfuerzos de tensión, la relación de resistencia entre el cartón y las fibras de carbono es ampliamente heterogéneo, por las elevadas prestaciones características de resistencia a esfuerzos de tensión de las fibras de carbono. En comparación a las Variables 1 y 2, la resistencia a esfuerzos de tensión del material compuesto se incrementó exponencialmente, alcanzando  $1,255.19 \text{ kg/cm}^2$  en el muestreo ET1-CF y  $1,010.36 \text{ kg/cm}^2$  en el muestreo ET2-CF.

En ambos muestreos se presentó el comportamiento mecánico característico de los materiales compuestos, en el que ambas fases de materiales trabajan de manera conjunta para transmitir y resistir los esfuerzos de tensión, hasta que la fase matriz (cartón) supera su umbral de resistencia máxima y cede a la rotura; posteriormente, las fibras de carbono comienzan a resistir toda la magnitud de la carga aplicada hasta alcanzar su resistencia máxima como material en forma de tejido tipo Twill.

El comportamiento de los especímenes de la Variable 3 a esfuerzos de tensión es semirrígido y dúctil. El comportamiento semirrígido se observó por la presencia de la resina epóxica, que incrementa la rigidez de ambas fases. Durante el ensayo la resina epóxica no lograba mantener las deformaciones de las fases de cartón y fibras de carbono, produciéndose microfisuras en esta. El comportamiento dúctil se presentó una vez que la resina comenzó a fracturarse, permitiendo la deformación dúctil del cartón como material y en su disposición multicapa y en la deformación dúctil del tejido de fibras de carbono.

La susceptibilidad de rotura, en las zonas de unión del devanado multicapa helicoidal, disminuye notablemente; debido a que el aumento de la rigidez y la resistencia mecánica del material compuesto genera roturas predominantemente perpendiculares al eje axial (se observa que el tipo de falla por ruptura final depende de la fase que posee mayor rigidez, siendo el tejido de fibras de carbono), Figura 77.



*Figura 77. Espécimen de prueba ET1-CF-04. La falla por rotura de los especímenes del muestreo ET1-CF-n se genera predominantemente perpendicular al eje axial, disminuyendo la susceptibilidad por rotura en las zonas de unión del devanado multicapa helicoidal.*

Durante la ejecución del ensayo se observó la función del tejido de fibras de carbono como cinturón de contención (encamisado) para la fase matriz de cartón. Al aumentar la presión ejercida a tensión, la deformación del material compuesto se percibe un adelgazamiento de los especímenes de prueba (deformación genérica de tipo dúctil), tanto central como en los extremos de sujeción de las mordazas, Figura 78.



*Figura 78. Espécimen de prueba ET1-CF-01. Al realizar el ensayo a esfuerzos de tensión, se observa la deformación del espécimen de prueba por la presión ejercida de la máquina de pruebas universales.*

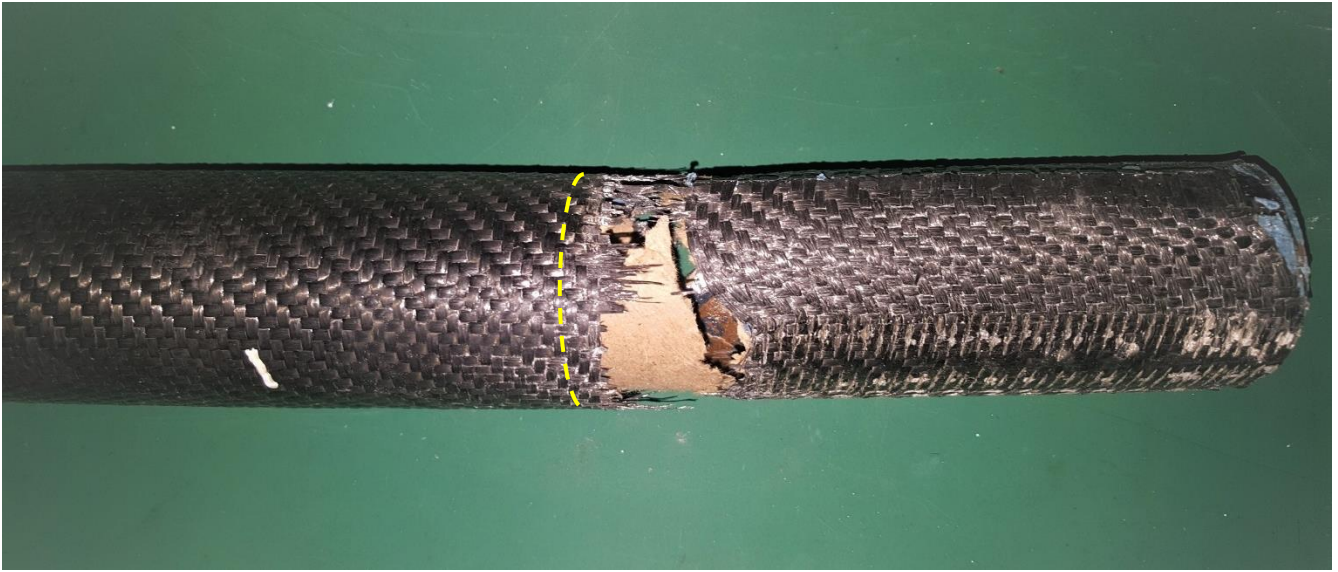
Cabe destacar que para el ensayo de los especímenes tipo ET1-CF (tubos cilíndricos) se tuvieron que utilizar rellenos metálicos de alta rigidez, de manera que al realizar la sujeción de los especímenes de prueba estos no se deslizaran de las mordazas, permitiendo así, que la carga pudiese ser transmitida de manera uniforme, Figura 79.



*Figura 79. Especimen de prueba ET1-CF-01. Se observa el uso de rellenos metálicos en los extremos de sujeción para evitar la deformación ejercida por las mordazas. Así mismo, se vislumbra la deformación resultante de tipo dúctil del espécimen tras la realización del ensayo.*

En el ensayo de los especímenes tipo ET1-CF, inicialmente comienzan a generarse microfracturas de la resina epóxica, que influenciaban un comportamiento semirrígido del material compuesto; seguido del trabajo de ambas fases de materiales hasta la rotura de la fase matriz del cartón. La rotura de la fase matriz de cartón, no era observable debido a que se encontraba en la parte interior de los especímenes de prueba; estas roturas se presentaban casi perpendiculares al eje axial de los especímenes, siendo de tipo delaminación, como en las Variables 1 y 2. Finalmente, al alcanzar la resistencia máxima con el trabajo de la fase de refuerzo, comienzan a generarse múltiples roturas de fibras de carbono individuales aleatorias en el tejido Twill, hasta la casi separación total del espécimen en dos partes. Por cuestiones de seguridad y características del equipo, la rotura total de los especímenes se realizó al finalizar el ensayo, de manera que la etapa terminal de cada ensayo se consideró al haber una caída considerable del esfuerzo máximo logrado y una amplia deformación de los especímenes de prueba. Las fallas por ruptura de estos especímenes se presentó principalmente en una posición cercana a las mordazas de sujeción, Figura 80.





*Figura 80. Espécimen de prueba ET1-CF-05. Las fallas por rotura de los especímenes tipo ET1-CF-n se suscitaron predominantemente en los extremos de sujeción de las mordazas. También se observa la rotura interna de la fase matriz de cartón ligeramente diagonal por la influencia del devanado multicapa helicoidal.*



*Figura 81. Espécimen de prueba ET2-CF-06. Las fallas por rotura de los especímenes tipo ET2-CF-n se presentaron dentro de los extremos de sujeción de las mordazas, por la delaminación entre capas de la fase matriz de cartón.*

En los especímenes del muestro ET2-CF, las fallas se presentaron principalmente por la delaminación de la fase matriz de cartón en las áreas de sujeción de las mordazas, generando el deslizamiento del espécimen y evitando la total rotura de la fase de refuerzo, Figura 81. Los especímenes que obtuvieron valores de resistencia mayores, presentaron un comportamiento similar a los especímenes del muestreo

ET1-CF, con la rotura de fibras de carbono individuales aleatorias en el tejido, Figura 82. En algunos especímenes del muestreo ET2-CF, en las áreas de sujeción de las mordazas, se produjo la desunión del cartón y las fibras de carbono en la zona de interface, indicando baja adherencia entre ambas fases, Figura 83.



*Figura 82. Espécimen de prueba ET2-CF-04. A la derecha se observa la rotura de fibras de carbono individuales aleatorias en el tejido en forma diagonal, denotando la transmisión del esfuerzo a la capa de refuerzo.*



*Figura 83. Espécimen de prueba ET2-CF-01. En la imagen se percibe la desunión de los materiales componentes, significando la falta de adherencia en la zona de interface.*

***Propiedades mecánicas de Variable 3, especímenes ET1-CF, ET2-CF.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de la Variable 3 (ET-CF) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba ET1-CF y ET2-CF, implementando el método de regresión polinomial de grado 5, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Para cada muestreo (ET1-CF y ET2-CF) fue desarrollada una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular.

En el análisis estadístico del muestreo ET1-CF se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET1-CF-01, ET1-CF-02, ET1-CF-03, ET1-CF-04, ET1-CF-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET1-CF se presentan en la Tabla 52.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 3, especímenes ET1-CF</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>1,255.19 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>948.89 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>12,610.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>408.56 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 52. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 3, ensayo ET1-CF.*

En el análisis estadístico del muestreo ET2-CF se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET2-CF-01, ET2-CF-02, ET2-CF-03, ET2-CF-04, ET2-CF-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET2-CF se presentan en la Tabla 53.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 3, especímenes ET2-CF</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>1,010.36 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>963.73 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>25,921.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>259.21 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 53. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 3, ensayo ET2-CF.*

En la Figura 84 y Figura 85 se presentan las gráficas esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes ET1-CF y ET2-CF. En ambos muestreos, el comportamiento lineal y el límite elástico convencional de los especímenes ET-CF es más regular en comparación a los de las Variables 1 y 2, así como el incremento de sus valores de esfuerzo; de manera similar a los especímenes a ensayos de compresión.

En la zona plástica, el material compuesto (Variable 3) adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de tensión a una deformación de 0.013 cm/cm en los especímenes ET2-CF a 0.023cm/cm en los especímenes ET1-CF. Se observa que los especímenes del muestreo ET1-CF adquirieron valores de resistencia mayores, pero con una deformación más prolongada. El comportamiento de los especímenes ET2-CF es ligeramente menos predecible al haber mayor variación en los datos, cuestión que se debe a los diferentes efectos producidos en la ejecución del ensayo, como se mencionó en el comportamiento de estos.

Al igual que en los especímenes para el ensayo a esfuerzos de compresión, el proceso de manufactura de los especímenes ET2-CF fue mejorado por retroalimentación a partir de los resultados obtenidos por la elaboración de los especímenes ET1-CF, permitiendo una cohesión más eficiente de las fases componentes, dando por resultado especímenes con mayor rigidez.



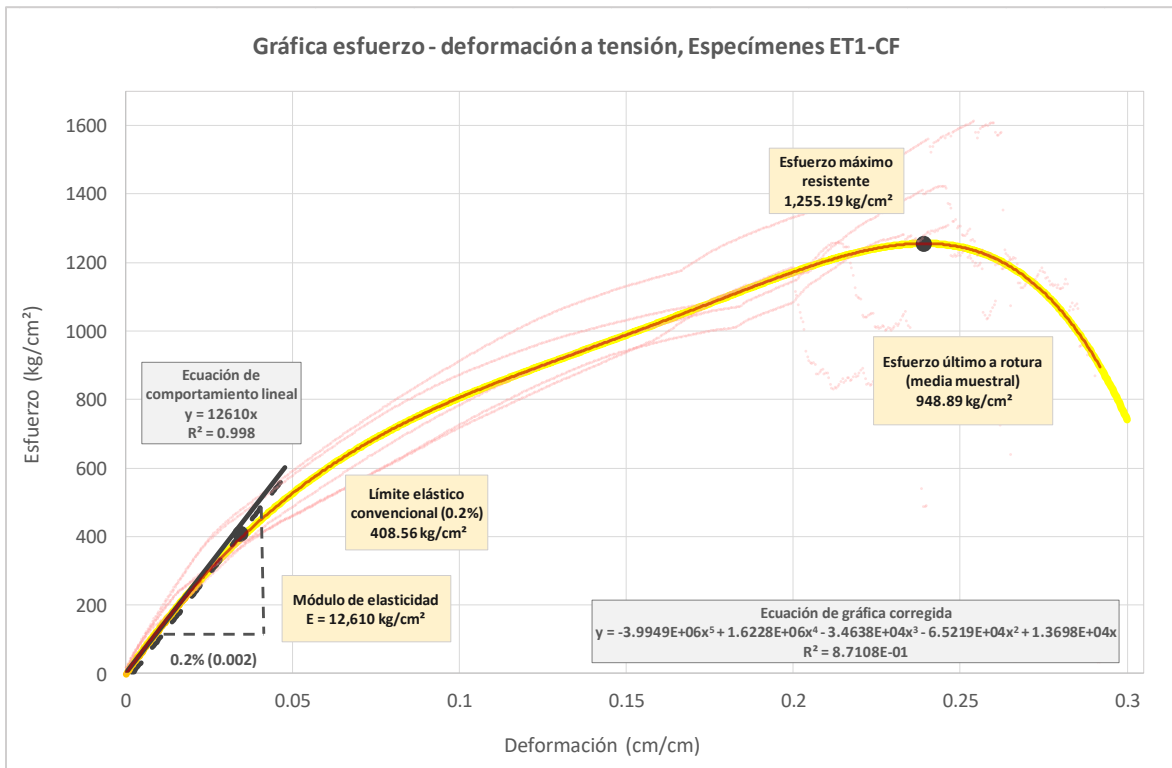


Figura 84. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (material compuesto), ensayo EC1-CF.

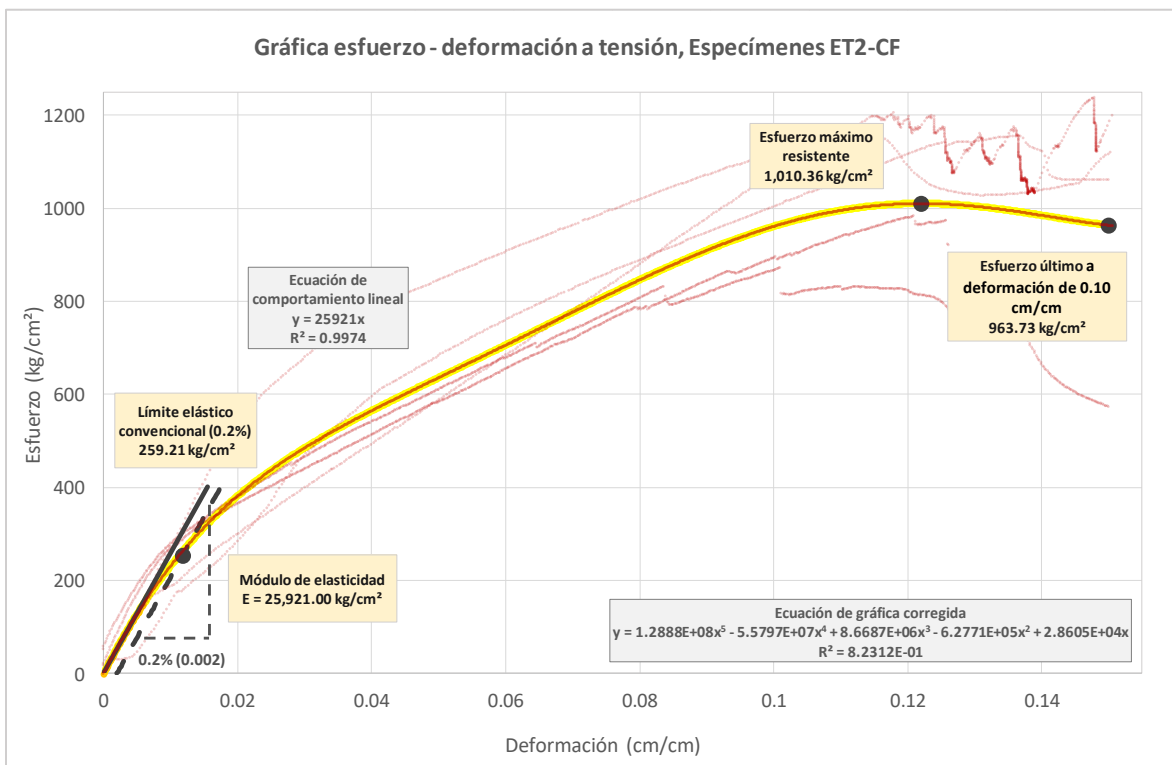


Figura 85. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (material compuesto), ensayo EC2-CF.

Se percibe que los especímenes de prueba de la Variable 3 (ET-CF) tienden a presentar un comportamiento menos previsible que las Variables 1 y 2, debido a la complejidad de manufactura del material compuesto por un método de estratificación manual.

Al realizar el análisis de las gráficas esfuerzo – deformación de la Variable 3, se observa que los especímenes del muestreo ET1-CF poseen menor rigidez que los del muestreo ET2-CF, al presentar una mayor deformación y un módulo de elasticidad menor; suceso opuesto a la misma variable en el ensayo de esfuerzos a compresión. Sin embargo, los valores de resistencia a esfuerzos de tensión fueron mayores en un 24% en el ensayo del muestreo ET1-CF.

El límite elástico convencional para el muestreo ET1-CF (cartón Uline) se encuentra a una deformación de 0.034 cm/cm; para el muestreo ET2-CF (cartón Ratioform) se encuentra a una deformación de 0.012 cm/cm. En la Variable 3 del muestreo ET1-CF, el valor del módulo de elasticidad disminuyó un 13% en comparación a la Variable 1 y aumentó en un 188% respecto a la Variable 2. Del muestreo ET2-CF, el valor del módulo de elasticidad aumentó de 488.35 kg/cm<sup>2</sup> (Variable 1) y 544.69 kg/cm<sup>2</sup> (Variable 2) a 25,921.00 kg/cm<sup>2</sup>.

### **Análisis comparativo de variables – Ensayo a esfuerzos de tensión**

Por medio del análisis comparativo de las variables se puede determinar el comportamiento y las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de las fases constituyentes del material compuesto, con el objetivo de establecer el grado de refuerzo que le otorga la fase dispersa (tejido de fibras de carbono 12K Twill) a la fase matriz de cartón, Figura 86. En el ámbito de la Arquitectura, los elementos estructurales conformados por cartón no son implementados para resistir esfuerzos mecánicos a tensión; por la limitada de rigidez y resistencia del material para ser utilizado en elementos estructurales que trabajen a dichos esfuerzos. Debido a esto, surge la necesidad de emplear un material que funja como fase de refuerzo, para conformar un material compuesto que pueda ser implementado en estructuras que demanden resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, ejemplo de ello son las armaduras planas y las estructuras espaciales.



*Figura 86. Comparación de especímenes de prueba ET1 de las tres variables experimentadas, previo al ensayo a esfuerzos de tensión.*

El comportamiento mecánico de los especímenes ET-CA-n (Variable 1) fue de tipo dúctil, al presentar una breve deformación elástica en comparación con una amplia deformación plástica. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, predisuestas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), observándose por medio del efecto prolongado de delaminación multicapa, aludiendo a una adherencia entre capas relativamente baja. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo ET1-CA-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de  $117.20 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $14,303.00 \text{ kg/cm}^2$ ; en los especímenes del muestreo ET2-CA-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de  $143.45 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $488.35 \text{ kg/cm}^2$ .

Los especímenes de prueba ET-CR-n (Variable 2) presentaron un comportamiento semirrígido y dúctil. La aplicación de la resina epóxica en las capas exteriores como agente protector, permitió la conformación de un material con mayor uniformidad en su superficie al rellenar las aristas de unión del devanado multicapa helicoidal, efecto que influyó en la obtención de valores de resistencia mayores. Al inicio del ensayo de los especímenes de la Variable 2, estos se mostraron con un comportamiento semirrígido, al estar restringidas las fibras de celulosa de la capa externa por la resina epóxica (de manera similar a la madera natural con las fibras de celulosa contenidas en la lignina); una vez fracturada la capa externa, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. La aplicación principal de la resina epóxica sobre el cartón fue como agente protector de barrera ante los efectos de intemperismo; por medio de los ensayos se determinó que la incorporación de la resina epóxica logró incrementar la resistencia de la fase de cartón a esfuerzos de tensión. En los especímenes del muestreo ET1-CR-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 147.52 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 26% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 4,382.90 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo ET2-CR-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 216.91 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 51% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 544.69 kg/cm<sup>2</sup>. Cabe mencionar que, con la aplicación de una mayor cantidad de resina en la fase de cartón, así como la uniformidad de esta en el elemento, se obtendrán valores de resistencia a esfuerzos de tensión más elevados y una mayor rigidez del material.

Los especímenes de prueba ET-CF-n (Variable 3) comprenden el material compuesto del proyecto de investigación, constituidos a base de una matriz de cartón reforzada por un tejido de fibras de carbono 12K Twill. La unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de tensión, elevando exponencialmente los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes. En los especímenes ET-CF-n, el comportamiento mecánico y las fallas fueron de tipo semirrígido y dúctil. Como se observó en el ensayo de los especímenes de la Variable 2, la resina epóxica genera un aumento en la rigidez del material, proporcional a su cantidad en masa; más al ejercer un aumento de presión, la resina no tolera los umbrales de deformación de la fase matriz de cartón y la fase de refuerzos de fibras de carbono, por lo que, la resina al presentar microfracturas, el comportamiento del material compuesto se torna dúctil al mostrar una amplia deformación plástica. Es importante mencionar, que en la conformación del material compuesto se genera un espesor de pared mayor dando por resultado mayor rigidez en los especímenes de prueba, efecto que disminuyó casi completamente la rotura por el devanado multicapa helicoidal. En los especímenes del muestreo ET1-CF-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 1,255.19 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 970% en relación con la Variable 1 y

del 751% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 12,610 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo ET2-CF-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 1,010.36 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 604% en relación con la Variable 1 y del 366% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 25,921.00 kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla 54, Figura 87 y Figura 88, se presentan las propiedades mecánicas y las gráficas esfuerzo - deformación del ensayo a esfuerzos de tensión de las tres variables experimentadas. En las gráficas de las Figura 87 y 88 se observa el aumento de la rigidez y el exponencial incremento de la resistencia mecánica de la fase matriz de cartón con la incorporación de las fibras de carbono como refuerzo para el material compuesto.

<b>Propiedades mecánicas de variables a esfuerzos de tensión</b>			
	<b>Muestreo ET1-CA Variable 1</b>	<b>Muestreo ET1-CR Variable 2</b>	<b>Muestreo ET1-CF Variable 3</b>
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>117.20 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>147.52 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,255.19 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>14,303.00 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>4,382.90 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>12, 610.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>82.95 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>56.97 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>408.56 kg/cm<sup>2</sup></b>
	<b>Muestreo ET2-CA Variable 1</b>	<b>Muestreo ET2-CR Variable 2</b>	<b>Muestreo ET2-CF Variable 3</b>
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>143.45 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>216.91 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,010.36 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>488.35 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>544.69 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,921.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>28.32 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>26.68 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>259.21 kg/cm<sup>2</sup></b>

Tabla 54. Comparación de valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de las tres variables experimentadas.

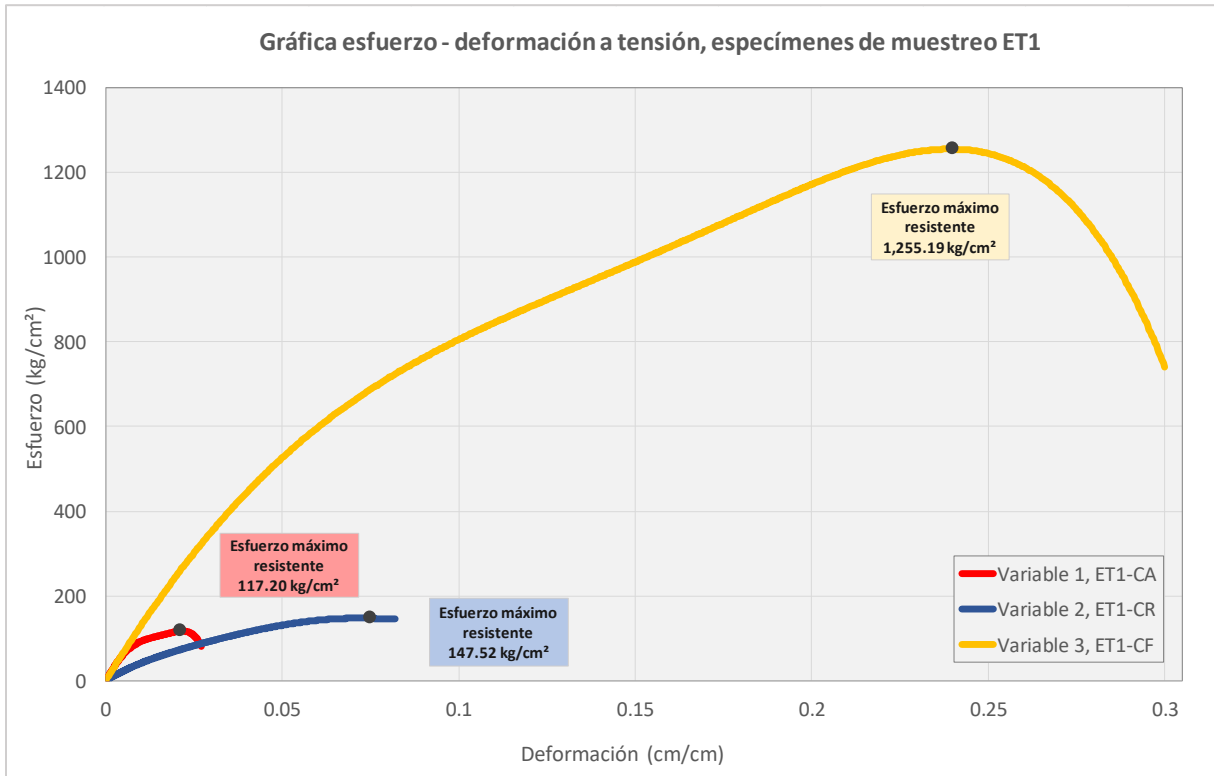


Figura 87. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de las tres variables experimentadas, muestreo ET1.

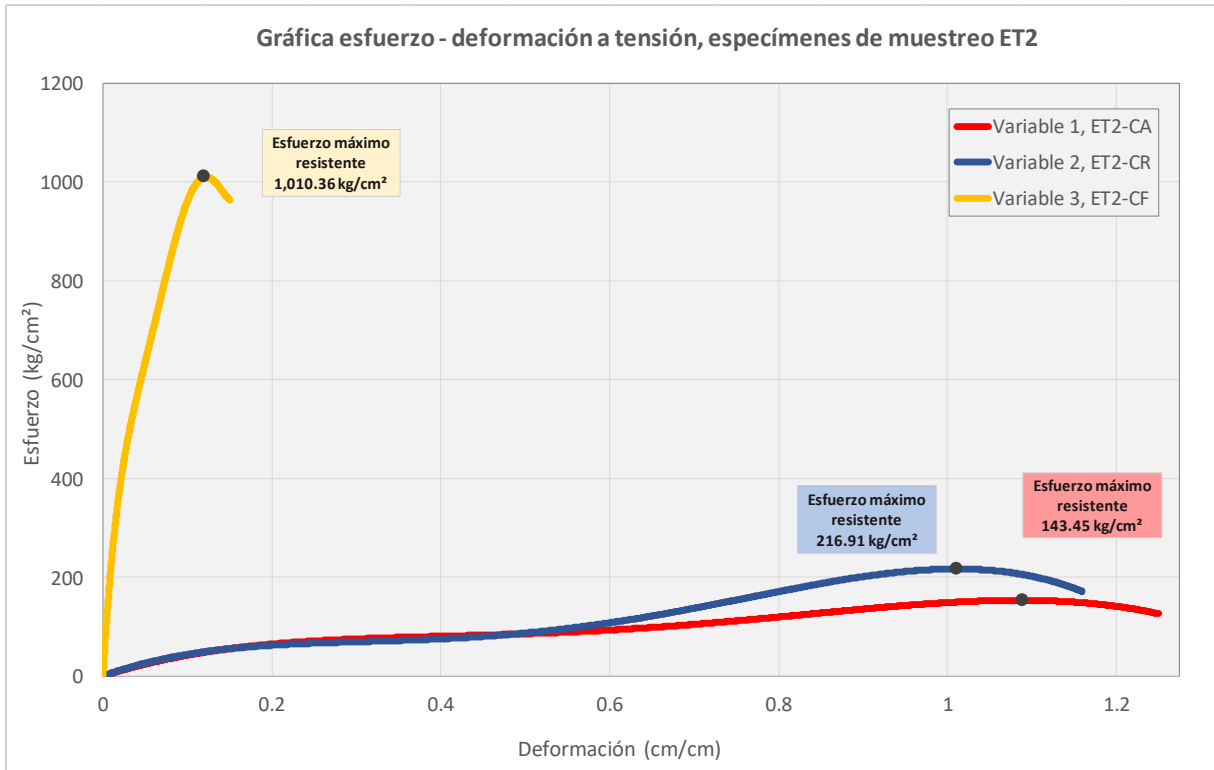


Figura 88. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de las tres variables experimentadas, muestreo ET2.

## **Propiedades mecánicas del material compuesto**

El desarrollo del material compuesto del proyecto de investigación a base de una fase matriz de cartón y un refuerzo tejido de fibras de carbono 12K Twill, tiene por propósito principal su aplicación para elementos estructurales en Arquitectura. Por medio de las consideraciones de diseño (propiedades y ensayos por realizar), las características y especificaciones de los materiales fase y con base en los métodos de ensayo de la ASTM se han logrado determinar los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión del material compuesto, con el objetivo de efectuar el diseño estructural de elementos aplicados en sistemas estructurales.

Cabe destacar que, por las características de microestructura (geometría de elementos fibrilares) y procesamiento (orientación de las fibras de celulosa y del tejido de fibras de carbono) de las fases componentes, el material compuesto del proyecto de investigación se clasifica como un material anisotrópico, significando diversos comportamientos mecánicos según la dirección de aplicación de los esfuerzos en los elementos. En la elaboración del material compuesto, la orientación del cartón (fibras de celulosa) y del tejido de fibras de carbono se efectuó para obtener el comportamiento más eficiente a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión en el eje axial de los especímenes de prueba; y de manera que su proceso de manufactura fuese práctico utilizando el método de Contacto (estratificación manual).

De igual manera, se estableció que el comportamiento mecánico del material compuesto a esfuerzos de compresión es notablemente distinto a esfuerzos de tensión, obteniendo dos módulos de elasticidad por muestreo. Este factor es determinado por las características de microestructura de los materiales fibrosos. En los materiales fibrosos, al aplicar una carga a tensión, las redes de fibras son gradualmente estiradas alineando las fibras para soportar el esfuerzo hasta que las fibras presenten la rotura; a compresión, las redes de fibras colapsan por pandeo y doblado, manteniendo la resistencia mecánica del material sin efectos de rotura.

En el proyecto de investigación, se realizaron dos muestreos de especímenes de prueba para cada tipo de ensayo (ensayo a esfuerzos de compresión, ensayo a esfuerzos de tensión), con leves variaciones en las características del cartón y de la resina epóxica. Estas variaciones se debieron a la obtención de los materiales fase del sitio de experimentación. Para la conformación de los especímenes de prueba de ambos muestreos, las especificaciones básicas de manufactura permanecieron constantes (disposición de capas de fases componentes, orientación de tejido de fibras de carbono, dimensiones de especímenes por norma). La disposición de las fibras perpendiculares al eje axial en el tejido de fibras de carbono, actúa

como cinturón de contención, minimizando las deformaciones en los elementos y permitiendo obtener valores mayores de resistencia mecánica.

En ambos ensayos mecánicos, esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, se presenció una leve susceptibilidad del devanado multicapa helicoidal de la fase matriz de cartón que propicia las fallas en las aristas diagonales de unión, efecto que podría ser suprimido al fabricar el cartón de manera homogénea en una sola capa, cómo se mencionó en el método de manufactura industrial del material compuesto. Además, se hace énfasis de la importancia de una correcta adherencia de ambas fases componentes en la zona de interface; puesto que una adherencia insuficiente entre las fases, genera una distribución no uniforme de los esfuerzos y puntos de sobrecarga, disminuyendo la resistencia mecánica del material compuesto.

El comportamiento mecánico del material compuesto a esfuerzos de compresión se determinó de tipo rígido a semirrígido. La unión de las fases componentes, matriz y refuerzo, por medio de la resina epóxica generó un material con elevada rigidez, al presentar escasa deformación durante la aplicación de la carga, además de, presentar fallas de tipo frágil. Cabe mencionar, que la rigidez del material compuesto en los elementos estructurales queda ampliamente determinada por la rigidez de la fase matriz de cartón con la resina epóxica, la cual funge como base para la incorporación del refuerzo de fibras de carbono. Si la fase matriz de cartón carece de la rigidez necesaria, las fallas del material compuesto tenderían a ser de tipo dúctil, como se observó en los especímenes de prueba conformados por cartón (Variable 1). En la Tabla 55 se presentan los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de ambos muestreos.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del material compuesto</b>		
	<b>Especímenes EC1-CF</b>	<b>Especímenes EC2-CF</b>
Esfuerzo máximo resistente	<b>273.47 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>341.67 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a una deformación de 0.021 cm/cm	<b>238.58 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>298.75 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>29,532.00 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,036.00 kg/cm<sup>2</sup></b>



Límite elástico convencional (0.2%)	<b>269.47 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>337.98 kg/cm<sup>2</sup></b>
-------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

*Tabla 55. Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del material compuesto.*

El comportamiento mecánico del material compuesto a esfuerzos de tensión fue definido de tipo semirrígido a dúctil. La incorporación de la resina epóxica incrementó la rigidez de las fases matriz y refuerzo, generando un comportamiento semirrígido en su zona de deformación elástica; más al presentar la resina microfisuras por la deformación a esfuerzos de tensión de las fases componentes, el comportamiento del material se tornó dúctil, mostrando una prolongada deformación plástica con elevados valores de resistencia. Cabe destacar que, durante la ejecución de los ensayos se observó el trabajo conjunto de las fases componentes para la transmisión y resistencia de los esfuerzos de tensión, hasta que la fase matriz de cartón supera su umbral de resistencia máxima y cede a la rotura; a partir de este momento, las fibras de carbono absorben la magnitud de la carga hasta alcanzar su resistencia máxima como material en forma de tejido tipo Twill. En la Tabla 56 se presentan los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de ambos muestreos.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del material compuesto</b>		
	<b>Especímenes ET1-CF</b>	<b>Especímenes ET2-CF</b>
Esfuerzo máximo resistente	<b>1,255.19 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,010.36 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>948.89 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>963.73 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>12,610.00 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,921.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>408.56 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>259.21 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 56. Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del material compuesto.*

En la Tabla 57 se presenta una comparativa de la densidad y las propiedades mecánicas de esfuerzo máximo resistente y módulo de elasticidad, para determinar las variaciones del comportamiento mecánico del material compuesto a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión. En los muestreos EC1 y ET1 se observa que el esfuerzo máximo resistente del material es 4.5 veces mayor a esfuerzos de tensión que a esfuerzos de compresión; mientras que el módulo de elasticidad es un 134% más elevado a esfuerzos de compresión. En los muestreos EC2 y ET2 el esfuerzo máximo resistente del material es casi 3 veces mayor a esfuerzos de tensión que a esfuerzos de compresión; el módulo de elasticidad obtenido de ambos ensayos es aproximadamente el mismo, con un coeficiente de variación del 2.45%.

<b>Comparativa de propiedades mecánicas del material compuesto</b>				
	<b>Muestreo EC1 y ET1</b>		<b>Muestreo EC2 y ET2</b>	
	<b>Esfuerzos de compresión (EC1-CF-n)</b>	<b>Esfuerzos de tensión (ET1-CF-n)</b>	<b>Esfuerzos de compresión (EC2-CF-n)</b>	<b>Esfuerzos de tensión (ET2-CF-n)</b>
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>273.47 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,255.19 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>341.67 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,010.36 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>29,532.00 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>12,610.00 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,036.00 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,921.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Densidad</b>	<b>1,060 kg/m<sup>3</sup></b>		<b>1,200 kg/m<sup>3</sup></b>	

*Tabla 57. Comparativa de propiedades mecánicas del material compuesto.*

Para realizar la comparación del comportamiento mecánico del material compuesto frente a los sistemas estructurales tradicionales, se ha seleccionado la madera como punto de referencia. La selección de la madera se debe a su composición química y microestructura, que consta de fibras de celulosa contenidas en una matriz de lignina y hemicelulosas, clasificándose como un material compuesto natural. La madera,

al igual que el cartón, es un material anisotrópico, ya que los valores de sus propiedades mecánicas varían en función de la dirección de la carga aplicada, debido a la orientación de las fibras de celulosa en el sentido del eje axial de los troncos de los árboles, a nivel de microestructura. La resistencia mecánica en el sentido paralelo a la orientación de las fibras de celulosa es notablemente mayor que en el sentido perpendicular de las fibras.

Las principales propiedades mecánicas analizadas en la madera para conformar elementos estructurales son la resistencia a esfuerzos de compresión, a esfuerzos de tensión y esfuerzos de flexión. Para efectuar el análisis comparativo del material compuesto en relación con la madera, se obtienen los valores de las propiedades mecánicas de esfuerzo máximo resistente en sentido de la fibra y módulo de elasticidad promedio, de la resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, mencionados en las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera (Gobierno de la Ciudad de México, 2017). Se utilizan los valores especificados para diseño, de resistencias y módulo de elasticidad de maderas de especies coníferas, de la clase estructural A (elementos de alta resistencia), presentados en la Tabla 58.

<b>Valores especificados de resistencias y módulo de elasticidad de maderas de especies coníferas, clase estructural A</b>	
Esfuerzo máximo resistente a tensión, paralelo a la fibra ( $f_{tu}'$ )	<b>115 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo máximo resistente a compresión, paralelo a la fibra ( $f_{cu}'$ )	<b>120 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad promedio ( $E_{0.50}$ )	<b>100,000 kg/cm<sup>2</sup></b>
Densidad	<b>400 – 500 kg/m<sup>3</sup></b>

*Tabla 58. Valores especificados de resistencias y módulo de elasticidad de maderas de especies coníferas, clase estructural A (Gobierno de la Ciudad de México, 2017).*

Con base en el análisis de los valores de la Tabla 57 y Tabla 58, se observa que la resistencia a esfuerzos de compresión del material compuesto es de un 128 – 185% mayor que la madera; a esfuerzos de tensión la resistencia del material compuesto es de 9 a 11 veces mayor que la madera. La densidad del material

compuesto es de 2 a 3 veces mayor que la madera de especies coníferas y 6 veces menor a la del acero estructural A36 ( $7,860 \text{ kg/m}^3$ ). En relación con el módulo de elasticidad, para efectos de diseño en la madera se considera un valor promedio de  $100,000 \text{ kg/cm}^2$ , significando una mayor rigidez que el material compuesto.

Cabe destacar que, en la propuesta de los elementos estructurales, conformados por el material compuesto del proyecto de investigación, poseen dimensiones significativamente inferiores en comparación a los elementos elaborados con madera; factor que resulta en un ahorro del peso general de la estructura. Así mismo, la obtención de valores de resistencia mayores a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, permite el uso del material compuesto en elementos estructurales de secciones reducidas que estén sometidos a cargas elevadas. En la Figura 89 y Figura 90 se presenta el comparativo de las gráficas esfuerzo – deformación de los muestreos del material compuesto frente a una madera de pino (especie conífera).

En la gráfica esfuerzo – deformación del ensayo a compresión, se observa que la resistencia del material compuesto es relativamente mayor a la resistencia de la madera de pino (especies coníferas). A diferencia del cartón en el material compuesto, la madera posee una microestructura sin porosidades, ya que las fibras de celulosa se encuentran contenidas en una matriz de ligninas y celulosas, factor que determina una mayor rigidez y menor deformación, como se observó en la Tabla 57 y Tabla 58. En el material compuesto, las fibras de celulosa del cartón (fase matriz), que funge como cuerpo del material, se compactan gradualmente hasta presentar la falla dúctil por el efecto de plegado; debido a esto su deformación es más prolongada.

En la gráfica del ensayo a tensión, Figura 90, se percibe una diferencia sustancial en los valores de esfuerzo máximo resistente del material compuesto frente a la madera de pino con una deformación elástica similar. Cabe destacar que, en la madera de pino al ocurrir la rotura, los valores de esfuerzo y deformación descienden súbitamente, ya que las fibras de celulosa embebidas en la matriz de lignina y hemicelulosas son separadas íntegramente; mientras que, en la rotura del material compuesto, las fibras de carbono se quiebran gradualmente, dando lugar a una falla de tipo dúctil.

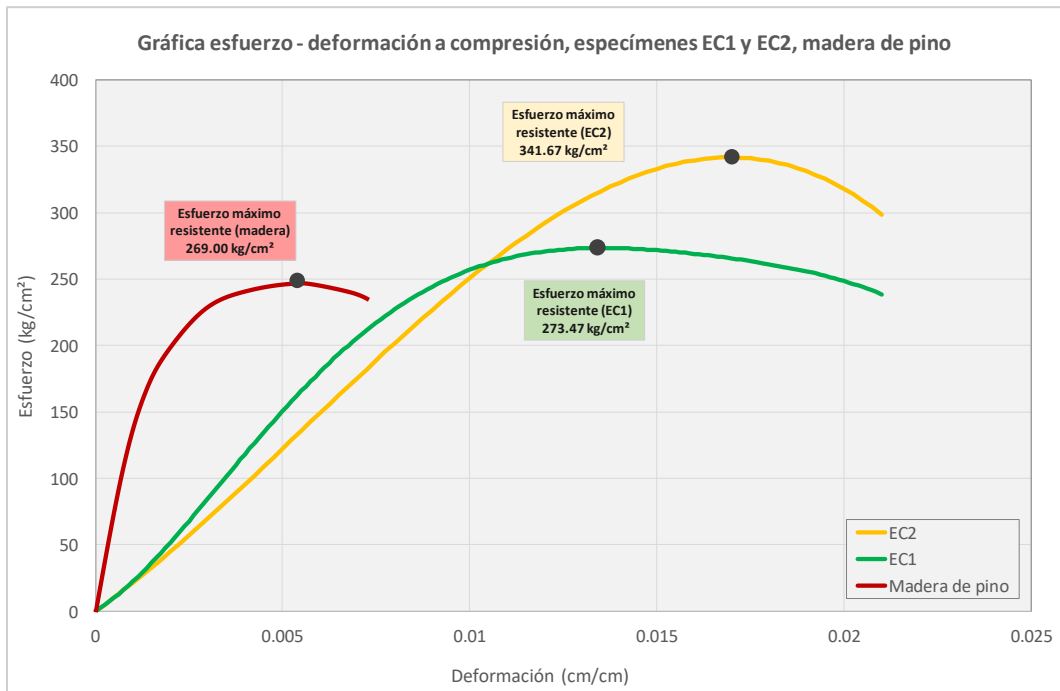


Figura 89. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de los muestreos del material compuesto y una madera de pino [gráfica de madera de pino obtenida de (Aydin, 2007)].<sup>17</sup>

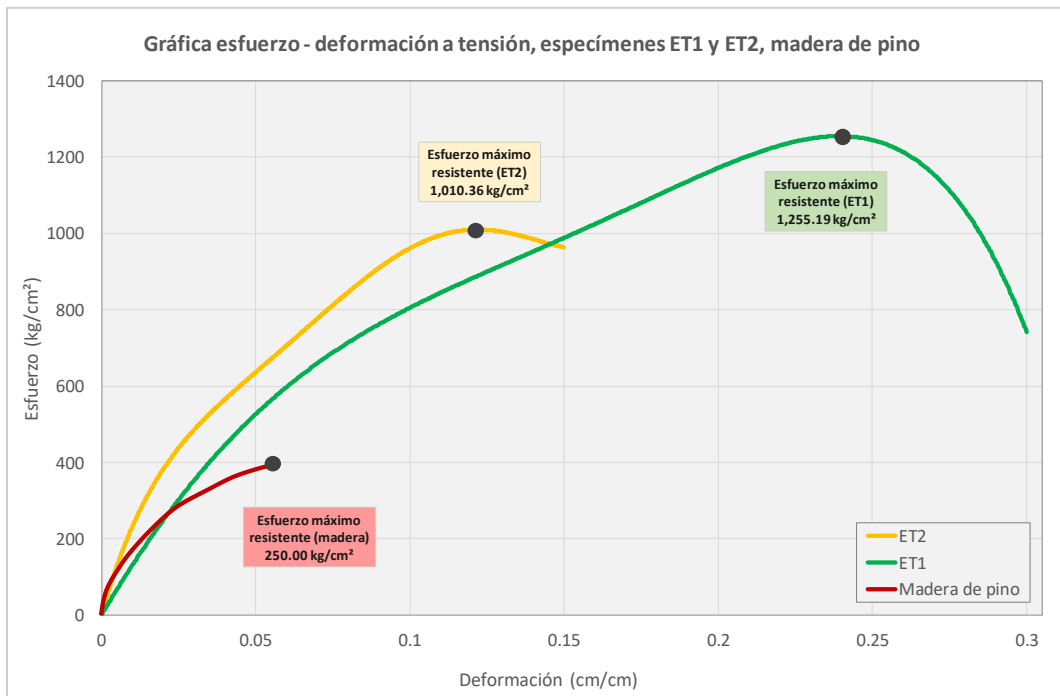


Figura 90. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de los muestreos del material compuesto y una madera de pino [gráfica de madera de pino obtenida de (Ferreira, 2015)].<sup>3</sup>

<sup>17</sup> Los valores de la gráfica esfuerzo - deformación a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión de la madera, fueron obtenidos a partir de la realización de ensayos de resistencia mecánica en artículos científicos; se observa que los valores de esfuerzos máximos resistentes superan lo estipulado por las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera, debido a que la normativa considera valores de diseño con un margen de seguridad.

## Ensayo de envejecimiento ante la intemperie - Norma ASTM G154-06

### Etapa 1: Caracterización previa y proceso de programación.

Para la ejecución del ensayo de la cámara de intemperismo se elaboraron tres especímenes de prueba por variable, dando un total de nueve especímenes, con las especificaciones y la nomenclatura previamente descrita en la Tabla 59. Se elaboró una espécimen de prueba adicional por variable de referencia del muestreo elaborado, Figura 91.



Figura 91. Especímenes de ensayo para envejecimiento ante el intemperismo, tres variables (I-CA-n, I-CR-n, I-CF-n).

Una vez determinados los parámetros para la elaboración del ensayo, se procedió a determinar el peso de los especímenes de prueba, por medio del instrumento “Balanza Adam modelo CQT5000”, obteniendo los siguientes valores, Tabla 59, Figuras 92 - 94.

Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba, previo al ensayo					
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.		Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.		Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.	
I-CA-01	2 g	I-CR-01	3 g	I-CF-01	5 g
I-CA-02	2 g	I-CR-02	3 g	I-CF-02	5 g

I-CA-03	2 g	I-CR-03	3 g	I-CF-03	5 g
I-CA-R	2 g	I-CR-R	3 g	I-CF-R	5 g

Tabla 59. Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba.



Figuras 92 - 94. Pesaje de especímenes de prueba en instrumento de medición (I-CA-n, I-CR-n, I-CF-n).

Con los parámetros establecidos en las tablas Munsell, modelo Soil-Color, se determinaron los valores de Colorimetría de los especímenes de prueba, Tabla 60, Figura 95. Estos valores son tomados como referencia para observar los cambios en las tonalidades de los materiales, que pudiesen ser generados por reacciones físicas y químicas durante el ensayo.

Valores medidos del color de los especímenes de prueba, previo al ensayo		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.



I-CA-n	10 YR Value: 5/ Chroma: /4 <b>5/4</b> Yellowish brown	I-CR-n	7.5 YR Value: 3/ Chroma: /3 <b>3/3</b> Dark brown	I-CF-n	Gley 1 Value: 2.5/ Chroma: N <b>2.5/</b>
--------	---	--------	---	--------	---

Tabla 60. Valores medidos del color de los especímenes de prueba.

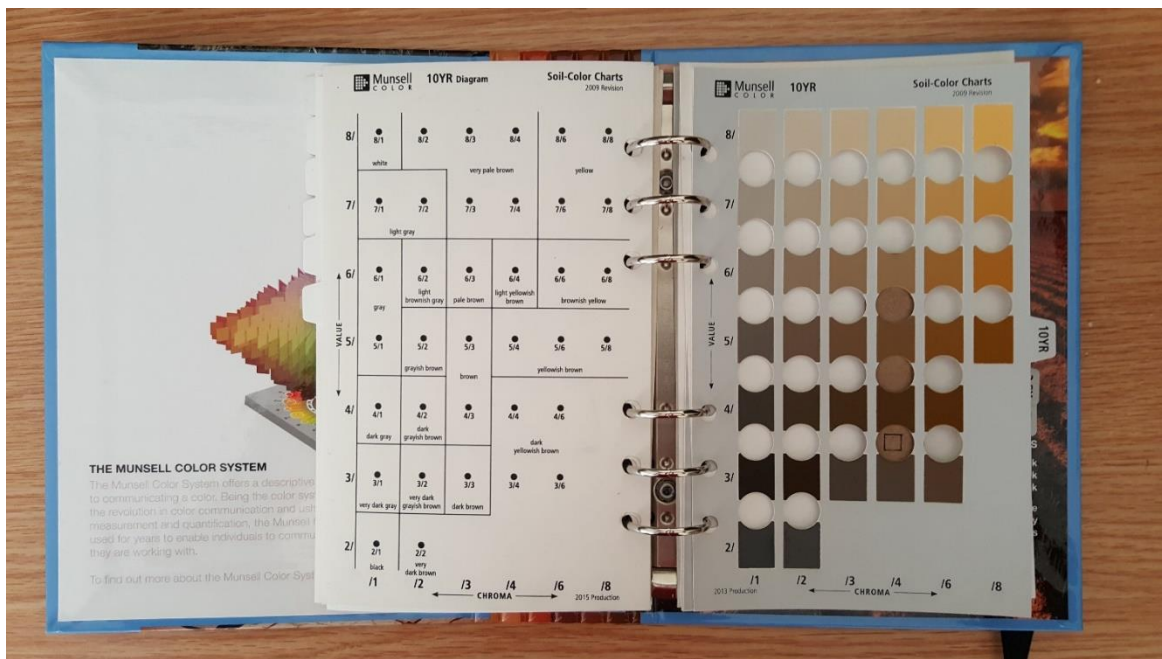


Figura 95. Medición de color de muestra tipo I-CA en Tabla Munsell Soil-Color.

Se colocaron los especímenes de prueba bajo el microscopio óptico, marca Motic modelo SMZ-171 con cámara Moticom de 5 MP, para observar e identificar la porosidad y la descripción de microestructura de los materiales de las tres variables, Tabla 61.

Imágenes de especímenes de prueba bajo microscopio óptico		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos. (40x)	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2. (40x)	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill. (7.5x)



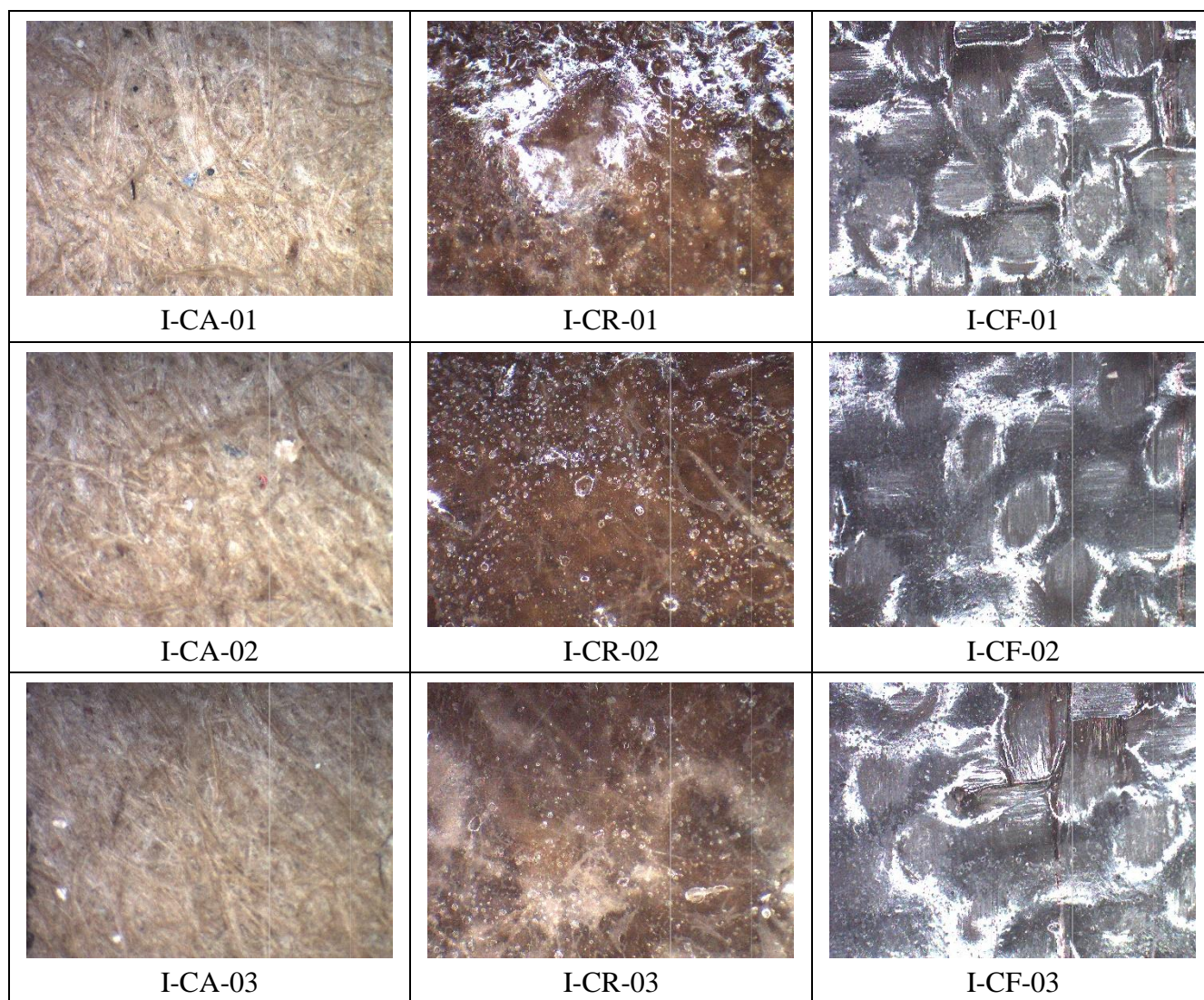


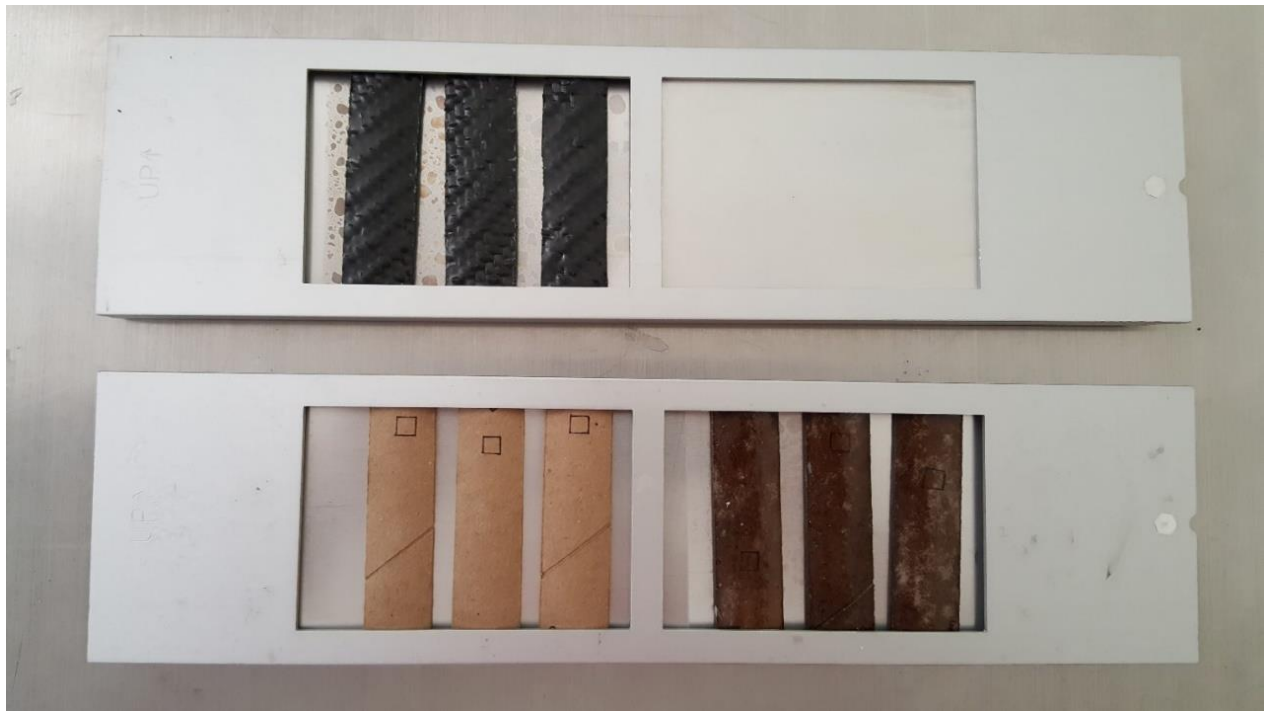
Tabla 61. Imágenes de especímenes de prueba bajo microscopio óptico.

En los especímenes de la Variable 1, I-CA-n, se observó el entrelazamiento que existe entre las fibras de celulosa, con algunas partículas adicionales de forma aleatoria, siendo probablemente residuos de la manufactura. Igualmente, se visualizó la orientación mayoritaria de las fibras según la dirección de máquina (MD), las cuales mostraron un color amarillo-marrón.

En los especímenes de la Variable 2, I-CR-n, a la misma escala que los anteriores, 40x, se percibió la capa de recubrimiento totalmente transparente de la resina epóxica Quintum Q2 sobre las fibras de celulosa, imposibilitando una vista clara de estas. La cobertura de esta no se mostraba uniforme, presentando burbujas en ciertas áreas de la superficie

Los especímenes de la Variable 3, I-CF-n, no pudieron ser analizados a la misma escala que los anteriores (40x) debido al brillo que generaba el material ante la cámara, por lo que las imágenes obtenidas fueron a un enfoque de 7.5x. Se observó el entretrejido de la tela de fibras de carbono recubierto por la resina epóxica totalmente transparente, en algunas partes en mayor cantidad.

Una vez caracterizados los especímenes de prueba en color, pesaje y microscopía, se procedió a colocarlos en los soportes de prueba, como se muestra en la Figura 96.



*Figura 96. Colocación de especímenes de prueba en soportes para la cámara de intemperismo.*

Los depósitos con las muestras fueron depositados dentro de la cámara de intemperismo, seleccionando el ciclo 6, especificado en la Tabla 27, con una duración total de 336 horas (equivalencia aproximada a clima de la Ciudad de México de tres meses), teniendo como inicio del ensayo el día 23 de octubre de 2018 a las 16:30 horas, Figura 97 y Figura 98.





Figura 97 - 98. Colocación de soportes en cámara de intemperismo y programación de ciclo 6 (normas ASTM G-154).

### **Etapla 2: Proceso y finalización de ciclo en cámara de intemperismo.**

El 7 de noviembre se concluyó el ensayo aproximadamente a las 6 de la tarde, habiendo cumplido el ciclo 6 con una duración total de 336 horas. Se procedió a retirar los soportes de los 9 especímenes, de la máquina de intemperismo. A simple vista se percibió en los especímenes tipo I-CR-n e I-CF-n un cambio de color, tornándose la resina epóxica de un tono totalmente transparente a un tono amarillento, Figura 99.



Figura 99. Especímenes de prueba en soportes posteriores a ensayo en cámara de intemperismo.

Al retirar los especímenes de los soportes se observó con mayor facilidad el cambio de tono de las superficies de los materiales, siendo más evidente en las especímenes de prueba tipo I-CR-n e I-CF-n. Dado que el cambio de tono no se presentó en las partes ocultas de las especímenes de prueba que permitían sostenerse de los soportes, ni en la parte posterior, se puede determinar que el cambio de coloración fue debido a la aplicación de la radiación ultravioleta, Figura 100.



Figura 100. Especímenes de prueba posteriores a ensayo en cámara de intemperismo. Se observa el cambio de coloración por el ensayo en las esquinas de las especímenes de prueba.

### Etapa 3: Caracterización posterior al ensayo y análisis de información.

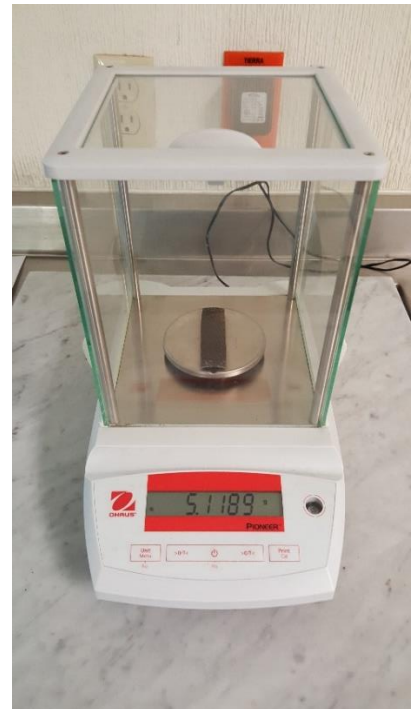
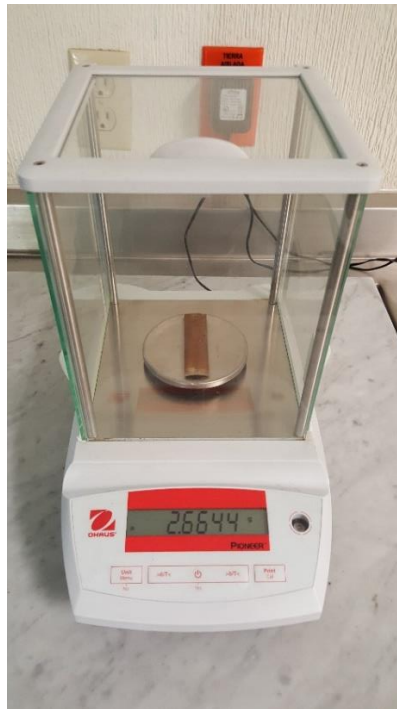
Se procedió a determinar el peso de los especímenes posterior al ensayo, por medio de un instrumento de mayor precisión siendo el equipo “Ohaus Pioneer con una precisión de 0.0000 gramos”, y se obtuvieron los siguientes valores, Tabla 62.

Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba, posterior a ensayo					
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.		Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.		Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.	
I-CA-01	1.8288 g	I-CR-01	2.7311 g	I-CF-01	5.1194 g
I-CA-02	1.8807 g	I-CR-02	2.6652 g	I-CF-02	5.0857 g

I-CA-03	2.0121 g	I-CR-03	2.7092 g	I-CF-03	4.8609 g
---------	----------	---------	----------	---------	----------

*Tabla 62. Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba, posterior al ensayo.*

Debido a que el procedimiento de pesaje se realizó con equipos diferentes previo y posterior al ensayo, no se tiene un valor exacto del cambio de peso de los materiales; por esto, se volvió a pesar los especímenes posteriores al ensayo en la primera báscula y se contrastaron los resultados. Se observó que hubo una pérdida de peso muy ligera del material aproximada del 10% del peso inicial, generada por la pérdida del contenido de humedad de los materiales, tanto en las fibras de celulosa, como en la resina epóxica, Figuras 101 – 103.



*Figuras 101 - 103. Pesaje de especímenes de prueba en instrumento de medición, posterior a ensayo (I-CA-n, I-CR-n, I-CF-n).*

Con los parámetros establecidos en las tablas Munsell, modelo Soil-Color, se determinaron los valores de Colorimetría de los especímenes de prueba, para observar los cambios en la coloración de los materiales, Tabla 63.

Valores medidos del color de los especímenes de prueba, posterior al ensayo					
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.		Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.		Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.	
I-CA-n	Value: 5/ Chroma: /4 <b>5/4</b> Yellowish brown	I-CR-n	Value: 4/ Chroma: /6 <b>4/6</b> Dark yellowish brown	I-CF-n	Gley 1 Value: 3/ Chroma: 10Y <b>3/1</b> Very dark greenish black

Tabla 63. Valores medidos del color de los especímenes de prueba.

El cambio de color perceptible por medio de las tablas de Munsell sólo se presentó en las variables I-CR-n e I-CF-n, mostrando la aparición de un tono amarillento en las superficies de exposición; fenómenos producido por la descomposición de la resina epóxica, al recibir altas concentraciones de radiación ultravioleta, los polímeros termofijos sufren el rompimiento de sus cadenas moleculares.

Igualmente, se presentó un ligero cambio en la geometría de las especímenes de prueba más flexibles, I-CA-n e I-CR-n, generando una flexión (aproximadamente de 1.5 mm) sobre el eje axial de los especímenes, fenómeno de contracción plástica propiciado por los cambios de temperatura y humedad del ciclo, Figura 104.



Figura 104. Especímen de prueba I-CA-01 posterior a ensayo, en el que se observa la flexión del elemento al centro.



Los especímenes de prueba fueron colocados nuevamente bajo el microscopio óptico, marca Motic con cámara Moticom de 5 MP, para observar e identificar la porosidad y la descripción de microestructura de los tres tipos de materiales, posterior a la ejecución del ensayo, Tabla 64, Figura 105.



Figura 105. Instrumento de medición microscopio Motic modelo SMZ-171.

Imágenes de especímenes de prueba bajo microscopio óptico, posterior a ensayo		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos. (40x)	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2. (40x)	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill. (7.5x)

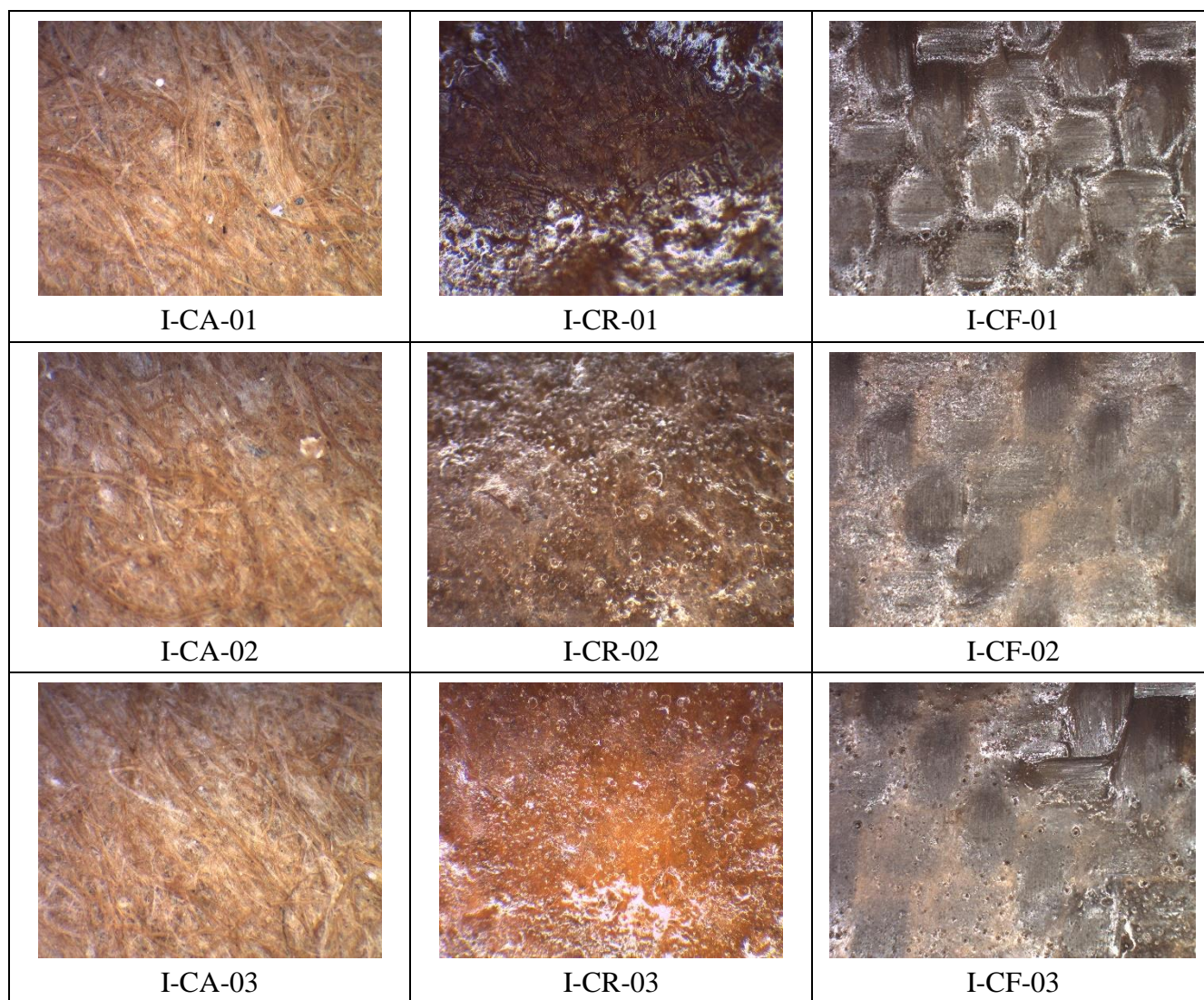


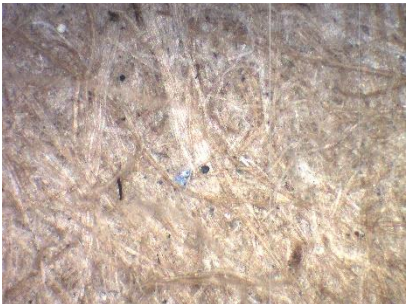
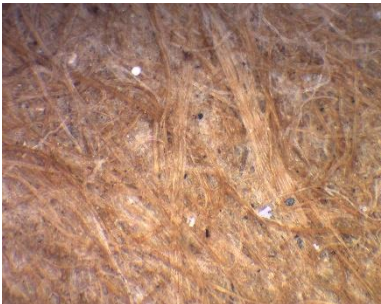
Tabla 64. Imágenes de especímenes de prueba bajo microscopio óptico, posterior al ensayo.

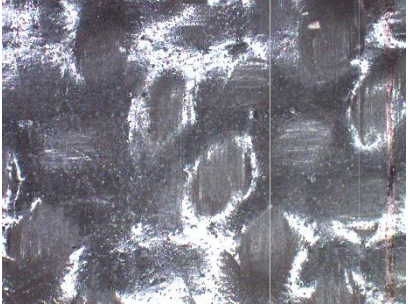

En los especímenes de la Variable 1 I-CA-n, se observó un oscurecimiento del material hacia los tonos amarillos; no se presentó alteración notable en la microestructura del material (escala de 40x). En los especímenes de la Variable 2, I-CR-n, se exhibió el fenómeno aumentado de la variable antes descrita, debido a la descomposición sufrida en las cadenas moleculares de la resina epóxica (rompimiento de enlaces que a microescala se observa el cambio a tonos amarillos), (escala de 40x). En los especímenes de la Variable 3, I-CF-n (imágenes obtenidas a 7.5x), se hizo notable en el microscopio, la descomposición de la resina epóxica, tanto en cambio de tono a amarillo como en transparencia, volviéndose el material más opaco. Además, se prevé que pudiesen formarse oquedades entre las fibras y la resina debido a la separación entre estas.



#### Etapa 4: Análisis de resultados.

- Se presentó una disminución del peso de los especímenes en las tres variables, aproximadamente del 10% del peso original; suceso debido a la pérdida de contenido de humedad.
- Los especímenes sufrieron una ligera deformación de tipo flexión sobre el eje axial, por los cambios de temperatura y humedad durante el ciclo de prueba, siendo más evidente en los materiales menos rígidos, I-CA-n e I-CR-n.
- Se identificó un cambio de color en las tres variables de los especímenes de prueba, presentándose de manera general los tonos amarillos, y en el caso de las muestras I-CF-n, un opacamiento de la resina epóxica. Este fenómeno presente en las especímenes de prueba poseedoras de resina epóxica se debe a la descomposición de las cadenas moleculares, característico de los polímeros termofijos, Tabla 65.
- Se determinó que la superficie convexa de los especímenes de prueba fue más susceptible a los efectos de radiación solar, mientras que la superficie cóncava fue más susceptible a los efectos de humedad.
- De manera cualitativa no se prevé un cambio notable de las propiedades mecánicas de los materiales puestos a prueba por los efectos de intemperización realizados en la cámara de intemperismo. Para la obtención de esto, se recomienda realizar una serie de ensayos compuestos “intemperismo – propiedades mecánicas”, para poder determinar numéricamente si existe un cambio en la resistencia del material ante dichos efectos, lo cual pudiese pronosticar el comportamiento mecánico del material compuesto en ambientes exteriores.

Análisis comparativo de especímenes previo y posterior a ensayo	
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos. (40x)	Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos. (40x)
	
I-CA-01	I-CA-01

<p>Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill. (7.5x)</p>	<p>Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill. (7.5x)</p>
 <p>I-CF-02</p>	 <p>I-CF-02</p>

*Tabla 65. Imágenes de especímenes de prueba bajo microscopio óptico, previo y posterior al ensayo. Se observa el cambio de color debido a la exposición de radiación ultravioleta, tornándose las fibras de celulosa y la resina epóxica en un tono amarillento; además se visualiza el cambio de transparencia a opaco en la resina epóxica.*

## Ensayo de absorción de humedad - Norma ASTM D570-98

### Etapa 1: Preparación de muestras y programación de ensayo.

Se elaboraron tres especímenes de prueba por variable para la ejecución del ensayo de absorción de humedad, dando un total de nueve especímenes, con las especificaciones y la nomenclatura previamente descrita en la Tabla 28, Figura 106. Una vez determinados los parámetros para la elaboración del ensayo, se procedió a determinar el peso de los especímenes de prueba para determinar su contenido de humedad bajo ambientes no controlados, por medio del instrumento “Ohaus Pioneer con una precisión de 0.0000 gramos”, obteniendo los siguientes valores, Tabla 66.



Figura 106. Especímenes para ensayo de absorción de humedad, tres variables (H-CA-n, H-CR-n, H-CF-n).

Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba, previo al secado					
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.		Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.		Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.	
H-CA-01	5.0580 g	H-CR-01	7.0631 g	H-CF-01	12.7904 g

H-CA-02	4.9644 g	H-CR-02	7.8042 g	H-CF-02	14.3549 g
H-CA-03	5.0063 g	H-CR-03	7.6513 g	H-CF-03	16.0644 g

Tabla 66. Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba de absorción de humedad, previo al proceso de secado.

Una vez obtenido el pesaje de los especímenes se procedió a introducirlos en la mufla marca Felisa modelo FE-340, para iniciar el proceso de secado, con una duración de 24 horas a una temperatura de  $50 \pm 3$  °C, teniendo como inicio el 21 de noviembre de 2018 a las 18:00 horas, Figura 107.



Figura 107. Especímenes de ensayo introducidos en la mufla para iniciar proceso de secado (H-CA-n, H-CR-n, H-CF-n).

### **Etapa 2: Procedimiento de ensayo y análisis de resultados.**

Al finalizar el proceso de secado, se procedió a retirar de la mufla un espécimen a la vez, para colocarlos en la desecadora, en la cual fueron enfriados hasta poder ser pesados en la báscula. Una vez secos los especímenes, cuidadosamente se retiró la tapa de la desecadora para proseguir con el pesaje en el instrumento “Ohaus Pioneer”, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 67, Figuras 108 – 110.



Figuras 108 – 110. Pesaje de especímenes en instrumento de medición, posterior a proceso de secado (H-CA-n, H-CR-n, H-CF-n).

### Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba, posterior al secado

Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.		Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.		Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.	
H-CA-01	4.9031 g	H-CR-01	6.9158 g	H-CF-01	12.6191 g
H-CA-02	4.8119 g	H-CR-02	7.5708 g	H-CF-02	14.2132 g
H-CA-03	4.8797 g	H-CR-03	7.4601 g	H-CF-03	15.9152 g

Tabla 67. Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba de absorción de humedad, posterior al proceso de secado.

Se observó que en los especímenes de las tres variables hubo una disminución del peso tras el proceso de secado, determinando que las muestras bajo ambientes no controlados poseen un contenido de humedad relativo. Utilizando el modelo descrito en la norma ASTM D570, se obtuvo que los especímenes de la primera Variable (H-CA-n) conservan un contenido medio de humedad inicial del



2.96%; los especímenes de la Variable H-CR-n poseen un contenido medio de humedad inicial del 2.58%; y los especímenes de la Variable H-CF-n un contenido medio de humedad inicial del 1.09%. Se observa que los especímenes H-CA-n poseen un mayor contenido de humedad, debido a las características de porosidad a nivel microscópico del material, lo que permite mayor captación de humedad del ambiente; mientras que en las Variables H-CR-n y H-CF-n los aditamentos como las fibras de carbono y la resina epóxica, no permiten la permeabilidad en el material.

Posteriormente, las muestras fueron sumergidas en agua destilada (para evitar reacciones químicas) durante un periodo de dos horas, Figura 111. Al finalizar el proceso de hidratación, los especímenes fueron sustraídos de los recipientes y secados superficialmente. A continuación, fueron pesados en el instrumento “Ohaus Pioneer”, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 68.



Figura 111. Proceso de inmersión en agua destilada de los especímenes de prueba, tres variables (H-CA-n, H-CR-n, H-CF-n).

Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba, posterior a la absorción					
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.		Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2.		Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epóxica Quintum Q2 y tejido de fibras de carbono 12K Twill.	
H-CA-01	12.0200 g	H-CR-01	7.6740 g	H-CF-01	13.0292 g

H-CA-02	11.8020 g	H-CR-02	7.9865 g	H-CF-02	14.4245 g
H-CA-03	11.7890 g	H-CR-03	7.9490 g	H-CF-03	16.7649 g

Tabla 68. Valores obtenidos del pesaje de los especímenes de prueba de absorción de humedad, posterior al proceso de absorción.

Se observó que los especímenes de la Variable 1, compuestos por un material fibroso (cartón), poseen gran grado de absorción de humedad, debido a la elevada porosidad del material y a su permeabilidad. Implementando el modelo descrito en la norma ASTM D570, se obtuvo que los especímenes de la Variable 1 (H-CA-n) incrementaron en porcentaje de peso (por la absorción de humedad) una media de 143.88%; los especímenes de la Variable 2 (H-CR-n) incrementaron una media de 7.66%; y los especímenes de la Variable 3 (H-CF-n) una media de 3.35%.

Al analizar los resultados obtenidos, se determinó que la adición de recubrimientos sobre la matriz de cartón disminuye proporcionalmente la permeabilidad del material, permitiendo un menor grado de absorción de humedad; factor que minimiza la alteración de las propiedades mecánicas de la matriz, ya que el cartón es vulnerable a la presencia de humedad por el rompimiento de los enlaces iónicos tipo -OH. En apariencia, el ensayo de absorción no generó cambios notables en el color, más que el oscurecimiento de los especímenes H-CA-n por la presencia de agua, Figura 112.



Figura 112. Especímenes de prueba tras ensayo de absorción de humedad, tres variables (H-CA-n, H-CR-n, H-CF-n). Se observa el ligero oscurecimiento de las especímenes de prueba de la Variable 1 por la presencia de agua en el material.

## Capítulo VIII: Aplicación del material compuesto en Arquitectura – Caso de estudio

La aplicación del material compuesto en elementos estructurales se ha realizado en el sistema estructural constituido por armaduras<sup>18</sup> planas tipo Pratt de la cubierta del proyecto arquitectónico “Gimnasio para artes marciales”. El diseño estructural de las armaduras del caso de estudio ha tenido por finalidad optimizar la distribución de los esfuerzos en el sistema estructural, utilizando las propiedades mecánicas del material compuesto. Dado que el material compuesto posee un comportamiento anisotrópico, la orientación de las capas que lo constituyen han sido planteadas en el sentido del eje axial de cada elemento estructural para la obtención de los valores mayores de resistencia a los esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión. Se presenta el procedimiento para el diseño estructural por cargas gravitacionales de las armaduras de la cubierta en el caso de estudio “Gimnasio para artes marciales”.

### Caso de estudio “Gimnasio para artes marciales”

El proyecto comprende un gimnasio deportivo especializado para el desarrollo de las actividades de los practicantes de artes marciales, teniendo como base la ejecución del entrenamiento y los eventos de competencia. El recinto se dispone en dos niveles: el primer nivel incluye las áreas de entrenamiento, la zona administrativa, los vestidores y sanitarios, y las áreas de servicio, Plano 1; en el segundo nivel se encuentran las zonas de gradas para los espectadores, Plano 2. Los espacios que contiene el recinto se mencionan en la Tabla 69. El complejo deportivo comprende una superficie de desplante de 1,520 m<sup>2</sup> y una altura exterior de 14.60 m. Para el soporte de la cubierta se ha implementado un sistema estructural de armaduras planas tipo Pratt apoyadas sobre columnas; constituidas por el material compuesto del proyecto de investigación.

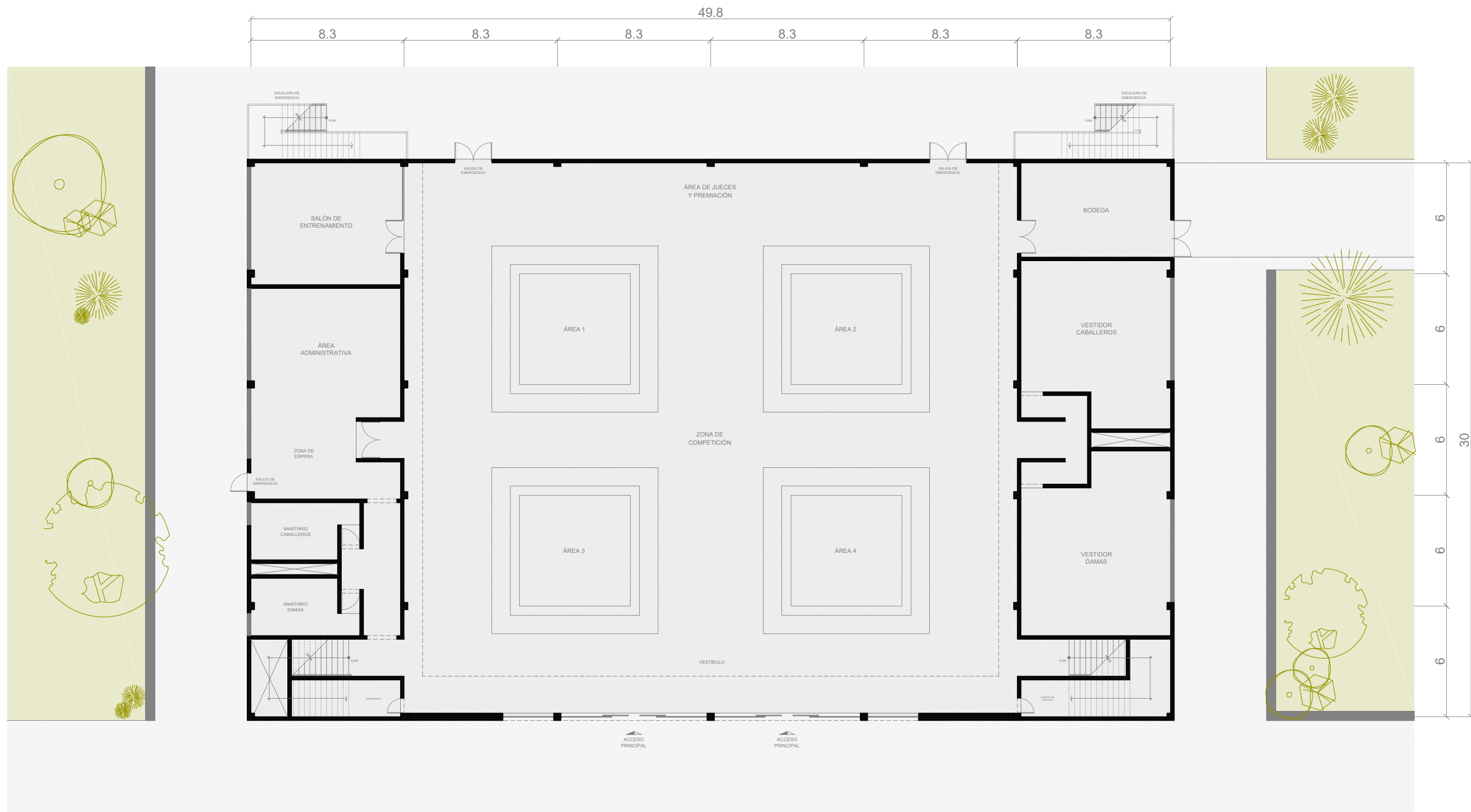
Espacios de gimnasio para artes marciales	
Planta baja	
Espacio	Superficie
Zona de competición – entrenamiento	990 m <sup>2</sup>

<sup>18</sup> Una armadura o cercha se define como un sistema estructural hiperestático constituido por una serie de elementos estructurales esbeltos conectados por nodos, denominados barras, dispuestas geoméricamente para generar módulos rígidos triangulares; de manera que idealmente se encuentren trabajando sólo a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión. Sus componentes principales son: cuerda superior, cuerda inferior, montantes, diagonales y nodos.



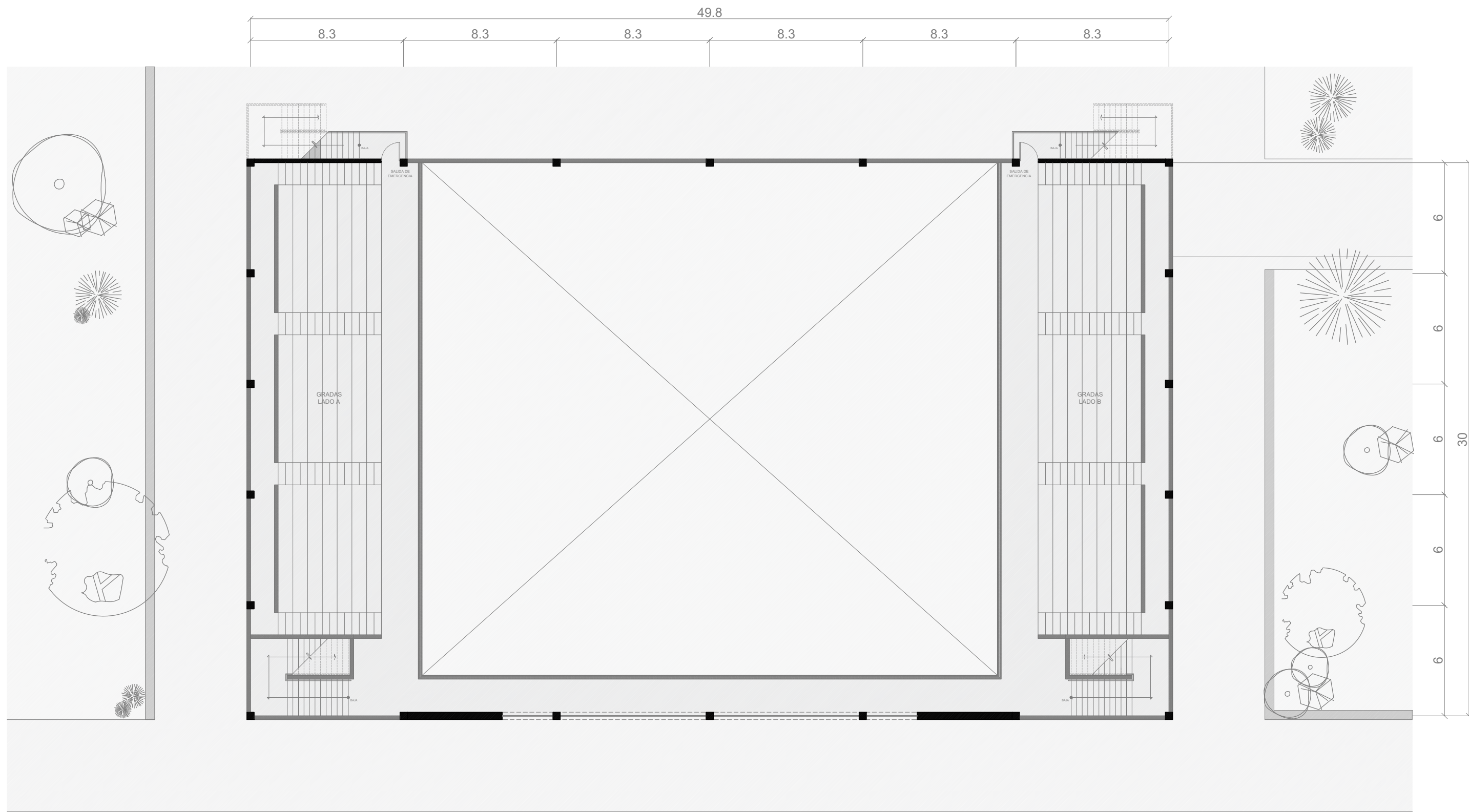
Área administrativa	90 m <sup>2</sup>
Área de sanitarios	58 m <sup>2</sup>
Vestidores	164 m <sup>2</sup>
Servicios	84 m <sup>2</sup>
<b>Planta alta</b>	
<b>Espacio</b>	<b>Superficie</b>
Gradas lado A	230 m <sup>2</sup>
Gradas lado B	230 m <sup>2</sup>

*Tabla 69. Superficies de espacios del Gimnasio para artes marciales.*



PLANO ARQUITECTÓNICO - PLANTA BAJA  
GINNASIO DE ARTES MARCIALES

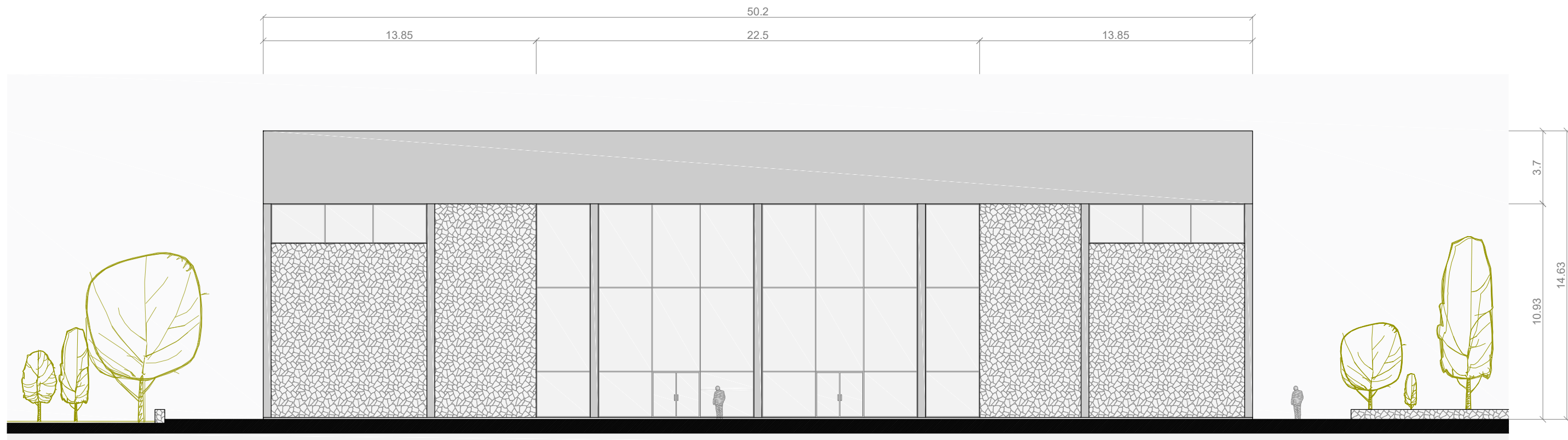




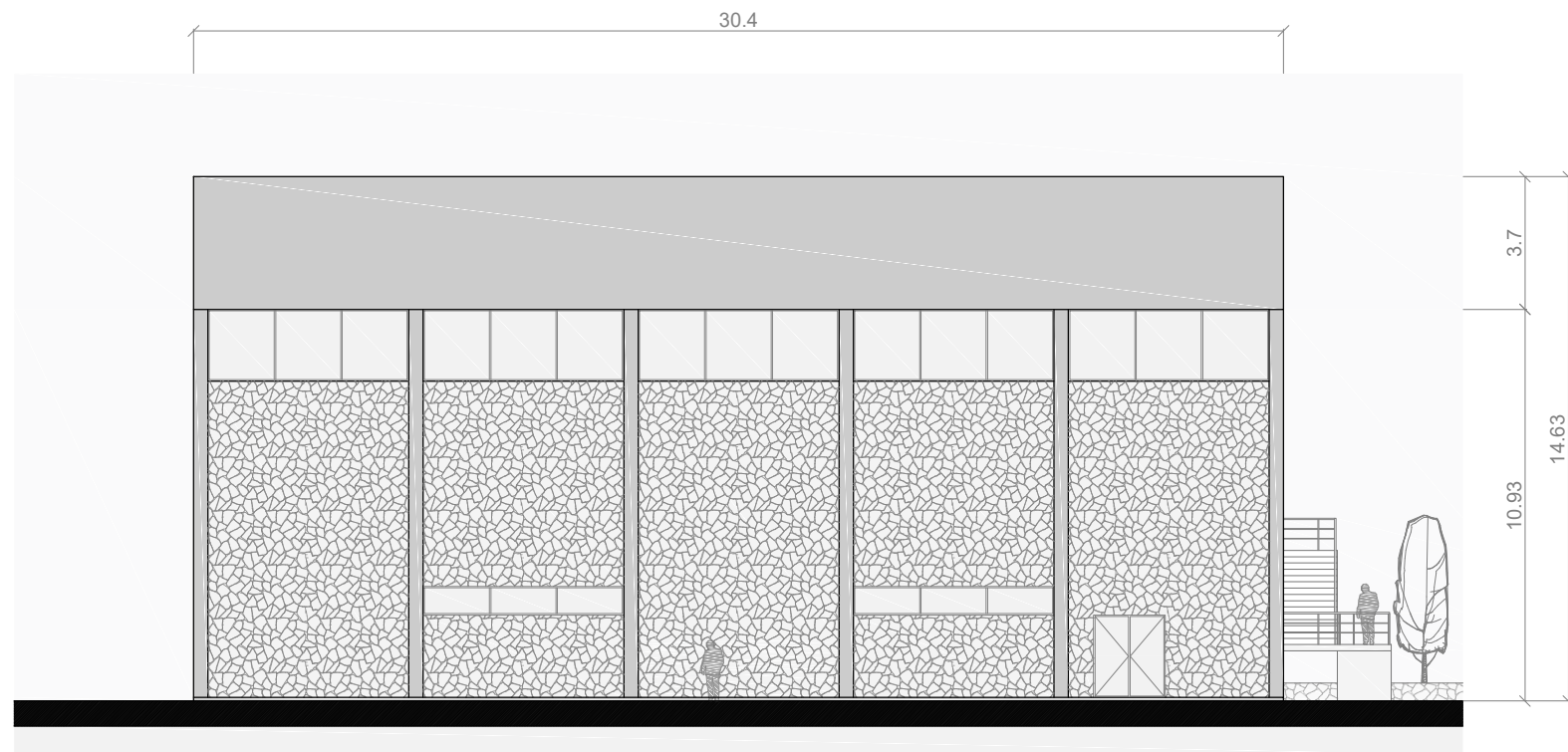
PLANO ARQUITECTÓNICO - PLANTA ALTA  
GINNASIO DE ARTES MARCIALES



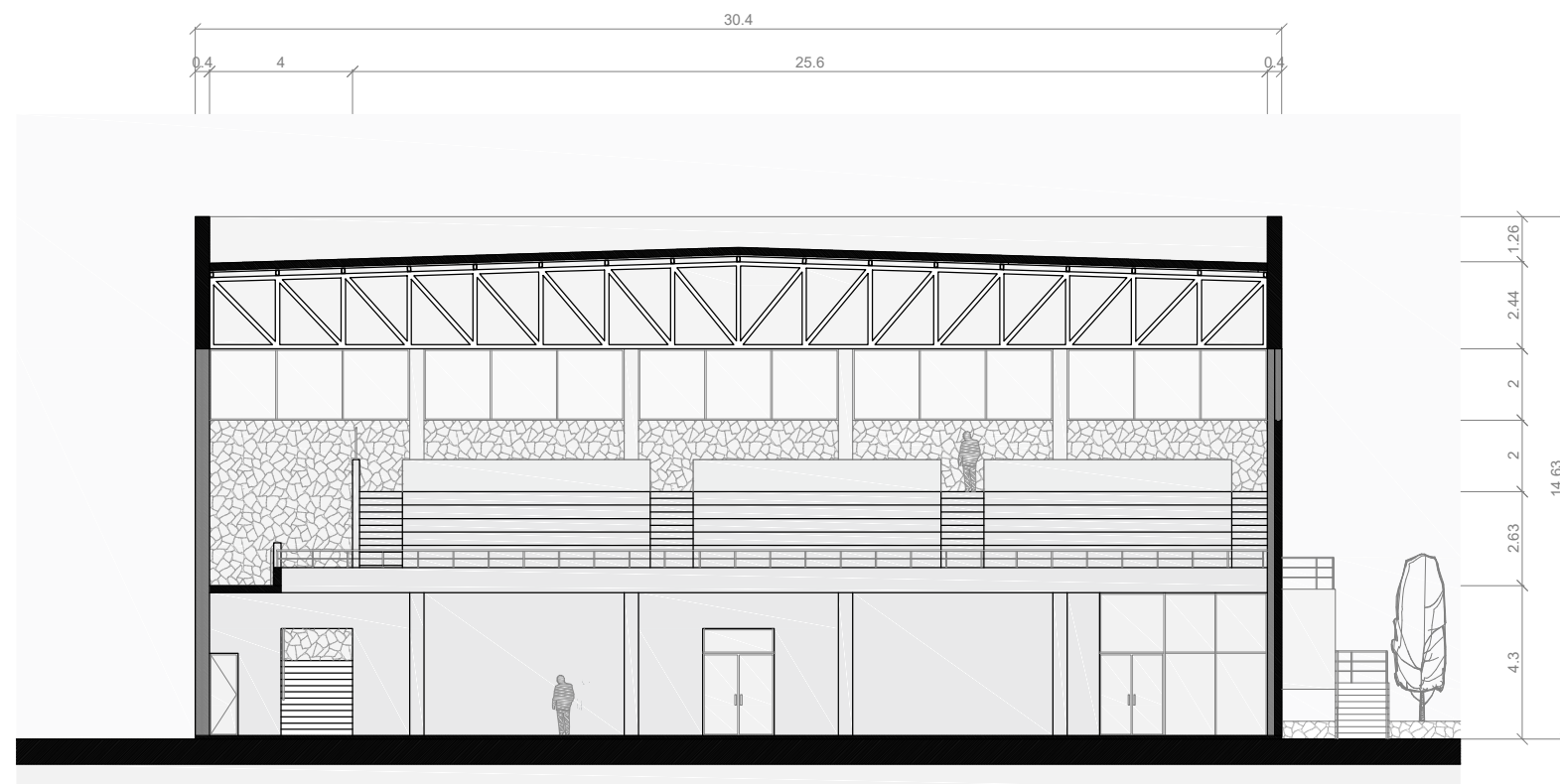




PLANO ARQUITECTÓNICO - ALZADO FRONTAL  
GIMNASIO DE ARTES MARCIALES



PLANO ARQUITECTÓNICO - ALZADO LATERAL 1  
GIMNASIO DE ARTES MARCIALES



PLANO ARQUITECTÓNICO - SECCIÓN A - A'  
GIMNASIO DE ARTES MARCIALES

## Diseño estructural de armaduras con material compuesto

Para la obtención de los valores de las cargas aplicadas sobre las armaduras se ha realizado el análisis de cargas gravitacionales mencionado en la Tabla 70; tomando como base la carga muerta ( $W_m$  – carga máxima) y la carga viva ( $W_m$  – carga máxima). En el análisis de la carga muerta en la cubierta se incluyen el peso del panel marca Ternium – Multypanel modelo Multytecho, las instalaciones eléctricas y pluviales, una capa de impermeabilizante y la sobrecarga. Para el análisis de la carga viva se ha contemplado el valor de carga máxima en azoteas con pendiente no mayor a 5%, descrito en las Normas Técnicas Complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.

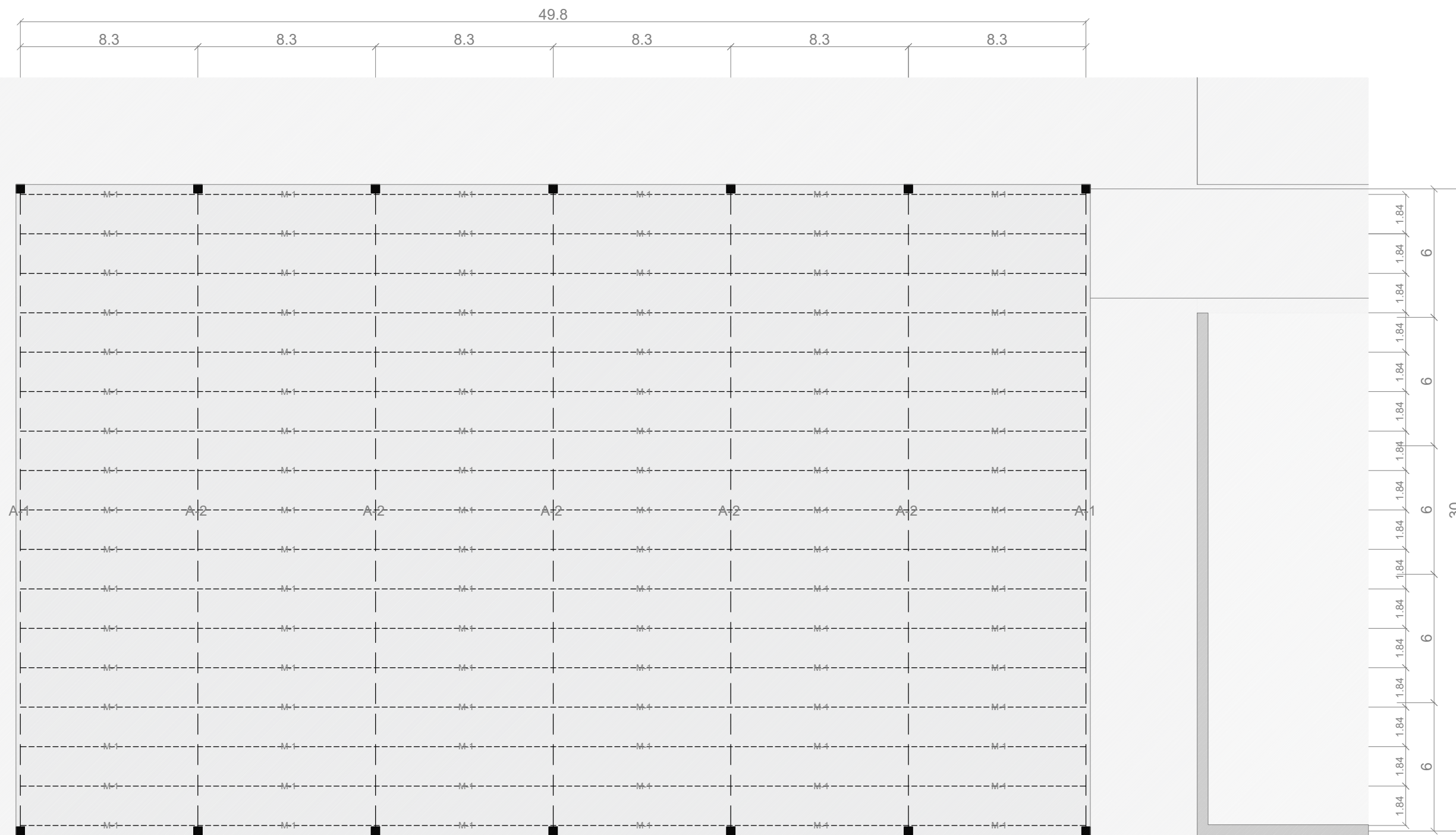
<b>Análisis de cargas gravitacionales en nivel de cubierta</b>	
<b>Carga muerta (<math>W_m</math> – carga máxima)</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Peso (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Panel Multytecho Ternium, de 6” de espesor, calibre 26 de cara exterior, anchura de 1 m, longitudes de 7.37 m y 7.83 m.	15
Instalaciones eléctricas	20
Instalaciones pluviales	10
Impermeabilizante	10
Sobrecargas (instalación de cubierta)	20
<b>Total de carga muerta</b>	<b>75 kg/m<sup>2</sup></b>
<b>Carga viva (<math>W_m</math> – carga máxima)</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Peso (kg/m<sup>2</sup>)</b>
Azoteas con pendiente no mayor a 5%	100
<b>Total de carga viva</b>	<b>100 kg/m<sup>2</sup></b>
<b>Total de cargas gravitacionales</b>	<b>175 kg/m<sup>2</sup></b>

Tabla 70. Análisis de cargas gravitacionales en nivel de cubierta, gimnasio para artes marciales.

En el Plano 5 se observa la distribución de los elementos estructurales de la cubierta, teniendo como capa superior los montantes (M1) que soportan los paneles para la cubierta; posteriormente sostenidos por las

armaduras tipo A-1 (armaduras en extremos de la cubierta) y A-2 (armaduras al centro de la cubierta). En el Plano 6 se presenta la disposición de los paneles Multytecho Ternium sobre la cubierta, presentando dos tipos de dimensiones, 7.83 m x 1 m en los extremos y 7.37 m x 1 m al centro. El Plano 7 exhibe la distribución de los tableros de las cargas gravitacionales sobre los montantes M1, los cuales a su vez transmiten las cargas a las armaduras principales, obteniendo áreas de 6 m<sup>2</sup> y 8.01 m<sup>2</sup> para las armaduras tipo A-1, y 11.46 m<sup>2</sup> y 15.29 m<sup>2</sup> para las armaduras tipo A-2, Plano 8.

Con base en los valores de las cargas aplicadas sobre las armaduras en la cubierta, se obtienen dos tipos de armaduras. Las armaduras tipo A-1 se encuentran en los extremos del edificio, recibiendo cargas puntuales sobre sus nodos de 1.05 T y 1.40 T. Las armaduras bajo la denominación A-2, ubicadas al centro de la cubierta, poseen cargas puntuales aplicadas mayores de 2.01 T y 2.68 T. Por lo tanto, la aplicación del material compuesto para el diseño estructural de las armaduras se ha efectuado en los dos tipos de armaduras A-1 y A-2.



PLANO ESTRUCTURAL - ESTRUCTURA DE CUBIERTA (ARMADURAS Y MONTANTES)  
GIMNASIO DE ARTES MARCIALES





49.8

8.3

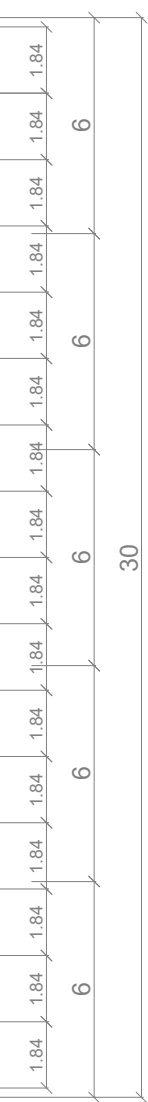
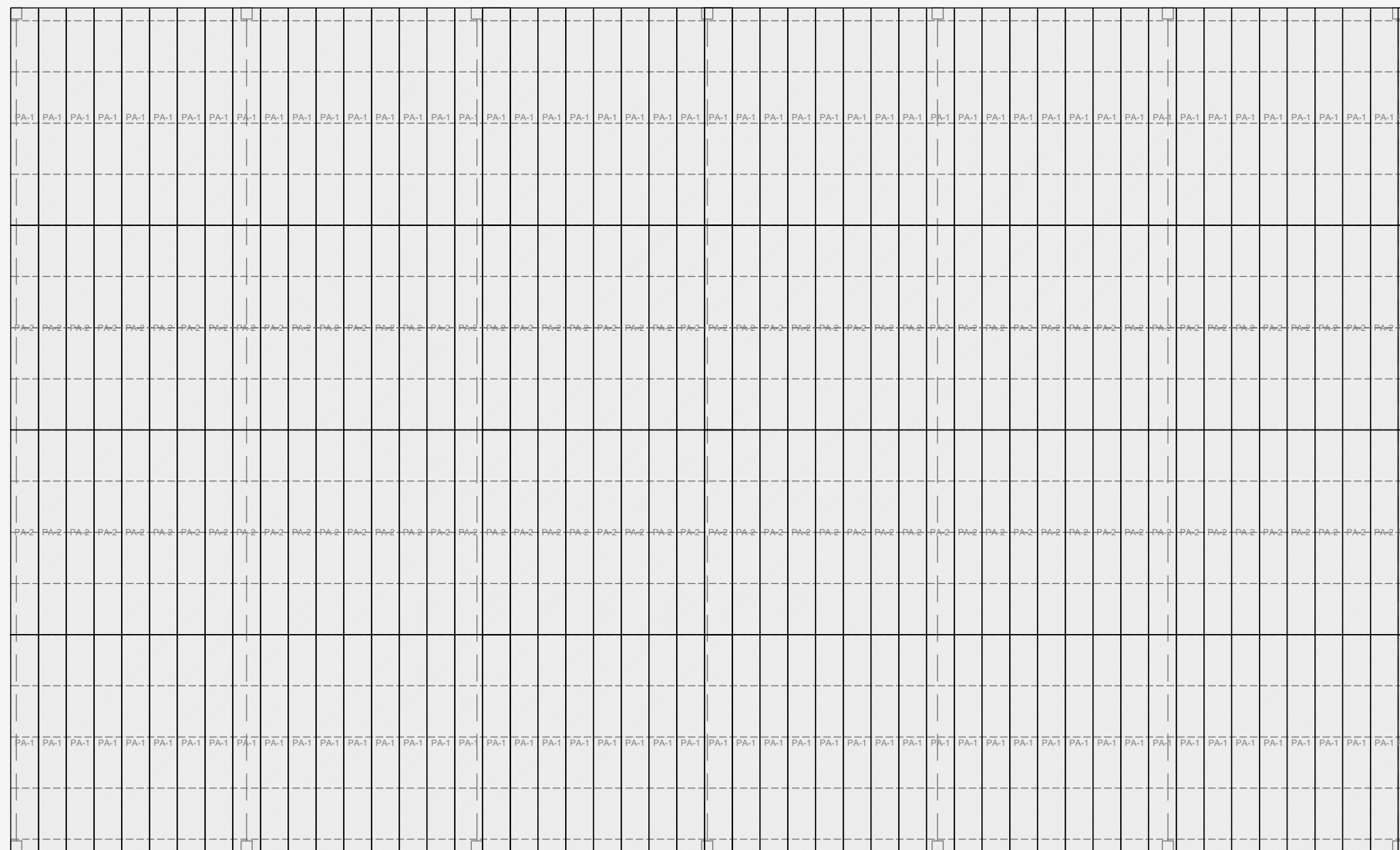
8.3

8.3

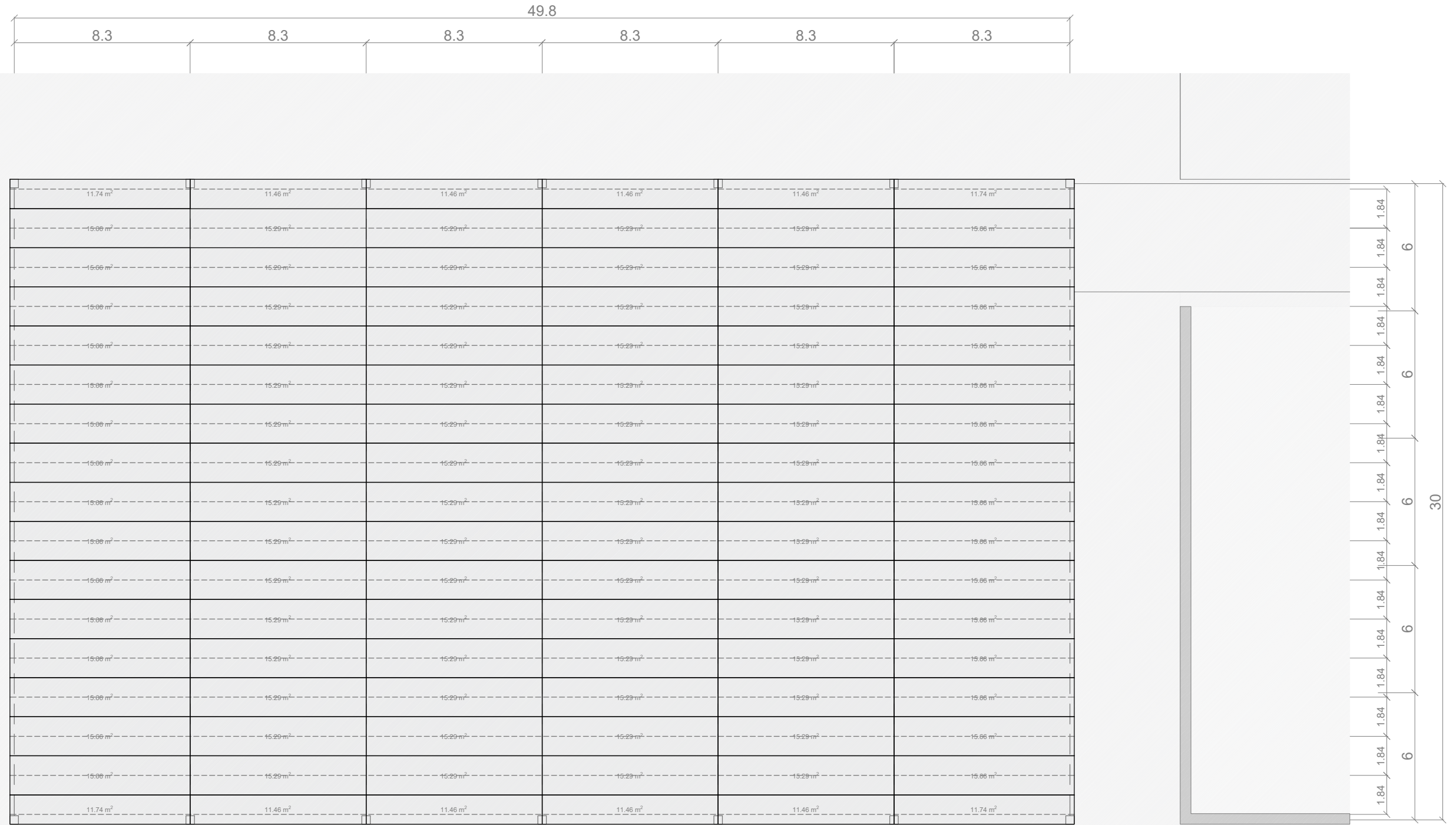
8.3

8.3

8.3



PLANTA DE CUBIERTA - DISTRIBUCIÓN DE PANELES EN CUBIERTA  
GIMNASIO DE ARTES MARCIALES



PLANTA DE CUBIERTA - TABLEROS DE CARGA SOBRE MONTANTES  
GIMNASIO DE ARTES MARCIALES







Las armaduras A-1 y A-2 poseen un diseño geométrico tipo Pratt, una pendiente del 3%, con una longitud total a ejes de 29.48 m, una altura central de 2.32 m y alturas laterales de 1.88 m. Se caracterizan por poseer apoyos continuos en los extremos de la cuerda superior, significando la presencia de valores mayores a esfuerzos de tensión. En los Planos 9 y 10 se presentan los diagramas generales de las armaduras, con la nomenclatura correspondiente a las barras de las cuerdas superiores e inferiores, los montantes y las diagonales. Los diagramas de cargas muestran la aplicación de las cargas gravitacionales de 1.05 T y 1.40 T sobre los nodos de la cuerda superior en la armadura A-1, y de 2.01 T y 2.68 T en la armadura A-2.

Una vez establecidas las cargas gravitacionales aplicadas sobre los nodos de las armaduras, se procede a realizar la simulación de los esfuerzos internos de las barras de las armaduras, implementando el software para diseño y cálculo estructural SAP2000 V21. En el Plano 11 se observan los esfuerzos internos de las armaduras generados por la aplicación de las cargas gravitacionales, presentando en color azul los esfuerzos a tensión y en color rojo los esfuerzos a compresión. Para el diseño estructural de los elementos estructurales de las armaduras, se han utilizado los valores de esfuerzos máximos resistentes a compresión y tensión de los muestreos EC1 y ET1, Tabla 71.

<b>Esfuerzos máximos resistentes del material compuesto, muestreos EC1 y ET1</b>	
<b>Esfuerzos de compresión (EC1-CF-n)</b>	<b>Esfuerzos de tensión (ET1-CF-n)</b>
<b>273.47 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,255.19 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla 71. Valores de esfuerzos máximos resistentes del material compuesto, muestreos EC1 y ET1.*

Debido a que el material compuesto posee mayor resistencia a esfuerzos de tensión que a compresión, el diseño geométrico y la conexión a los apoyos continuos de las armaduras se ha efectuado de manera que los esfuerzos internos con valores mayores de las barras sean a tensión, optimizando así las propiedades mecánicas del material compuesto para la obtención de secciones de bajo espesor y menor densidad.

Implementando los valores de los esfuerzos máximos resistentes del material compuesto, Tabla 71, se ha realizado el cálculo de las áreas en las secciones de cada barra en las armaduras, implementando el siguiente modelo matemático:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

- $\sigma$  = esfuerzo
- $P$  = carga aplicada
- $A$  = área

En las Tablas 72 y 73 se presenta el cálculo de las secciones de las barras de la armadura tipo A-1, en unidades de  $\text{cm}^2$ , Plano 12. En las Tablas 74 y 75 se presenta el cálculo de las secciones de las barras de la armadura tipo A-2, en unidades de  $\text{cm}^2$ , Plano 12.

Cálculo de área en sección - Armadura tipo A-1							
Cuerda superior				Cuerda inferior			
No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección ( $\text{cm}^2$ )	No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección ( $\text{cm}^2$ )
<b>S1</b>	19.95	19950	<b>15.8940</b>	<b>I1</b>	2.8	2800	<b>10.2388</b>
<b>S2</b>	8.49	8490	<b>6.7639</b>	<b>I2</b>	5.34	5340	<b>4.2543</b>
<b>S3</b>	0.065	65	<b>0.0518</b>	<b>I3</b>	16.23	16230	<b>12.9303</b>
<b>S4</b>	6.6	6600	<b>24.1343</b>	<b>I4</b>	24.55	24550	<b>19.5588</b>
<b>S5</b>	11.49	11490	<b>42.0156</b>	<b>I5</b>	31.06	31060	<b>24.7453</b>
<b>S6</b>	14.76	14760	<b>53.9730</b>	<b>I6</b>	35.82	35820	<b>28.5375</b>
<b>S7</b>	16.49	16490	<b>60.2991</b>	<b>I7</b>	38.97	38970	<b>31.0471</b>
<b>S8</b>	17.01	17010	<b>62.2006</b>	<b>I8</b>	40.59	40590	<b>32.3377</b>
<b>S9</b>	17.01	17010	<b>62.2006</b>	<b>I9</b>	40.59	40590	<b>32.3377</b>
<b>S10</b>	16.49	16490	<b>60.2991</b>	<b>I10</b>	38.97	38970	<b>31.0471</b>
<b>S11</b>	14.76	14760	<b>53.9730</b>	<b>I11</b>	35.82	35820	<b>28.5375</b>
<b>S12</b>	11.49	11490	<b>42.0156</b>	<b>I12</b>	31.06	31060	<b>24.7453</b>
<b>S13</b>	6.6	6600	<b>24.1343</b>	<b>I13</b>	24.55	24550	<b>19.5588</b>
<b>S14</b>	0.065	65	<b>0.0518</b>	<b>I14</b>	16.23	16230	<b>12.9303</b>
<b>S15</b>	8.49	8490	<b>6.7639</b>	<b>I15</b>	5.34	5340	<b>4.2543</b>
<b>S16</b>	19.95	19950	<b>15.8940</b>	<b>I16</b>	2.8	2800	<b>10.2388</b>

Tabla 72. Cálculo de áreas en secciones de barras de armadura tipo A-1, cuerda superior y cuerda inferior.

Cálculo de área en sección - Armadura tipo A-1							
Montantes				Diagonales			
No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección (cm <sup>2</sup> )	No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección (cm <sup>2</sup> )
M1	0.74	740	2.7060	D1	12.01	12010	9.5683
M2	8.5	8500	31.0820	D2	14.7	14700	11.7114
M3	10.25	10250	37.4813	D3	11.46	11460	9.1301
M4	8.33	8330	30.4604	D4	9.18	9180	7.3136
M5	6.69	6690	24.4634	D5	6.91	6910	5.5051
M6	5.07	5070	18.5395	D6	4.75	4750	3.7843
M7	3.5	3500	12.7985	D7	2.65	2650	2.1112
M8	2	2000	7.3134	D8	0.99	990	0.7887
M9	0.79	790	2.8888	D9	0.99	990	0.7887
M10	2	2000	7.3134	D10	2.65	2650	2.1112
M11	3.5	3500	12.7985	D11	4.75	4750	3.7843
M12	5.07	5070	18.5395	D12	6.91	6910	5.5051
M13	6.69	6690	24.4634	D13	9.18	9180	7.3136
M14	8.33	8330	30.4604	D14	11.46	11460	9.1301
M15	10.25	10250	37.4813	D15	14.7	14700	11.7114
M16	8.5	8500	31.0820	D16	12.01	12010	9.5683
M17	0.74	740	2.7060				

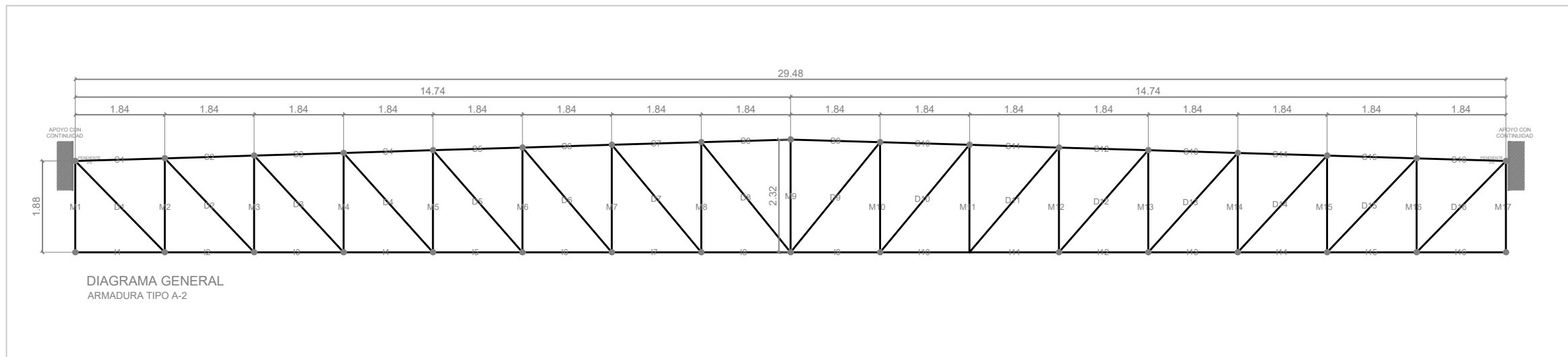
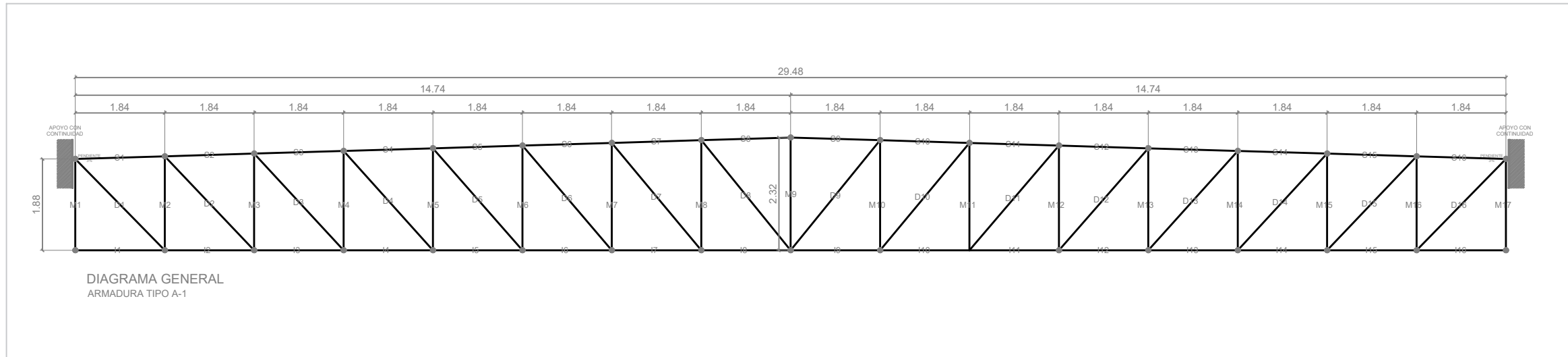
Tabla 73. Cálculo de áreas en secciones de barras de armadura tipo A-1, montantes y diagonales.

Cálculo de área en sección - Armadura tipo A-2							
Cuerda superior				Cuerda inferior			
No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección (cm <sup>2</sup> )	No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección (cm <sup>2</sup> )
S1	34.94	34940	27.8364	I1	4.9	4900	17.9179
S2	14.86	14860	11.8388	I2	9.36	9360	7.4570
S3	0.101	101	0.0805	I3	28.46	28460	22.6739
S4	11.57	11570	42.3081	I4	43.03	43030	34.2817
S5	20.14	20140	73.6461	I5	54.43	54430	43.3640
S6	25.86	25860	94.5625	I6	62.77	62770	50.0084
S7	28.89	28890	105.6423	I7	68.28	68280	54.3981
S8	29.8	29800	108.9699	I8	71.1	71100	56.6448
S9	29.8	29800	108.9699	I9	71.1	71100	56.6448
S10	28.89	28890	105.6423	I10	68.28	68280	54.3981
S11	25.86	25860	94.5625	I11	62.77	62770	50.0084
S12	20.14	20140	73.6461	I12	54.43	54430	43.3640
S13	11.57	11570	42.3081	I13	43.03	43030	34.2817
S14	0.101	101	0.0805	I14	28.46	28460	22.6739
S15	14.86	14860	11.8388	I15	9.36	9360	7.4570
S16	34.94	34940	27.8364	I16	4.9	4900	17.9179

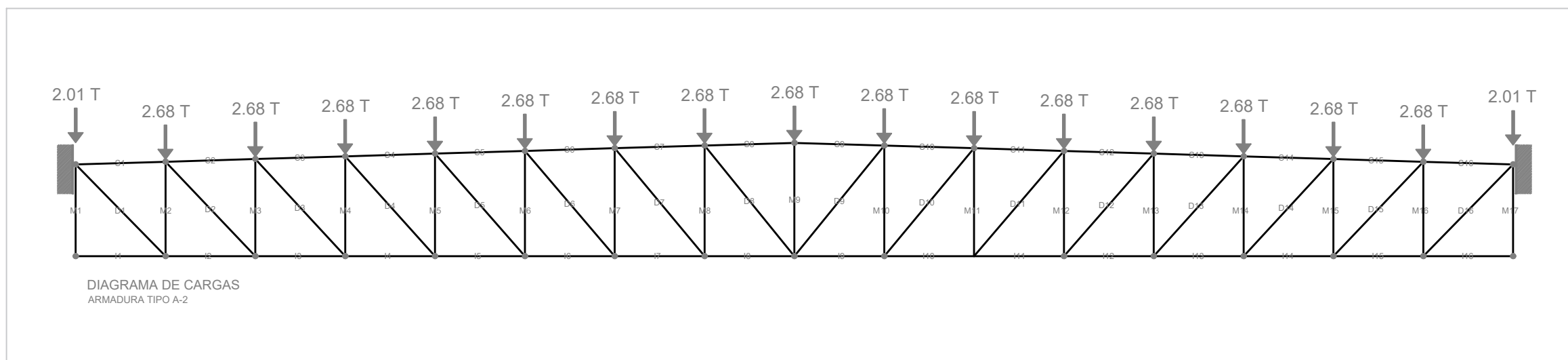
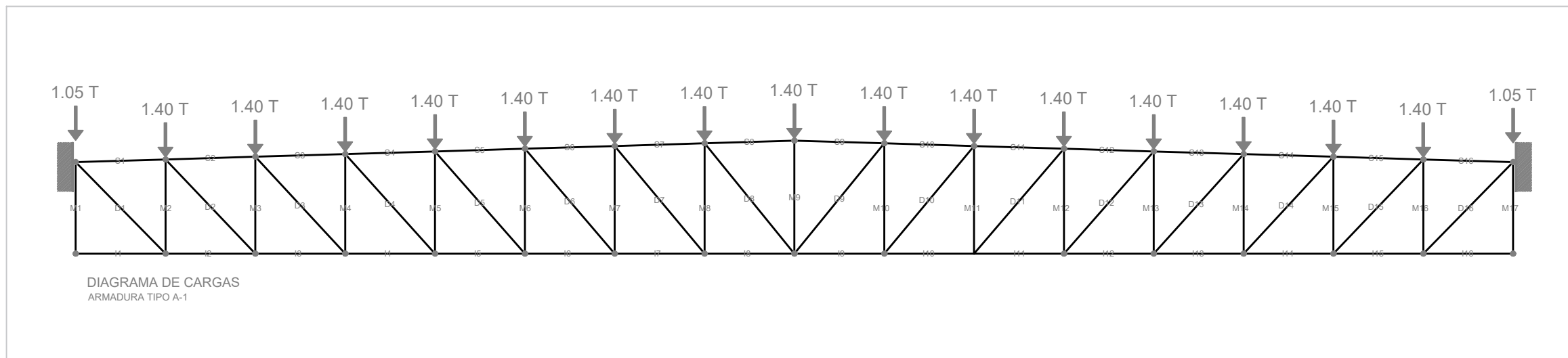
Tabla 74. Cálculo de áreas en secciones de barras de armadura tipo A-2, cuerda superior y cuerda inferior.

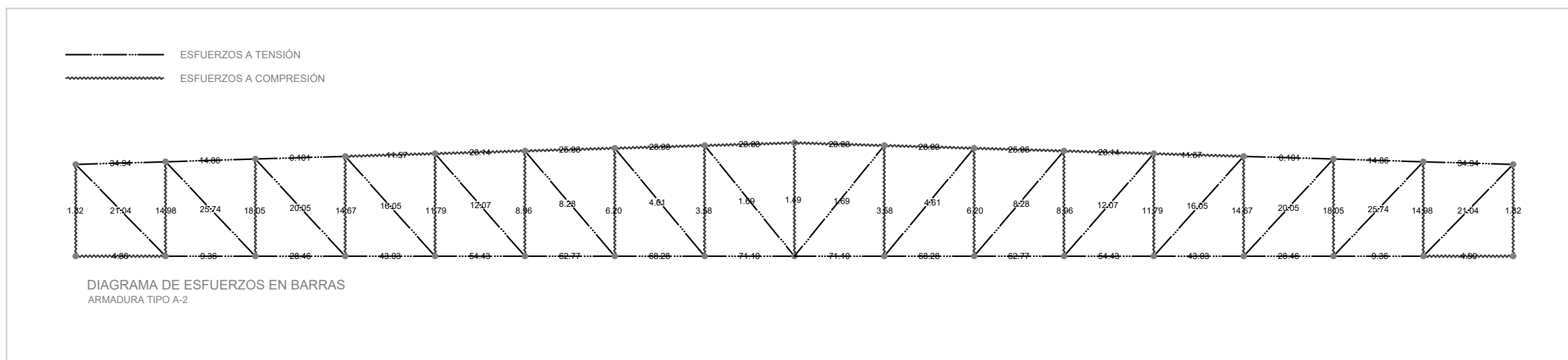
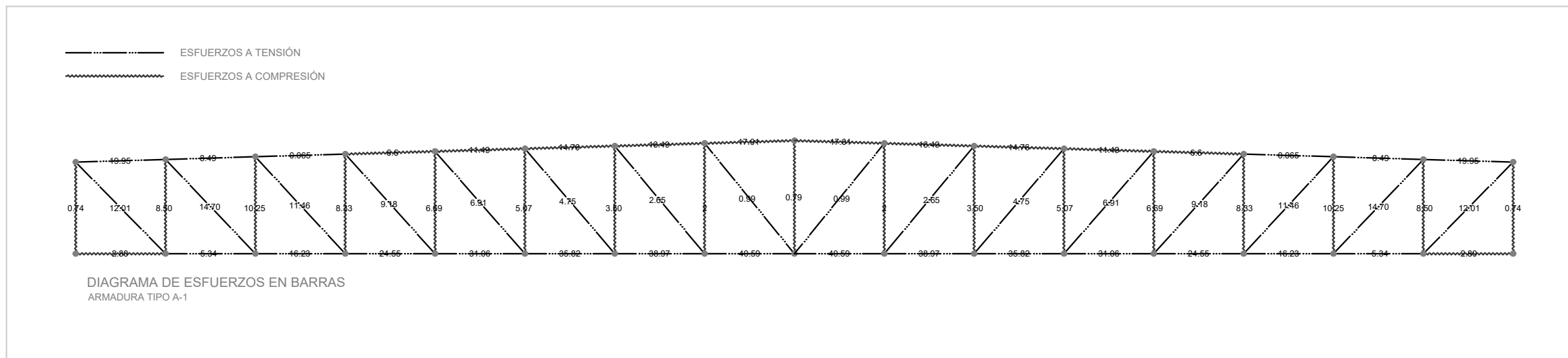
Cálculo de área en sección - Armadura tipo A-2							
Montantes				Diagonales			
No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección (cm <sup>2</sup> )	No. de barra	Carga (T)	Carga (kg)	Área de sección (cm <sup>2</sup> )
<b>M1</b>	1.32	1320	<b>4.8269</b>	<b>D1</b>	21.04	21040	<b>16.7624</b>
<b>M2</b>	14.98	14980	<b>54.7775</b>	<b>D2</b>	25.74	25740	<b>20.5069</b>
<b>M3</b>	18.05	18050	<b>66.0036</b>	<b>D3</b>	20.05	20050	<b>15.9737</b>
<b>M4</b>	14.67	14670	<b>53.6439</b>	<b>D4</b>	16.05	16050	<b>12.7869</b>
<b>M5</b>	11.79	11790	<b>43.1126</b>	<b>D5</b>	12.07	12070	<b>9.6161</b>
<b>M6</b>	8.96	8960	<b>32.7641</b>	<b>D6</b>	8.28	8280	<b>6.5966</b>
<b>M7</b>	6.2	6200	<b>22.6716</b>	<b>D7</b>	4.61	4610	<b>3.6728</b>
<b>M8</b>	3.58	3580	<b>13.0910</b>	<b>D8</b>	1.69	1690	<b>1.3464</b>
<b>M9</b>	1.49	1490	<b>5.4485</b>	<b>D9</b>	1.69	1690	<b>1.3464</b>
<b>M10</b>	3.58	3580	<b>13.0910</b>	<b>D10</b>	4.61	4610	<b>3.6728</b>
<b>M11</b>	6.2	6200	<b>22.6716</b>	<b>D11</b>	8.28	8280	<b>6.5966</b>
<b>M12</b>	8.96	8960	<b>32.7641</b>	<b>D12</b>	12.07	12070	<b>9.6161</b>
<b>M13</b>	11.79	11790	<b>43.1126</b>	<b>D13</b>	16.05	16050	<b>12.7869</b>
<b>M14</b>	14.67	14670	<b>53.6439</b>	<b>D14</b>	20.05	20050	<b>15.9737</b>
<b>M15</b>	18.05	18050	<b>66.0036</b>	<b>D15</b>	25.74	25740	<b>20.5069</b>
<b>M16</b>	14.98	14980	<b>54.7775</b>	<b>D16</b>	21.04	21040	<b>16.7624</b>
<b>M17</b>	1.32	1320	<b>4.8269</b>				

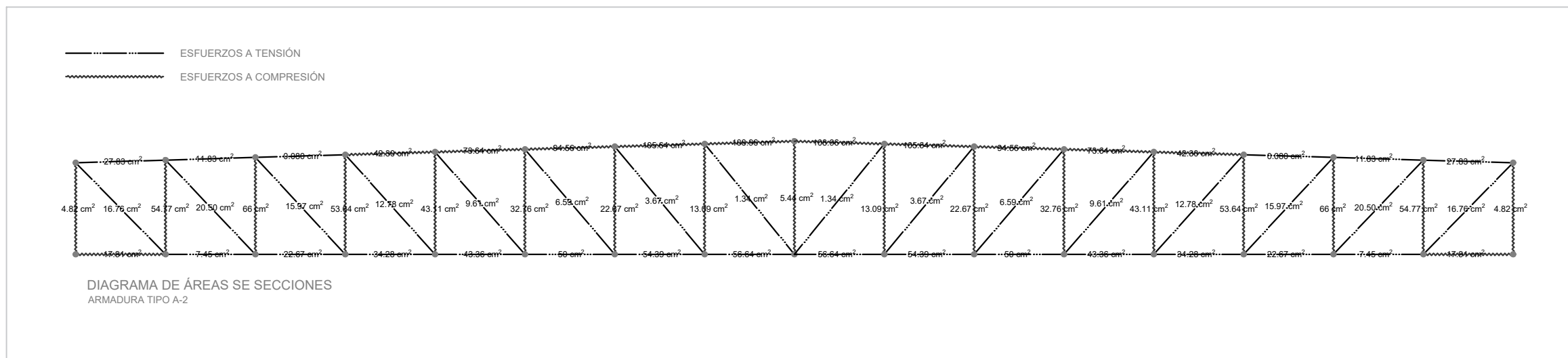
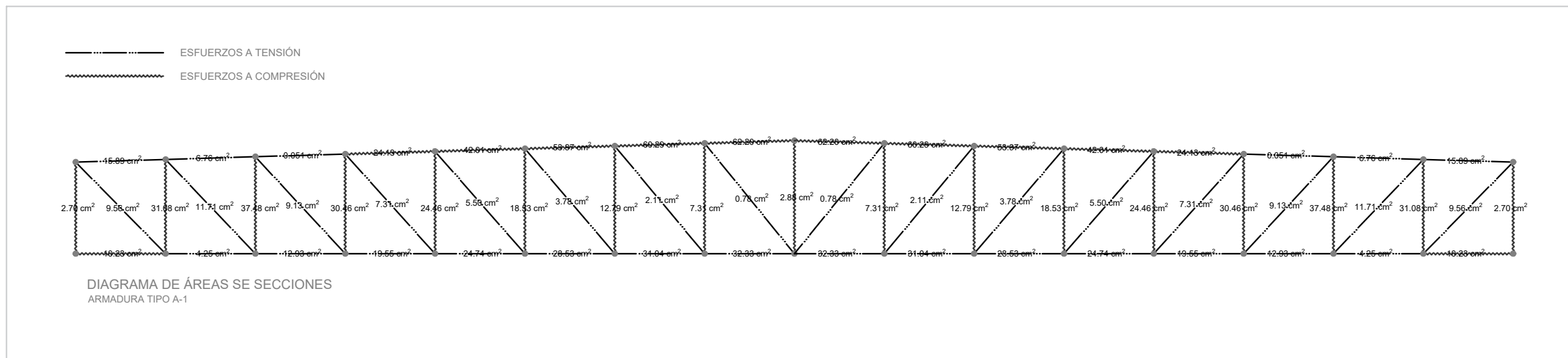
Tabla 75. Cálculo de áreas en secciones de barras de armadura tipo A-2, montantes y diagonales.











- BARRA Ø exterior de 12 cm (63 cm<sup>2</sup>, 7 capas de material compuesto)
- BARRA Ø exterior de 10 cm (38 cm<sup>2</sup>, 5 capas de material compuesto)
- BARRA Ø exterior de 8 cm (13 cm<sup>2</sup>, 2 capas de material compuesto)

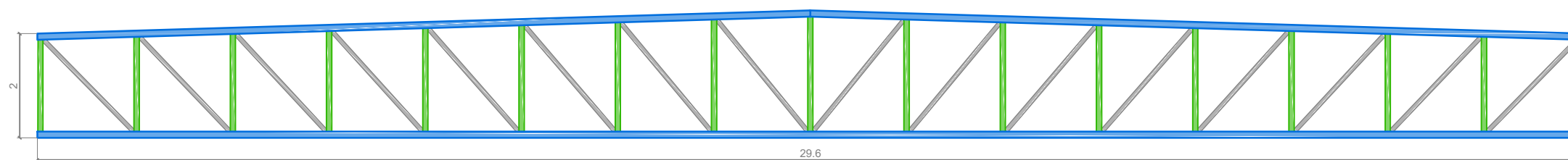


DIAGRAMA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE SECCIONES  
ARMADURA TIPO A-1

- BARRA Ø exterior de 15 cm (110 cm<sup>2</sup>, 10 capas de material compuesto)
- BARRA Ø exterior de 12 cm (70 cm<sup>2</sup>, 8 capas de material compuesto)
- BARRA Ø exterior de 10 cm (24 cm<sup>2</sup>, 3 capas de material compuesto)

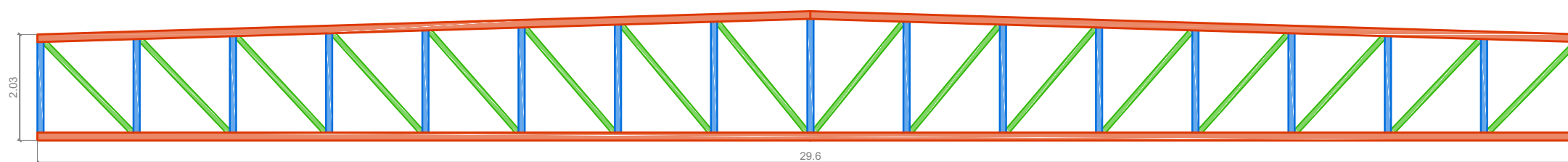


DIAGRAMA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE SECCIONES  
ARMADURA TIPO A-2

Posteriormente, al haber obtenido las áreas de las secciones de cada elemento estructural, se proceden a diseñar las dimensiones de las barras de las armaduras. Se ha seleccionado la geometría tubular cilíndrica para la conformación de los elementos estructurales, con base en el tipo de especímenes de prueba del proyecto de investigación. Para el diseño estructural de las armaduras se determinó estandarizar las dimensiones de las barras, con el objetivo de simplificar los procesos de manufactura y la disminución de costos, obteniendo tres tipos de barras para cada armadura, Tabla 76. En el Plano 13 se muestran los alzados de las armaduras con el diseño estructural de las secciones, dando por resultado una sección con mayores espesores en la armadura tipo A-2, debido a la aplicación de cargas más elevadas.

<b>Dimensiones de secciones de barras en armaduras de gimnasio para artes marciales</b>			
<b>Armadura tipo A-1</b>		<b>Armadura tipo A-2</b>	
<b>Cuerda superior y cuerda inferior</b>	Barra $\emptyset$ exterior de 12 cm (63 cm <sup>2</sup> , 7 capas de material compuesto)	<b>Cuerda superior y cuerda inferior</b>	Barra $\emptyset$ exterior de 15 cm (110 cm <sup>2</sup> , 10 capas de material compuesto)
<b>Montantes</b>	Barra $\emptyset$ exterior de 10 cm (38 cm <sup>2</sup> , 5 capas de material compuesto)	<b>Montantes</b>	Barra $\emptyset$ exterior de 12 cm (70 cm <sup>2</sup> , 8 capas de material compuesto)
<b>Diagonales</b>	Barra $\emptyset$ exterior de 8 cm (13 cm <sup>2</sup> , 2 capas de material compuesto)	<b>Diagonales</b>	Barra $\emptyset$ exterior de 10 cm (24 cm <sup>2</sup> , 3 capas de material compuesto)

*Tabla 76. Dimensiones de secciones de barras en armaduras de gimnasio para artes marciales.*

## Análisis de resultados

Por medio de la simulación de las cargas aplicadas y el cálculo de los esfuerzos internos de las armaduras del caso de estudio, se han podido determinar las áreas de las secciones de los elementos estructurales (barras). Se observa que los esfuerzos internos son mayores en las cuerdas superiores e inferiores, superando las 70 T en la armadura A-2 y las 40 T en la armadura A-1; y con los valores menores de esfuerzo en las diagonales de las armaduras. Debido a que los valores de resistencia del material compuesto son 4.5 veces mayores a esfuerzos de tensión que a esfuerzos de compresión, el diseño geométrico de las barras componentes y la conexión a los apoyos se realizó de manera que las barras con mayores valores de esfuerzo trabajasen a tensión, optimizando las propiedades mecánicas del material al generar secciones con menores espesores y mayor ligereza. Así mismo, al efectuar el diseño estructural, se procedió a homogeneizar las medidas de las barras componentes, permitiendo la estandarización de los elementos significando un ahorro en los tiempos de manufactura y de maquinaria. En el diseño estructural del caso de estudio, se realizó la estandarización de los elementos estructurales entre los dos tipos de armaduras a cuatro diámetros externos, para simplificar las conexiones en los nodos, variando el número de capas internas del material compuesto necesario para resistir los esfuerzos máximos.

En comparación a los materiales tradicionales utilizados en la elaboración de armaduras, como el acero, las dimensiones de las secciones para los elementos a compresión equivalen al 18% en área frente al material compuesto, pero con un incremento del 30% en el peso. En los elementos que trabajan a tensión el acero equivale al 84% en área, con un incremento del 500% en peso, Tabla 77.

<b>Comparativa de materiales para elementos estructurales en armadura A-2</b>						
<b>Esfuerzos a compresión</b>						
<b>Material</b>	<b>Carga en Barra S8</b>	<b>Esfuerzo máximo resistente a compresión del material</b>	<b>Área de diseño en sección</b>	<b>Densidad del material</b>	<b>Volumen de la barra S8</b>	<b>Peso total de la barra S8 (longitud de 184 cm)</b>
Acero	29,800 kg	1,520 kg/cm <sup>2</sup>	19.60 cm <sup>2</sup>	0.00785 kg/cm <sup>3</sup>	3,606.40 cm <sup>3</sup>	28.31 kg

<b>Material compuesto a base de cartón y fibras de carbono</b>	29,800 kg	273.47 kg/cm <sup>2</sup>	108.96 cm <sup>2</sup>	0.00106 kg/cm <sup>3</sup>	20,048.64 cm <sup>3</sup>	21.25 kg
<b>Esfuerzos a tensión</b>						
<b>Material</b>	<b>Carga en Barra I8</b>	<b>Esfuerzo máximo resistente a compresión del material</b>	<b>Área de diseño en sección</b>	<b>Densidad del material</b>	<b>Volumen de la barra I8</b>	<b>Peso total de la barra I8 (longitud de 184 cm)</b>
<b>Acero</b>	71,100 kg	1,520 kg/cm <sup>2</sup>	46.77 cm <sup>2</sup>	0.00785 kg/cm <sup>3</sup>	8,605.68 cm <sup>3</sup>	67.55 kg
<b>Material compuesto a base de cartón y fibras de carbono</b>	71,100 kg	1,255.19 kg/cm <sup>2</sup>	56.64 cm <sup>2</sup>	0.00106 kg/cm <sup>3</sup>	10,421.76 cm <sup>3</sup>	11.04 kg

Tabla 77. Comparativa de materiales para elementos estructurales en armadura A-2.

## Capítulo IX: Conclusiones

Por medio del estudio de la Literatura se establecieron las características de composición química, microestructura y procesamiento que determinan las propiedades mecánicas de las fases constituyentes del material compuesto (fase matriz de cartón, fase de refuerzo de fibras de carbono, resina epóxica como agente aglomerante en interfaces). Se seleccionaron como constantes de experimentación el tipo de cartón sólido no blanqueado (SUS – Kraft), una resina epóxica y el tejido de fibras de carbono 12K Twill, debido a las propiedades mecánicas de resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, y a su compatibilidad de adherencia en la zona de interface.

Se seleccionó al cartón sólido no blanqueado (SUS – Kraft) por su constitución a base de pulpa derivada de procesos químicos, caracterizada por poseer mayor grado de pureza, mayor entrelazamiento de las fibras de celulosa y mayor resistencia a esfuerzos mecánicos; el proceso químico Kraft del que se deriva este tipo de cartón es el más utilizado mundialmente, con la ventaja de ser un proceso que contempla la reutilización de sus agentes químicos; no posee aditivos o recubrimientos que puedan interferir con la manufactura y el comportamiento mecánico del material compuesto; su facilidad de adquisición en el mercado, al ser uno de los tipos de cartón más utilizados en la vida cotidiana.

Se optó por un tejido de fibras de carbono de alta resistencia, cuyo precursor es el Poliacrilonitrilo (PAN), marca Quintum, modelo 12K Twill, con base en la buena relación costo – beneficio que posee en comparación a otros tipos de tejidos y fibras de carbono; la presentación de las fibras de carbono en forma de tejido cruzado (tejido asargado – twill) facilita su manipulación para ser incorporadas sobre la fase matriz de cartón, ahorrando tiempo y costos en el proceso de manufactura. ´

Para efectuar la unión de las fases matriz y de refuerzo en el material compuesto, se determinó necesario la incorporación de un agente aglomerante, para la creación de adherencia en la zona de interface. Se seleccionaron dos resinas epóxicas, especiales para uso en fibras de carbono (resina epóxica Quintum Q2, resina epoxi Resineco FV). Se consideró que con el uso de las resinas epóxicas se genera una buena interrelación con las fibras de celulosa del cartón, pudiéndose suscitar enlaces químicos entre los grupos hidróxido de la resina y la celulosa, dando por resultado una unión eficiente entre ambos materiales.

Con base en la selección de las fases componentes, se desarrolló un material compuesto con una fase matriz de cartón SUS - Kraft reforzada con un tejido de fibras de carbono 12K Twill, con una densidad



de 1,060 - 1,200 kg/m<sup>3</sup> (media de 1,130 kg/m<sup>3</sup>). Lo que equivale al 14% en peso de la densidad media del acero (7,860 kg/m<sup>3</sup>), al 47% en peso de la densidad media del concreto (2,400 kg/m<sup>3</sup>) y al 250% de la densidad media de la madera de especies coníferas (450 kg/m<sup>3</sup>).

Industrialmente, la manufactura de elementos estructurales del material compuesto se propone por el método de pultrusión; que consiste en un proceso automatizado continuo para la elaboración de perfiles reforzados con fibras continuas. Para el proyecto de investigación, se implementó el método de manufactura por Contacto (Hand Lay up – estratificación manual), técnica implementada para la fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable, de manera que los especímenes de prueba del material compuesto fueron elaborados de manera artesanal sin instrumentos especializados a temperatura ambiente.

En el proceso de experimentación, se determinaron tres variables experimentales para el ensayo del material compuesto, siendo: Variable 1 – Matriz aislada de cartón SUS – Kraft, Variable 2 – Matriz de cartón SUS – Kraft con recubrimiento de resina epóxica, Variable 3 (material compuesto de proyecto de investigación) – Matriz de cartón SUS – Kraft con fase de refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill.

Se elaboraron los ensayos mecánicos de resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, de las tres variables mencionadas; efectuados en cuatro muestreos con la siguiente nomenclatura: EC1 (ensayo de compresión 1), EC2 (ensayo de compresión 2), ET1 (ensayo de tensión 1), ET2 (ensayo de tensión). La elaboración y ensayo de especímenes de prueba EC1 y ET1 se realizó en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales (LMSE) de la Facultad de Arquitectura, UNAM, México. La elaboración y ensayo de especímenes de prueba EC2 y ET2 se realizó en el Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM) de la Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Para la obtención de las propiedades mecánicas de los especímenes de prueba de las tres variables de experimentación, se implementó el método de análisis estadístico de regresión polinomial, por medio de los softwares de procesamiento de datos Excel y Past, utilizando los valores de esfuerzo y deformación de los ensayos realizados a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión.

El comportamiento mecánico a esfuerzos de compresión de los especímenes de cartón (Variable 1 – EC-CA) fue predominantemente de tipo dúctil, ya que la deformación elástica de estos elementos fue breve en comparación con su deformación plástica (deformación plástica prolongada sin fractura); fenómeno producido por el reajuste constante del entramado de fibras de celulosa a nivel de microestructura. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, propiciadas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), ejemplificándose por el aplastamiento de las superficies de contacto y el plegado diagonal en las zonas de unión multicapa. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo EC1-CA se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 92.46 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 6,031.50 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo EC2-CA se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 82.61 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 2,332.40 kg/cm<sup>2</sup>. Se observó que los especímenes del muestreo EC1-CA obtuvieron valores de resistencia mayores con deformaciones menores en comparación a los especímenes del muestreo EC2-CA; comportamiento determinado por un mayor grado de compactación de las fibras de celulosa en los especímenes del muestreo EC1-CA, lo que se ejemplifica por un gramaje y densidad mayores.

El comportamiento mecánico a esfuerzos de compresión de los especímenes de cartón con resina epóxica (Variable 2 – EC-CR) fue de tipo semirrígido y dúctil. La incorporación de la resina epóxica como agente protector de recubrimiento aumentó la rigidez y resistencia de la fase de cartón, produciendo inicialmente fallas de tipo frágil en ciertas áreas de los especímenes de prueba. Una vez fracturadas las capas exteriores con recubrimiento de resina epóxica, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. En comparación a los especímenes tipo EC-CA de la Variable 1, se observó una disminución de la susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal, debido que el recubrimiento de resina epóxica aumentó la rigidez de las capas externas y, relleno las aristas de unión, conformando un elemento geométrico con mayor uniformidad. El aumento de la rigidez de los especímenes, produjo una transmisión de los esfuerzos más eficiente, lo que resultó en la disminución de la deformación del elemento y del efecto de áreas de sobrecarga por careo insuficiente y, la reducción del aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial. En los especímenes del muestreo EC1-CR se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 139.96 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 51% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 10,958.00 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo EC2-CR se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 99.24 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 20% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 3,995.50 kg/cm<sup>2</sup>.

En el ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes del material compuesto a base de una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill (Variable 3 – EC-CF) se determinó que

la unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de compresión, elevando los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes; en comparación a las Variables 1 y 2. Se observó que la capa de fibras de carbono, en forma de tejido, sobre la matriz de cartón, actúa como cinturón de contención, restringiendo la deformación por aplastamiento continuo del elemento, lo que logra mantener la distribución de los esfuerzos de manera uniforme a lo largo del eje axial. De igual modo, se observó que la fase matriz de cartón, determina ampliamente el tipo de falla del elemento; cuando la fase matriz de cartón cede por aplastamiento continuo, la capa de tejido de fibras de carbono comienza a desprenderse de esta y a fracturarse desde las superficies de apoyo, al no poder asimilar la deformación plástica del cartón y al obstaculizarse con el resto del tejido a lo largo del eje axial. El comportamiento mecánico y la falla de los especímenes EC-CF fue de tipo frágil, al presentar deformaciones relativamente bajas, siendo ligeramente perceptibles a la vista en el caso del muestreo EC1-CF. Cabe destacar que, el incremento de la rigidez del material estuvo ampliamente condicionado por el aumento del espesor de pared de los especímenes; lo que a su vez disminuyó las fallas de plegado continuo por devanado multicapa helicoidal, observadas en las Variables 1 y 2. En los especímenes del muestreo EC1-CF se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 273.47 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 196% en relación con la Variable 1 y del 95% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 29,532.00 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo EC2-CF se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 341.67 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 314% en relación con la Variable 1 y del 244% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 25,036.00 kg/cm<sup>2</sup>.

Analizando las tres variables conjuntamente, se observa que por medio de la incorporación de aditamentos como la fase de refuerzo de fibras de carbono y de recubrimientos como la resina epóxica, a la matriz de cartón, se genera un material compuesto con mayores prestaciones a esfuerzos de compresión (aumento de resistencia a la compresión), convirtiendo las propiedades de dúctiles del material matriz a frágiles por el aumento de la rigidez.

El comportamiento mecánico a esfuerzos de tensión de los especímenes de cartón (Variable 1 – ET-CA) fue de tipo dúctil, al presentar una breve deformación elástica en comparación con una amplia deformación plástica. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, predispuestas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), observándose por medio del efecto prolongado de delaminación multicapa, aludiendo a una adherencia entre capas relativamente baja. En las fallas por rotura que fueron propiciadas por el devanado multicapa helicoidal, las fibras de

celulosa se separaron entre sí, en distintos niveles del multicapa, debido a una relativamente baja resistencia de adherencia entre capas del cartón. Se prevé que este efecto podría ser disminuido al manufacturar el cartón en una sola capa del mismo espesor, de manera que el material se comportase como un sólido entero. A nivel de microestructura, durante el ensayo a esfuerzos de tensión, no se produce el efecto de reacomodo repetitivo de las fibras de celulosa (como se observó en el ensayo a esfuerzos de compresión); en cambio, las fibras son tensadas en la dirección axial del eje del espécimen hasta la rotura de los enlaces y los entrelazamientos de las redes del cartón, y la delaminación entre capas. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo ET1-CA se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 117.20 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 14,303.00 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo ET2-CA se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 143.45 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 488.35 kg/cm<sup>2</sup>.

El comportamiento mecánico a esfuerzos de tensión de los especímenes de cartón con resina epóxica (Variable 2 – ET-CR) fue de tipo semirrígido y dúctil. La aplicación de la resina epóxica en las capas exteriores como agente protector, permitió la conformación de un material con mayor uniformidad en su superficie al rellenar las aristas de unión del devanado multicapa helicoidal, efecto que influyó en la obtención de valores de resistencia mayores. Al inicio del ensayo de los especímenes de la Variable 2, estos se mostraron con un comportamiento semirrígido, al estar restringidas las fibras de celulosa de la capa externa por la resina epóxica (de manera similar a la madera natural con las fibras de celulosa contenidas en la lignina); una vez fracturada la capa externa, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. Cabe mencionar que, con la aplicación de una mayor cantidad de resina en la fase de cartón, así como la uniformidad de esta en el elemento, se obtendrán valores de resistencia a esfuerzos de tensión más elevados y una mayor rigidez del material. En los especímenes del muestreo ET1-CR se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 147.52 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 26% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 4,382.90 kg/cm<sup>2</sup>; en los especímenes del muestreo ET2-CR se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 216.91 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 51% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 544.69 kg/cm<sup>2</sup>.

En el ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes del material compuesto a base de una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill (Variable 3 – ET-CF), la unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de tensión, elevando exponencialmente los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes; la función del tejido de fibras de carbono como cinturón de contención (encamisado) para la fase matriz de cartón. Se observó que el comportamiento de los especímenes fue ampliamente condicionado por la fase matriz,

que funge como base de incrustación para la fase de refuerzo. Es importante mencionar que, se presentó el comportamiento mecánico característico de los materiales compuestos, en el que ambas fases de materiales trabajan de manera conjunta para transmitir y resistir los esfuerzos de tensión, hasta que la fase matriz (cartón) supera su umbral de resistencia máxima y cede a la rotura; posteriormente, las fibras de carbono comienzan a resistir toda la magnitud de la carga aplicada hasta alcanzar su resistencia máxima como material en forma de tejido tipo Twill. En los especímenes ET-CF, el comportamiento mecánico y las fallas fueron de tipo semirrígido y dúctil. Como se observó en el ensayo de los especímenes de la Variable 2, la resina epóxica genera un aumento en la rigidez del material, proporcional a su cantidad en masa; más al ejercer un aumento de presión, la resina no tolera los umbrales de deformación de la fase matriz de cartón y la fase de refuerzos de fibras de carbono, por lo que, la resina al presentar microfracturas, el comportamiento del material compuesto se torna dúctil al mostrar una amplia deformación plástica. De igual modo, en la conformación del material compuesto se genera un espesor de pared mayor dando por resultado mayor rigidez en los especímenes de prueba, efecto que disminuyó casi completamente la rotura por el devanado multicapa helicoidal. En los especímenes del muestreo ET1-CF se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de  $1,255.19 \text{ kg/cm}^2$  (incremento del 970% en relación con la Variable 1 y del 751% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de  $12,610 \text{ kg/cm}^2$ ; en los especímenes del muestreo ET2-CF se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de  $1,010.36 \text{ kg/cm}^2$  (incremento del 604% en relación con la Variable 1 y del 366% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de  $25,921.00 \text{ kg/cm}^2$ .

En la definición de las propiedades mecánicas del material compuesto se estableció que el comportamiento mecánico del material compuesto a esfuerzos de compresión es notablemente distinto a esfuerzos de tensión; factor determinado por las características de microestructura de los materiales fibrosos. En los materiales fibrosos, al aplicar una carga a tensión, las redes de fibras son gradualmente estiradas alineando las fibras para soportar el esfuerzo hasta que las fibras presenten la rotura; a compresión, las redes de fibras colapsan por pandeo y doblado, manteniendo la resistencia mecánica del material sin efectos de rotura.

En ambos ensayos se presencié una leve susceptibilidad del devanado multicapa helicoidal de la fase matriz de cartón que propicia las fallas en las aristas diagonales de unión. Se hace énfasis de la importancia de una correcta adherencia de ambas fases componentes en la zona de interface; puesto que

una adherencia insuficiente entre las fases, genera una distribución no uniforme de los esfuerzos y puntos de sobrecarga, disminuyendo la resistencia mecánica del material compuesto.

A partir del análisis estadístico del material compuesto, se determinó que en los muestreos EC1 y ET1 el esfuerzo máximo resistente es 4.5 veces mayor a esfuerzos de tensión que a esfuerzos de compresión; mientras que el módulo de elasticidad es un 134% más elevado a esfuerzos de compresión. En los muestreos EC2 y ET2 el esfuerzo máximo resistente del material es casi 3 veces mayor a esfuerzos de tensión que a esfuerzos de compresión; el módulo de elasticidad obtenido de ambos ensayos es aproximadamente el mismo, con un C.V. del 2.45%.

En el ámbito constructivo - estructural de la Arquitectura, se observa que la resistencia a esfuerzos de compresión del material compuesto es de un 128 – 185% mayor que la madera; a esfuerzos de tensión la resistencia del material compuesto es de 9 a 11 veces mayor que la madera. La densidad del material compuesto es de 2 a 3 veces mayor que la madera de especies coníferas y 6 veces menor a la del acero estructural A36 ( $7,860 \text{ kg/m}^3$ ). En relación con el módulo de elasticidad, para efectos de diseño en la madera se considera un valor promedio de  $100,000 \text{ kg/cm}^2$ , significando una mayor rigidez que el material compuesto. A compresión, se observa que la resistencia del material compuesto es relativamente mayor a la resistencia de la madera de pino (especies coníferas). A diferencia del cartón en el material compuesto, la madera posee una microestructura sin porosidades, ya que las fibras de celulosa se encuentran contenidas en una matriz de ligninas y celulosas, factor que determina una mayor rigidez y menor deformación. En el material compuesto, las fibras de celulosa del cartón (fase matriz), que funge como cuerpo del material, se compactan gradualmente hasta presentar la falla dúctil por el efecto de plegado; debido a esto su deformación es más prolongada. A tensión, se determinó una diferencia sustancial en los valores de esfuerzo máximo resistente del material compuesto frente a la madera de pino con una deformación elástica similar. Cabe destacar que, en la madera de pino al ocurrir la rotura, los valores de esfuerzo y deformación descienden súbitamente, ya que las fibras de celulosa embebidas en la matriz de lignina y hemicelulosas son separadas íntegramente; mientras que, en la rotura del material compuesto, las fibras de carbono se quiebran gradualmente, dando lugar a una falla de tipo dúctil.

Como pruebas secundarias de las tres variables de experimentación, se realizó el ensayo de envejecimiento ante la intemperie (nomenclatura I) y el ensayo de absorción de humedad (H). En el ensayo envejecimiento ante efectos de intemperismo, se presentó una disminución del peso de los

especímenes en las tres variables, aproximadamente del 10% del peso original; suceso debido a la pérdida de contenido de humedad. Los especímenes sufrieron una ligera deformación de tipo flexión sobre el eje axial, por los cambios de temperatura y humedad durante el ciclo de prueba. Se identificaron cambios de color en las tres variables de los especímenes de prueba, presentándose de manera general los tonos amarillos, y en el caso de las muestras I-CF (material compuesto), un opacamiento de la resina epoxi; fenómeno presente en las probetas poseedoras de resina epoxi debido a la descomposición de las cadenas moleculares, característico de los polímeros termofijos. Se observó que la superficie convexa de los especímenes de prueba fue más susceptible a los efectos de radiación solar, mientras que la superficie cóncava fue más susceptible a los efectos de humedad. De manera cualitativa no se prevé un cambio notable de las propiedades mecánicas de los materiales puestos a prueba por los efectos de intemperización realizados en la cámara de intemperismo. Se recomienda abrir una línea de investigación, para realizar una serie de ensayos compuestos “intemperismo – propiedades mecánicas”, para poder determinar numéricamente si existe un cambio en la resistencia del material ante dichos efectos, lo cual pudiese pronosticar el comportamiento mecánico del material compuesto en ambientes exteriores.

En el ensayo de absorción de humedad, se determinó que los especímenes de cartón (Variable 1 – H-CA) conservan un contenido medio de humedad inicial del 2.96%; los especímenes de cartón con resina epóxica (Variable 2 – H-CR) poseen un contenido medio de humedad inicial del 2.58%; y los especímenes del material compuesto (Variable 3 – H-CF) un contenido medio de humedad inicial del 1.09%. Tras el ensayo, se percibe que los especímenes de la Variable 1 compuestos por un cartón (material fibroso), poseen un elevado grado de absorción de humedad, debido a la elevada porosidad y permeabilidad del; presentando un incremento de porcentaje en peso de 143.88%; los especímenes de la Variable 2 incrementaron una media de 7.66%; y los especímenes de la Variable H-CF-n una media de 3.35%. Analizando los resultados, se determina que la adición de recubrimientos sobre la matriz de cartón disminuye proporcionalmente la permeabilidad del material, permitiendo un menor grado de absorción de humedad; factor que minimiza la alteración de las propiedades mecánicas de la matriz, ya que el cartón es vulnerable a la presencia de humedad por el rompimiento de los enlaces iónicos tipo -OH. En apariencia, el ensayo de absorción no generó cambios notables en el color, más que el obscurecimiento de los especímenes H-CA-n por la presencia de agua.

Con relación al diseño estructural de elementos y sistemas estructurales en la Arquitectura, se destaca la importancia de las propiedades mecánicas del material compuesto, debido a la notable diferencia en la resistencia del material a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión. Cabe destacar que, en sistemas

estructurales como armaduras y estructuras espaciales, el diseño estructural de las barras componentes debe promover principalmente la aplicación de las cargas más elevadas a los elementos que trabajen a esfuerzos de tensión, con el fin de optimizar las propiedades mecánicas y físicas del material para la obtención de secciones con mayor esbeltez y ligereza. Para la manufactura de los elementos estructurales conformados por el material compuesto a base de cartón y fibras de carbono, se recomienda la homogeneización de las dimensiones exteriores de los elementos, permitiendo la estandarización de los elementos significando un ahorro en los tiempos de manufactura y de maquinaria.

En comparación al acero, en el diseño estructural de armaduras de gran claro, a esfuerzos de compresión se observa una diferencia notable en las dimensiones de las secciones, siendo la del acero un 18% en área frente a la del material compuesto, habiendo un incremento del 30% en peso. En los elementos que trabajan a esfuerzos de tensión, el acero equivale al 84% en área, pero con un incremento del 500% en peso. Por lo tanto se concluye que principalmente a esfuerzos de tensión, el material compuesto a base de cartón y fibras de carbono funge como una alternativa viable para la sustitución de materiales tradicionales como el acero en elementos de sistemas estructurales ligeros de gran claro, como son las armaduras y estructuras espaciales; cuya reducción del peso total de la estructura significa una amplia reducción en el costo de la cimentación y elementos estructurales, además de facilidad de maniobrabilidad en el proceso de construcción.

Por último, cabe mencionar que el desarrollo de un material aplicable en elementos estructurales para la industria de la Construcción conlleva el cálculo, ensayo y análisis de múltiples variables que pueden influir en un entorno práctico. Debido a esto, se destaca la importancia de la realización continua de proyectos de investigación para el mejoramiento y la evolución de los materiales y sistemas estructurales en la Arquitectura.

El presente proyecto de investigación contempló el desarrollo de un material compuesto a base de una matriz de cartón y un refuerzos de tejido de fibras de carbono, con el objetivo principal de la optimización de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión de las fases componentes, para su aplicación en estructuras ligeras que requieran la conformación de grandes claros; además, fueron realizadas las pruebas de envejecimiento ante la intemperie y absorción de humedad para conocer el comportamiento del material compuesto ante factores que pueden presentarse en una aplicación práctica de la Arquitectura. Más, se hace mención del desarrollo de posibles líneas de investigación complementarias que acrentar el conocimiento del comportamiento del material compuesto en su



aplicación en el campo de la Arquitectura, como propiedades mecánicas a esfuerzos de flexión, flexo-compresión, torsión y cortante, propiedades eléctricas y térmicas, propiedades ópticas y deteriorativas, etcétera. De igual manera, se hace énfasis en la elaboración de líneas de investigación paralelas que modifiquen o sustituyan la microestructura, composición y/o procesamiento del material compuesto del proyecto de investigación, como podría ser la alineación de las fibras de refuerzo sobre la matriz, la proporción de fase matriz – fase de refuerzo, el tipo de resina como agente aglomerante, entre otras; teniendo como meta principal el desarrollo y aplicación de materiales y sistemas estructurales más eficientes en la Arquitectura.

## Glosario

- **Cartón:** Material conformado por un conjunto de capas comprimidas, compuestas por redes de fibras de celulosa entrelazadas, con un gramaje total superior a los 200 g/m<sup>2</sup>.
- **Celulosa:** Biopolímero compuesto por moléculas de glucosa, rígido, insoluble en agua, que contiene desde cientos hasta miles de unidades de β-glucosa.
- **Estructura espacial:** Estructura extendida del mismo espacio, donde las fuerzas se propagan en el vacío, con lo que se logran campos de fuerza homogéneos y sin puntos de sobrecarga grandes, lo que provoca que las secciones de los elementos (trabajando a esfuerzos de tensión y compresión), disminuyan traduciéndose en una disminución del material.
- **Fibra:** Elemento que posee una longitud elevada en relación con su dimensión transversal máxima, se caracteriza por su alta flexibilidad y finura.
- **Fibras de carbón:** Fibras (filamentos largos y delgados de material) con un diámetro aproximado de 0.005 mm a 0.010 mm, cuyo contenido de átomos de carbono es de al menos 92 wt% (porcentaje por peso).
- **Material compuesto (composito):** Material obtenido al unir dos o más materiales previos. Su objetivo principal es lograr una combinación de propiedades que no posee un material aislado e incorporar las mejores características de los materiales que lo componen.
- **Pulping (pulpado):** Proceso de separación de las fibras de la madera, para retirar contenidos como ligninas. En el proceso ya sea por métodos mecánicos o químicos, las fibras son desprendidas entre sí, al disolver o romper los enlaces de la matriz de lignina. Del pulpado se obtiene como resultado una sustancia denominada pasta o pulpa de celulosa.
- **Resinas epóxicas:** Familia de polímeros termoestables, las cuales se endurecen al ser mezclados con un catalizador; estas cuales no generan productos de reacción durante el curado (entrecruzamiento), por lo que tienen poca contracción al curar.

## Fuentes de información

- Aydin, S. (2007). *Mechanical Properties of Four Timber Species Commonly Used in Turkey*.
- Bank, L. (2016). *Paperboard tubes in structural and construction engineering*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/298064463>
- Callister, W. (2007). *Materials Science and Engineering. An introduction*. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, Inc.
- Cucarella, J. (2017). *La Fibra de Carbono: el futuro de la construcción modular*. Recuperado el 2017, de Abc modular: <http://abcmodular.com/fibra-de-carbono-construccion-modular>
- Donaldson, Torit DCE. (2017). (Donaldson, Torit DCE.) Obtenido de Materiales fibrosos: [www2.donaldson.com/toritdce/es-es/industries-applications/pages/fibrous-materials/default.aspx](http://www2.donaldson.com/toritdce/es-es/industries-applications/pages/fibrous-materials/default.aspx)
- egresados.fcien.edu.uy. (s.f.). *egresados.fcien.edu.uy*. Obtenido de [egresados.fcien.edu.uy/FABRICACION%20PAPEL.pdf](http://egresados.fcien.edu.uy/FABRICACION%20PAPEL.pdf)
- Ferreira, D. (2015). *Tensile strength of pine and adh woods - experimental and numerical study*. Bragança.
- Fibrenamics. (2017). *Las fibras*. Obtenido de [www.web.fibrenamics.com/es/conocimiento/las-fibras/](http://www.web.fibrenamics.com/es/conocimiento/las-fibras/)
- Fitzer, E., & Manocha, L. (1998). *Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites*. Berlin: Springer.
- Garduño, M. (2017). *Componentes ligeros: Plásticos reforzados con fibra de carbón en la Arquitectura*. Ciudad de México: UNAM.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de madera*. Ciudad de México.
- Guerrero, V., Dávila, J., & Galeas, S. (2011). *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales. Primera edición*. Quito: impreffp.

- Hanlon, J. (1998). *Handbook of Package Engineering. Third Edition*. Boca Raton: CRC Press.
- Huang, X. (2009). *Fabrication and Properties of Carbon Fibers*. Michigan: MDPI.
- Iggesund Paperboard. (2017). *Reference Manual*. Iggesund: Iggesund Paperboard.
- Kirwan, M. J. (2005). *Paper and Paperboard Packaging Technology*. Londres: Blackwell Publishing.
- Kirwan, M. J. (2013). *Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology. Second Edition*. Londres: Wiley-Blackwell.
- Landmarks, N. H. (2003). *High Performance Carbon Fibers*. Parma: American Chemical Society.
- Miravete, A. (2002). *Los nuevos materiales en la Construcción. 2da edición*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Montaña, R. (2002). *Los plásticos como materiales de construcción*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Norma ASTM A500 / A500M: Especificación estándar para tubos estructurales de acero al carbono sin costura y soldados conformados en frío redondos y con formas.
- Norma ASTM A370: Métodos y definiciones para Ensayos mecánicos de productos de acero de prueba estándar.
- Norma ASTM D38: Método de prueba estándar para la tracción propiedades de los plásticos.
- Norma ASTM E9: Métodos de prueba estándar de ensayos de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente.
- Norma ASTM D1435: Práctica estándar para al aire libre erosión de plásticos.
- Norma ASTM G154: Práctica estándar para funcionamiento fluorescente ultravioleta UV. Aparato de la lámpara para exposición de materiales no metálicos.
- Overstreet, K. (2016). *Kengo Kuma presenta obra con el refuerzo antisísmico más ligero del mundo*. Recuperado el 2017, de Archdaily: <http://www.archdaily.mx/mx/785552/kengo-kuma-presenta-obra-con-el-refuerzo-antisismico-mas-ligero-del-mundo>

- Pro Carton. (s.f.). *Glosario. Una guía de la terminología utilizada en la industria de fabricación del cartón y de los envases de este material*. Madrid: Pro Carton.
- Röchling. (2019). *Pultrusión: proceso de fabricación*. Recuperado el 2019, de <https://www.roechling.com/es/tecnologias/pultrusion>
- Stora Enso. (2013). *Paperboard guide. Stora Enso Renewable Packaging*. Helsinki: Stora Enso.
- Teschke, K., & Demers, P. (2001). Industria del papel y de la industria del papel. En M. d. Sociales, *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Tercera edición*. España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.
- Zoltek. (2017). *How is Carbon Fiber Made?* Obtenido de Carbon Fiber Education Center: <http://zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/>

# **APÉNDICE A**

---

**Especificaciones técnicas de ensayos con base en normativa  
ASTM**

## **Apéndice A: Especificaciones técnicas de ensayos con base en normativa ASTM**

### **Ensayo a esfuerzos de tensión: Norma ASTM A370-03<sup>a</sup> (Métodos y definiciones para ensayos mecánicos de productos de acero de prueba estándar)**

Definición: Los métodos incluyen los procedimientos y definiciones para las pruebas mecánicas de aceros forjados o fundidos, aceros inoxidable y aleaciones. Estas pruebas se utilizan para determinar las propiedades requeridas en las especificaciones del producto. La norma incluye el ensayo a tensión, flexión, dureza e impacto. Los valores obtenidos de tensión y del módulo de elasticidad del material deben ser especificados en MPa (SI), el alargamiento en mm (SI). Para fines del proyecto de investigación sólo se tomará el método de ensayo para los esfuerzos a tensión.

La prueba a tensión consiste en someter a un espécimen del material bajo análisis ante una carga determinada, suficiente para causar la ruptura. La prueba puede ser realizada en dos tipos de sistemas de carga: sistema mecánico y sistema hidráulico. Los sistemas hidráulicos permiten la variación de la carga a diferente velocidad. El aparato de prueba tiene por función transmitir la carga desde los cabezales de la máquina al espécimen bajo prueba; es requisito esencial que la carga transmitida sea de manera axial.

Velocidad de prueba: La velocidad de prueba no debe ser superior a la necesaria para obtener valores precisos. Por precaución se utilizarán los valores mínimos de la velocidad de prueba indicada en la norma debido a que se desconoce el comportamiento que tendrá el material durante el ensayo, siendo de 70 Mpa (10,000 psi) por minuto.

Parámetros de los especímenes de prueba: Se deben utilizar probetas cuya forma concuerde con su aplicación práctica. Las probetas deben estar fabricadas en su longitud total del material de manera uniforme. La selección del tamaño y el tipo de probeta es prescrita por la especificación aplicable del producto. Las probetas de sección completa deben ser probadas con una longitud de 200 mm (8 in). Se deben colocar marcas de calibración en las probetas para determinar el porcentaje de alargamiento por la prueba. Para el ensayo de materiales frágiles se pueden utilizar rellenos inertes en sus extremos para la sujeción de las probetas.

Determinación de propiedades a tensión: A partir del ensayo se obtienen los valores del material analizado de límite de elasticidad (MPa), resistencia a la tensión, alargamiento, módulo de elasticidad (MPa) y reducción de área.

## **Ensayo a esfuerzos de compresión: Norma ASTM E9-89a (Métodos de prueba estándar de ensayos de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente)**

Definición: Los métodos de prueba incluyen los instrumentos, especímenes y procedimientos para pruebas de compresión de carga axial para materiales metálicos a temperatura ambiente. Los especímenes son sometidos a una carga axial a compresión incrementada. Se registran los valores de carga y deformación para determinar las propiedades del material.

Las máquinas de prueba utilizadas para el ensayo de compresión deben cumplir con las especificaciones establecidas en la norma ASTM E4. Para máquinas universales con un único espacio de prueba, la calibración debe ser realizada para compresión.

Velocidad de prueba: La velocidad de prueba no debe ser superior a la necesaria para obtener valores precisos. Se utilizará el valor de velocidad de prueba de 10 mm por minuto, utilizada en investigaciones de pruebas de materiales a base de cartón.

Parámetros de los especímenes de prueba: Se recomienda que los especímenes a compresión tengan forma cilíndrica; en el caso del proyecto la geometría corresponderá según la aplicación práctica del producto. Los especímenes pueden ser clasificados por su longitud en tres tipos: especímenes cortos (recomendado para aleaciones), especímenes medios (recomendado para metales, se determina resistencia mecánica), especímenes largos (recomendado para definir módulo de elasticidad). La mejor relación de longitud/diámetro es de 1.5/1 – 2/1 (L/D). Las probetas para el ensayo de compresión del proyecto presentan una relación de 2/1 (L/D). Los especímenes deben poseer una superficie de apoyo plana correctamente careada en ambos extremos para que la carga aplicada sea distribuida de manera uniforme. El número de probetas recomendado para determinar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión de un material es de 5 a 10.

Determinación de propiedades a compresión: A partir del ensayo se obtienen los valores del material analizado de límite de elasticidad, punto de fluencia, módulo de elasticidad, diagrama esfuerzo – deformación y resistencia a la compresión.



**Ensayo de envejecimiento ante la intemperie: Norma ASTM G154-06 (Práctica estándar para funcionamiento fluorescente ultravioleta UV. Aparato de la lámpara para exposición de materiales no metálicos)**

Definición: La práctica incluye los principios y procesos de operación básicos para el uso de lámparas fluorescentes UV e instrumentos de humedad – agua, destinados para reproducir efectos climáticos en materiales que son expuestos a la luz solar (directa o a través de una lámina) y a la humedad, como la lluvia en aplicaciones prácticas. El documento incluye los procedimientos para obtener, medir y controlar las condiciones de exposición de los conceptos descritos.

El ensayo consiste en que los especímenes de prueba son expuestos a ciclos repetitivos de luz y humedad en condiciones ambientales controladas. La humedad es producida por la condensación de vapor de agua sobre los especímenes o por medio del rocío de agua desmineralizada / desionizada (agua destilada). Las condiciones de exposición pueden ser variadas según los siguientes parámetros: tipo de lámpara fluorescente, nivel de irradiancia de la lámpara, tipo de exposición de humedad, duración de exposición a luz y humedad, temperatura de luz de exposición, temperatura de humedad de exposición, duración de ciclo luz / oscuridad. Los ciclos de exposición no pretenden simular efectos de deterioro provocados por fenómenos climáticos como la contaminación atmosférica, ataques biológicos y exposición a ambientes salinos.

Parámetros de los especímenes de prueba: Las especificaciones de los especímenes de prueba se presenta en la norma ASTM G151 (Práctica estándar para la exposición de materiales no metálicos en dispositivos de ensayo acelerado que implementan fuentes de luz en laboratorios). La dimensión y el número de los especímenes de prueba se basa en las características del método de prueba principal que busca ser analizado posterior al ensayo de exposición (ensayos mecánicos). La geometría y dimensión exacta es determinada según el interés propio del investigador o el uso del material en la práctica. Para realizar comparaciones entre especímenes de prueba, estos deben poseer dimensiones y áreas de exposición similares.

## **Ensayo de absorción de humedad: Norma ASTM D570-98 (Método de prueba estándar para la absorción de agua de plásticos)**

Definición: El método de ensayo incluye la determinación del grado relativo de absorción de agua en plásticos sumergidos. El método está destinado a implementarse a todos los tipos de plásticos incluyendo a productos con resinas; laminados con geometría tubular, barras y hojas planas de 0.13 mm de espesor mínimo. Las unidades de medición se basan en el SI (Sistema Internacional de Unidades).

El ensayo para medir el grado de absorción de agua tiene dos objetivos generales: primeramente, indicar la proporción de agua absorbida por el material y, por consiguiente, analizar la relación y los cambios que posee el material entre el contenido de humedad y sus propiedades mecánicas o eléctricas, dimensiones y apariencia.

Parámetros de los especímenes de prueba: Los especímenes de prueba con geometría tubular con un diámetro interno a 76 mm, deben ser ensayados con la sección completa del tubo, con una longitud de 25.4 mm. Deben ser elaborados tres especímenes de prueba por variable a analizar.

Procedimiento. Primera parte: Los especímenes compuestos por materiales cuyo valor de absorción de agua puede ser afectado notoriamente por temperaturas cercanas a los 110 °C, deben ser secados en un horno (mufla) durante 24 horas a una temperatura de  $50 \pm 3$  °C, enfriados en una desecadora e inmediatamente deben ser pesados con una precisión de 0.001 gramos. Segunda parte: Posteriormente se procede a sumergir los especímenes en agua destilada durante un periodo de dos horas (materiales con elevado grado de absorción), al término de esta etapa deben ser secados superficialmente y deben ser pesados nuevamente. Tercera parte: Se procede a realizar el cálculo con base en el cambio en peso de los elementos y se determina el porcentaje de agua absorbido.

# **APÉNDICE B**

---

**Proceso de manufactura de especímenes de prueba a detalle,  
muestreo EC1, ET1**

## **Apéndice B: Proceso de manufactura de especímenes de prueba a detalle, muestreo EC1, ET1**

Los especímenes de prueba han sido elaborados mediante el método de Contacto (Hand Lay-up – estratificación manual), técnica implementada para la fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable. El método consiste en una manufactura manual artesanal sin instrumentos especializados, a temperatura ambiente.

El proyecto de investigación contempla tres tipos de especímenes de prueba en su composición (CA-n, CR-n, CF-n), por lo que el método de manufactura de cada uno es distinto. Las características de composición y microestructura de los especímenes para cada tipo de ensayo han sido fabricados con las mismas especificaciones, teniendo tres tipos de variables, de manera que la geometría de estos sólo es modificada para la correcta ejecución de cada ensayo según los parámetros de las normas ASTM utilizadas. El proceso de elaboración de cada tipo de especímenes de prueba se menciona a continuación, mencionando las especificaciones que cada uno requiere.

### **Manufactura de especímenes tipo CA-n – Primera variable (Variable 1)**

Los especímenes tipo CA-n (Cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos) conforman la primera variable de análisis en el proyecto de investigación. Se encuentran conformados por una fase fibrosa comprimida de fibras de celulosa, denominada comercialmente como cartón. El material ha sido adquirido a partir de elementos con geometría tubular de sección cilíndrica (tubos cilíndricos), con un diámetro interno de 50.80 mm, compuestos específicamente por láminas de cartón Kraft (SUS) dispuestas en espiral con un ángulo de 38°, generando un espesor total del material de 1.778 mm, Figura B1.



*Figura B1. Tubos de sección cilíndrica compuestos por cartón Kraft, utilizados como fase en los especímenes de prueba.*

La geometría de los especímenes para cada tipo de ensayo por realizar es establecida en las normas ASTM seleccionadas. Para la fabricación de los especímenes de prueba CA-n de los ensayos de resistencia a esfuerzos de compresión, resistencia a esfuerzos de tensión y absorción de humedad, la normativa menciona que los elementos deben poseer una geometría tubular de sección cilíndrica; por lo que se procede a utilizar los tubos de cartón sin alterar sus características de composición. Para obtener los especímenes de prueba con las dimensiones establecidas en las normas para cada tipo de ensayo se ha utilizado una caja de inglete de precisión con serrucho marca Stanley.



*Figura B2. Colocación de marcas en tubo cilíndrico para posterior corte de especímenes de prueba.*

Inicialmente se procede a colocar el instrumento de corte y los tubos de cartón en una superficie lisa y limpia, para prevenir defectos en el corte y la incorporación de agentes contaminantes en los especímenes de prueba. Se colocan las marcas de corte alrededor del tubo, dejando 1 mm más de longitud de la probeta

en ambos extremos para su posterior lijado, Figura B2. Posteriormente el corte es realizado a un ángulo de 90° del eje axial del tubo, obteniendo la pieza que será lijada, Figura B3.

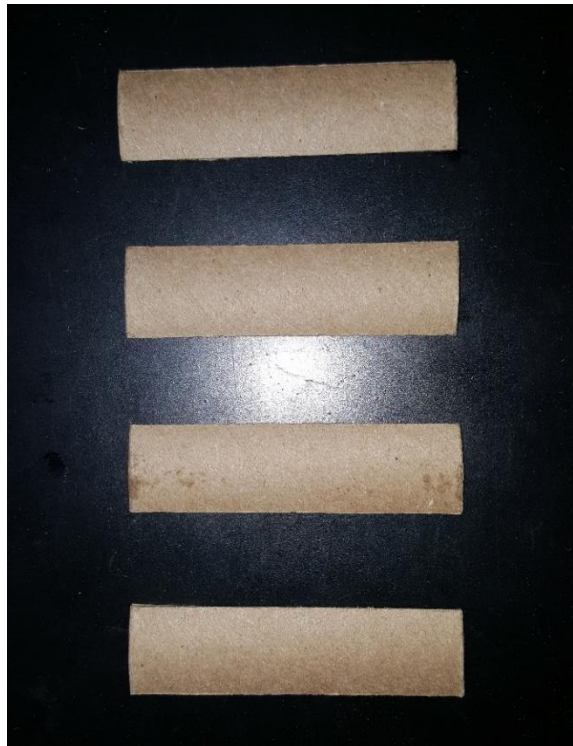


*Figura B3. Obtención de espécimen de prueba tipo EC para ensayo a esfuerzos de compresión, previo al proceso de lijado.*

Por medio del proceso de lijado se realiza el careo preciso de las probetas en sus extremos; parte fundamental en los especímenes de prueba del ensayo a esfuerzos de compresión, cuyas superficies de contacto con la máquina de ensayo debe ser lisa para asegurar una correcta transmisión de la carga. El lijado es realizado por medio de tres tipos de lijas de agua, con los números de grano 80, 120 y 180, de la marca Fandeli; utilizando al inicio la lija 80 con mayor aspereza, posteriormente la lija 120 con aspereza media y al término la lija suave 180 para el acabado final, Figura B4. Este proceso debe ser realizado cuidadosamente para evitar el desprendimiento adicional o el deterioro de las fibras de celulosa en el tubo de cartón. Una vez obtenidos los especímenes, se procede a medir su longitud total y a obtener su pesaje. En la manufactura de los especímenes de prueba para el ensayo de envejecimiento ante la intemperie, se procede a recortar el tubo de cartón en su superficie utilizando un cutter de la marca Truper para obtener probetas relativamente planas con geometría rectangular, Figura B5.



*Figura B4. Proceso de lijado con lijas de agua en especímenes de prueba tipo EC.*



*Figura B5. Obtención de especímenes de prueba H-CA-n, para ensayo de envejecimiento ante la intemperie, posterior al corte.*

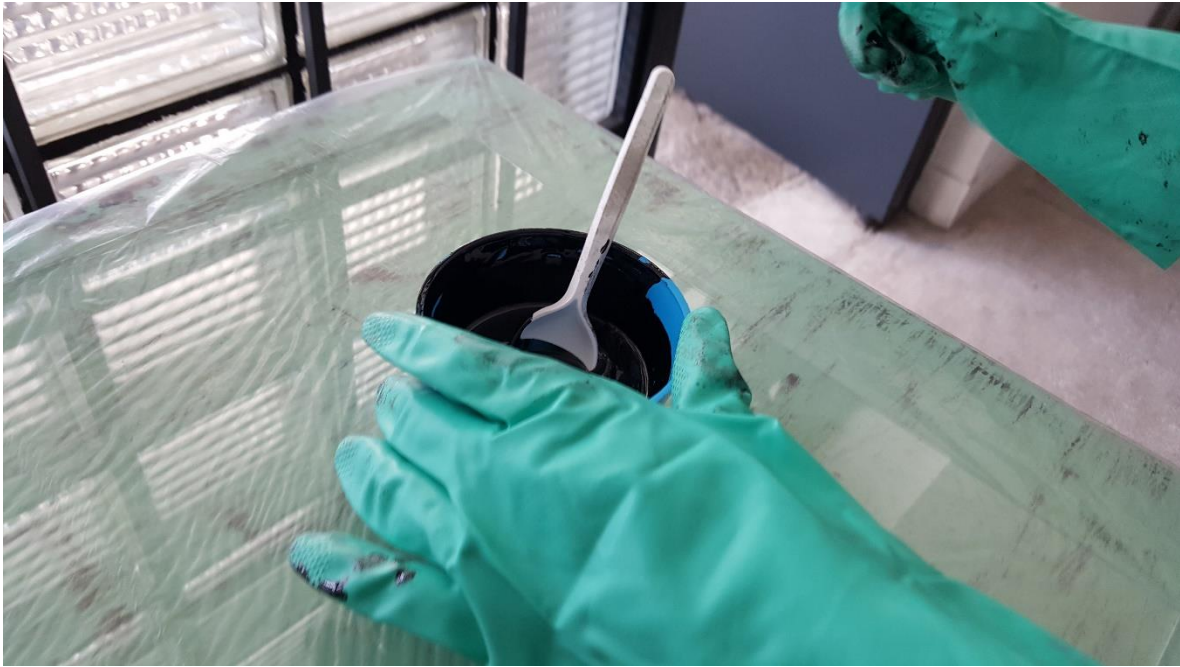
## **Manufactura de especímenes tipo CR-n – Segunda variable (Variable 2)**

La segunda variable experimentada en el proyecto de investigación se encuentra conformada por los especímenes tipo CR-n (Cartón Kraft-SUS con resina epoxi Quintum Q2). Del mismo modo que los especímenes tipo CA-n, las probetas CR-n se componen por una fase fibrosa comprimida de fibras de celulosa, cartón. Estos especímenes además poseen una fase de recubrimiento constituida por una resina epóxica, de la marca Quintum, modelo Q2. El uso del recubrimiento se plantea como protección de barrera para la fase de cartón, la cual ante efectos de intemperismo puede sufrir deterioro por la disociación de las fibras de celulosa. El espesor del recubrimiento puede variar según la cantidad de capas aplicadas sobre el cartón. Para el análisis de esta variable se ha contemplado sólo la aplicación de una capa de recubrimiento, debido a que sólo se plantea como una barrera, no como un reforzamiento del material.

Al inicio el proceso de manufactura de los especímenes tipo CR-n es idéntico al de los especímenes tipo CA-n, ya que las condiciones de experimentación se rigen por las normas ASTM seleccionadas y deben poseer las mismas características para poder realizar la comparación entre las distintas variables del proyecto de investigación. Una vez preparados los especímenes CR-n como los especímenes CA-n (posteriormente a su recorte y lijado) se procede a realizar la aplicación del recubrimiento de resina epóxica. Como se mencionó previamente, los materiales del proyecto de investigación han sido elaborados bajo la técnica de estratificación manual; siguiendo este método, se han utilizado brochas de cerda natural de 1 pulgada y 2 pulgadas para aplicación de la resina sobre el cartón.

Primeramente, se realiza la preparación de la resina epóxica Quintum Q2 sobre un recipiente con una capacidad mínima para 100 ml. Por la elevada viscosidad de la resina, se recolecta del envase (cubeta de 19 litros) con una cuchara limpia desechable y se coloca en el recipiente de mezcla, posteriormente se añade el catalizador con una relación de 100:14 gramos y se mezcla durante 45 segundos hasta obtener una sustancia homogénea. Una vez preparada la resina con el catalizador puede ser utilizada con buena manejabilidad durante 30 minutos, Figura B6.





*Figura B6. Preparación de resina epóxica Quintum Q2 con catalizador a una relación de 100:14 gramos.*

En el caso de los elementos con geometría tubular, se procede a impregnar primeramente la superficie interior (en el caso de los especímenes ET-CR-n, tubos de 60 cm de longitud, se utiliza una extensión). Posteriormente se aplica una capa de resina epóxica sobre la superficie exterior del tubo y, por último, se aplica la resina sobre las secciones ubicadas a los extremos de los especímenes, de manera que el elemento quede recubierto enteramente por el agente de recubrimiento, Figura B7. La cantidad aplicada de resina se realiza visualmente, de manera que toda la superficie de los especímenes quede recubierta, siendo equivalente a aproximadamente el 28% del peso total del espécimen. Finalmente se colocan los especímenes ya recubiertos sobre una superficie lisa y aislados de la intemperie para su proceso de secado durante 24 horas, Figura B8.



*Figura B7. Aplicación de resina epóxica con brocha de 1" sobre especímenes de prueba EC-CR-n.*



*Figura B8. Colocación de especímenes de prueba EC-CR-n sobre superficie lisa para inicio de proceso de secado.*

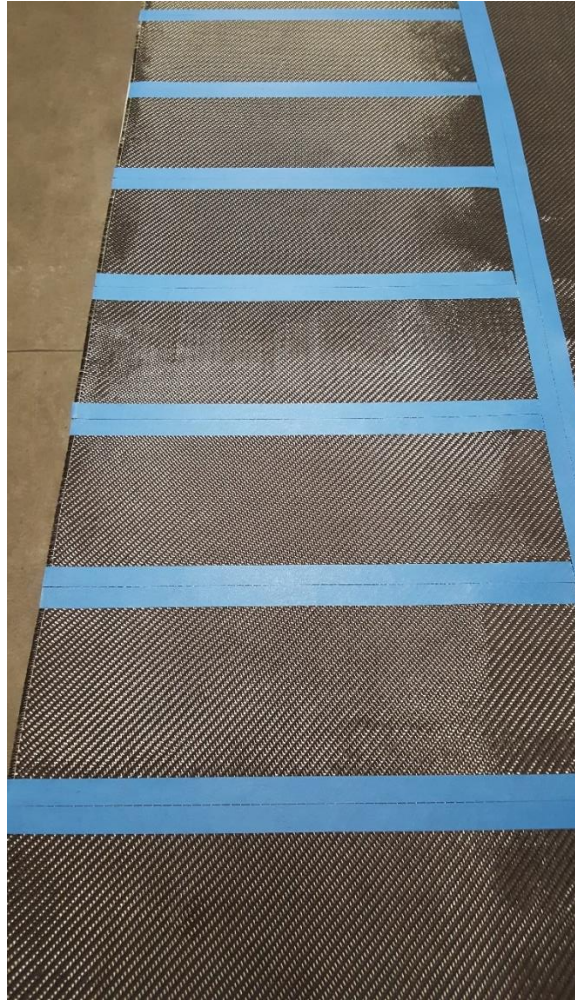
### **Manufactura de especímenes tipo CF-n – Tercera variable (Variable 3)**

El material compuesto ligero a base de una matriz de cartón SUS-Kraft reforzada con un tejido de fibras de carbono 12K Twill confirma la tercera variable del proyecto de investigación; con una nomenclatura de los especímenes tipo CF-n. El objetivo principal de los materiales compuestos es lograr una combinación de propiedades que no posee un material aislado e incorporar las mejores características de los materiales que lo componen. La elaboración de los especímenes CF-n son planteados en relación con la teoría de los materiales compuestos, en los que se encuentra una matriz (fase dispersa) y un refuerzo (fase continua); teniendo como matriz el cartón y como refuerzo el tejido de fibras de carbono. Para lograr la unión de ambas fases se ha planteado el uso de la resina epóxica Quintum Q2 que funge como agente aglomerante en la zona de interface, así como recubrimiento protector en las superficies expuestas a la intemperie. El espesor de los especímenes CF-n al incorporar las fases mencionadas adquiere un espesor aproximado de 3 mm.

Del mismo modo que los especímenes tipo CR-n, el proceso de manufactura de los especímenes tipo CF-n se basa inicialmente en la preparación de la fase matriz (cartón), con el recorte y el lijado de las probetas según las especificaciones de las normas ASTM de cada ensayo. Implementando la técnica de estratificación manual, para la aplicación de la resina epóxica se han utilizado brochas de cerda natural de 1 pulgada y 2 pulgadas.

Inicialmente, se prepara la fase de refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill, al recortar el tejido del rollo con las medidas específicas para cada tipo de espécimen. Para esto, es necesario enmascarar los bordes de cada tejido, de manera que, al recortarlo, este no sea deshilachado, Figura B9.

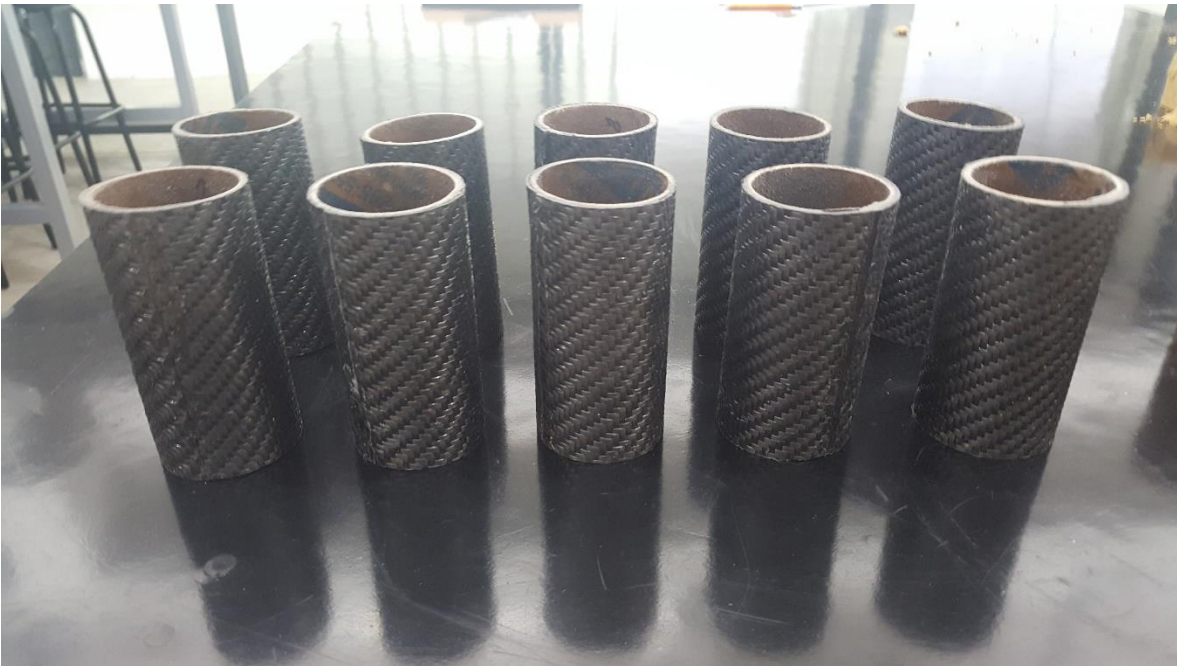




*Figura B9. Enmascarado de tela de fibras de carbono 12K Twill, con cinta azul, para posterior recorte.*

Posteriormente se realiza la preparación de la resina epóxica Quintum Q2 sobre un recipiente como ha sido mencionado en la fabricación de los especímenes CR-n. Una vez conformada la resina epóxica, se procede a aplicarse en la superficie interna del tubo de cartón, de manera que quede totalmente recubierta por una fina capa protectora. A continuación, se aplica una capa de aproximadamente 0.25 mm sobre la superficie externa del tubo para la posterior adición del tejido de fibras de carbono. Al mismo tiempo se aplica una capa de 0.25 mm sobre la cara del tejido de fibras de carbono que será unida al tubo de cartón, de manera que se genera una capa de resina epóxica en la zona de interface de 0.5 mm de espesor, que asegura un correcto embebimiento de ambas fases con la resina epóxica.

Cuidadosamente, con el uso de guantes de nitrilo, se procede a enrollar el tejido de fibras de carbono alrededor del tubo de cartón, comprimiendo lentamente la superficie para evitar oquedades en la unión de las fases. En elementos de geometría tubular se realiza un empalme del tejido de 50 mm para asegurar un refuerzo íntegro del elemento evitando fallas en los bordes de unión. Una vez revestido el tubo de cartón con el tejido de fibras de carbono, es aplicada la última capa de resina epóxica, de manera que la superficie quede totalmente recubierta; así mismo, se realiza este procedimiento con las secciones de los extremos. El contenido del material compuesto en porcentaje es de 41% de matriz cartón, 28% de tejido de refuerzo de fibras de carbono y 31% de resina epóxica, del peso total del espécimen. Por último, los especímenes son colocados sobre una superficie lisa y aislados de la intemperie para su proceso de secado durante 24 horas, Figura B10.



*Figura B10. Colocación de especímenes de prueba EC-CF-n sobre superficie lisa para inicio de proceso de secado, aislados de la intemperie.*

# **ANEXO I**

---

**Estancia de investigación en LITEM, UPC**

## Anexo I: Estancia de investigación en LITEM, UPC

### Índice

#### Introducción

#### **I. Protocolo de experimentación**

Consideraciones de diseño

Normativa

Materiales – Fichas técnicas

Tamaño de la muestra

Instrumentos de medición

#### **II. Manufactura de especímenes de prueba**

Manufactura de especímenes tipo CA-n – Primera variable

Manufactura de especímenes tipo CR-n – Segunda variable

Manufactura de especímenes tipo CF-n – Tercera variable

#### **III. Ensayo de resistencia a la tensión ET2 - Norma ASTM D638-03 (Método de prueba estándar para la tracción propiedades de los plásticos)**

Especificaciones de ensayo – especímenes de prueba

Análisis de resultados

#### **IV. Ensayo de resistencia a la compresión EC2 - Norma ASTM E9-89a (Métodos de prueba estándar de ensayos de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente)**

Especificaciones de ensayo – especímenes de prueba

Análisis de resultados

#### **V. Conclusiones**

## Introducción

El desarrollo de investigaciones en Arquitectura precisa una formación profesional globalizada para la adquisición de conocimientos técnicos y tecnológicos, con el fin de satisfacer las necesidades que la sociedad demanda. El proyecto de investigación “Desarrollo de un material compuesto a base de una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbón 12K Twill para estructuras ligeras de gran claro” plantea el desarrollo y aplicaciones de materiales ligeros con altas prestaciones a esfuerzos mecánicos, en elementos estructurales en Arquitectura, con el objetivo de diseñar y construir edificaciones a base de sistemas constructivos y estructurales más eficientes.

El Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en España, a cargo del Dr. Lluís Gil Espert, ha realizado numerosas investigaciones sobre los materiales mencionados con el objetivo de que sean aplicables benéficamente en Arquitectura e Ingeniería, fomentando el desarrollo de materiales y sistemas estructurales innovadores que puedan ser implementados a futuro.

El objetivo de esta Práctica de Investigación consiste en conocer los diversos métodos de producción utilizados en el LITEM, para la elaboración de elementos estructurales arquitectónicos a base de materiales compuestos; así como las variaciones técnicas referentes a la orientación de fibras, porcentaje de fases constituyentes y métodos de ensayo, para la conformación de elementos estructurales a base de materiales compuestos. Se pretende analizar y contrastar la información obtenida de mi investigación con los conocimientos de la entidad receptora, para generar un proceso de retroalimentación y mejoramiento del proyecto de investigación.

Finalmente se presentan las observaciones y el análisis de los resultados obtenidos en la ejecución de los ensayos realizados en el LITEM, en el documento del proyecto de investigación, para complementar y contrastar la información con los ensayos realizados previamente en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



## **Capítulo I: Protocolo de experimentación**

La Práctica de Investigación realizada en el LITEM tiene por finalidad la preparación de tres muestreos y la realización de dos ensayos para la obtención de información cualitativa y cuantitativa que pueda determinar las propiedades seleccionadas de los materiales del proyecto de investigación. Por ello, el presente documento ha sido dividido en cinco partes: la primera parte (protocolo de experimentación) incluye los parámetros generales de cada variable que deben ser mencionados y analizados para la ejecución de los tres ensayos; la segunda parte contiene el proceso de manufactura de los especímenes de prueba, con base en las especificaciones de la normativa ASTM; la tercera parte contempla la realización del ensayo a esfuerzos de tensión (ET2); la cuarta parte la realización del ensayo a esfuerzos de compresión (EC2); y la última parte presenta las conclusiones generales de la Práctica de Investigación.

La información relacionada a la selección de los materiales y la definición de las variables para la ejecución del proceso experimental puede ser consultada en el documento general del Proyecto de Investigación; en el presente reporte sólo se hará mención de la información necesaria para efectuar los ensayos señalados durante la estadía en el LITEM.

### **Consideraciones de diseño**

El proyecto de investigación tiene por propósito el desarrollo y la aplicación práctica del material compuesto en elementos estructurales para la creación de edificaciones en Arquitectura. Debido a esto, es necesario que el material planteado cumpla con ciertos requisitos, como propiedades y estados de servicios mínimos, para su aplicación en la industria de la Construcción. Estas propiedades son traducidas en valores estándar derivados de pruebas físicas y químicas, establecidas por una autoridad en el campo. Las pruebas permiten comprobar el comportamiento del producto ante esfuerzos medibles y fenómenos específicos a los que pudiera estar sometido el material en circunstancias de aplicación práctica.

Debido a que el objetivo principal del material es que sea aplicado en elementos estructurales, el comportamiento mecánico de este será el factor principal por tomar en consideración para el diseño del producto. Los resultados de los ensayos mecánicos efectuados son aquellos que determinarán las propiedades mecánicas generales (esfuerzos a tensión, esfuerzos a compresión) del material compuesto,

así como su viabilidad de aplicación práctica en la Arquitectura. A continuación, se mencionan los ensayos a los que serán sometidos los materiales en la Práctica de Investigación:

- **Propiedades mecánicas:** Las propiedades mecánicas seleccionadas, se deben al uso específico que se propone para el material compuesto en la geometría establecida (cilíndrica tubular); ya que la aplicación práctica de estos elementos (tubos de cartón reforzados con fibras) se prevé en barras estructurales para la composición de armaduras y estructuras espaciales; por lo que este tipo de elementos están sometidos a los siguientes tipos de esfuerzos:
  - Esfuerzos a tensión: Valores de deformación y resistencia de los especímenes por estiramiento uniaxial.
  - Esfuerzos a compresión: Valores de deformación y resistencia de los especímenes por compresión uniaxial.

## **Normativa**

Para la obtención de valores y pruebas válidos de las propiedades previamente descritas del material compuesto, se utilizará la regulación de procedimientos para materiales establecida por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM – American Society for Testing and Materials, haciendo uso de los métodos de ensayo establecidos en la normativa ASTM, así como las especificaciones técnicas para la manufactura de los especímenes de ensayo. Debido a que actualmente no existe una norma que establezca de manera exacta la manufactura y prueba del material compuesto y su aplicación, propuesto por el proyecto de investigación, se hará uso de las normas utilizadas en materiales similares y en las aplicaciones de estos como elementos estructurales (tubos y barras para estructuras en la construcción). Las normas que se toman como referencia son las siguientes:

**Normas de ensayos mecánicos:** Para obtener los valores del comportamiento mecánico del material compuesto, se propone el uso de las normas ASTM relacionadas a tubos estructurales de acero, debido al uso y comportamiento similar que tendría el material en su aplicación como elemento estructural para armaduras y estructuras espaciales.

- Norma ASTM A500 / A500M (Especificación estándar para tubos estructurales de acero al carbono sin costura y soldados conformados en frío redondos y con formas): Se hace uso de esta norma para la manufactura del material en forma de tubos cilíndricos, cuyo fundamento proviene

de la aplicación del material en elementos estructurales ligeros para la creación de armaduras y/o estructuras espaciales.

- *Norma ASTM A370* (Métodos y definiciones para Ensayos mecánicos de productos de acero de prueba estándar): Se aplican los parámetros designados en esta norma debido a lo establecido en la norma A500, para prueba de elementos tubulares estructurales. Los valores de las propiedades mecánicas de la norma A370 que serán obtenidos para el proyecto de investigación, son de esfuerzos a tensión. Esta norma ha sido utilizada para elaboración de ensayos mecánicos a esfuerzos de tensión en la UNAM; para la ejecución de ensayos a esfuerzos de tensión en el LITEM, se hace uso de la norma ASTM D638, abajo descrita. Se hace mención de la norma ASTM A370 en este documento por la referencia de las normas ASTM A500 y ASTM E9.
- *Norma ASTM E9* (Métodos de prueba estándar de ensayos de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente): Para complementar los métodos de ensayo mecánicos de la aplicación del material y siguiendo el tipo de normativa con base en elementos tubulares estructurales metálicos de las normas previas, se hará uso de la norma E9, para determinar los valores de esfuerzo del material ante cargas a compresión.
- *Norma ASTM D38* (Método de prueba estándar para la tracción propiedades de los plásticos): Se utiliza esta norma como segundo tipo de ensayo para la determinación de los esfuerzos a tensión del material compuesto; sometido a prueba con una geometría de prisma rectangular, obtenida de una sección del perfil tubular. Esta norma es implementada para el ensayo de materiales compuestos que contengan fases poliméricas, siendo las utilizadas en el material del proyecto de investigación.

## **Materiales – Fichas técnicas**

### **Cartón Kraft (cartón sólido no blanqueado SUS) – Matriz (fase continua).**

El uso del cartón en la manufactura de la probeta se efectúa en forma de tubos cilíndricos. Los tubos de cartón se utilizarán como la base primaria para la manufactura del compuesto; su misma geometría otorgada por el proceso de manufactura será aquella que se utilice en la aplicación del producto final. La función principal del tubo de cartón es proveer la rigidez del elemento y la forma geométrica sobre la cual se enrollarán las siguientes capas del material.

#### ***Tubos de cartón Kraft.***

Los tubos utilizados, marca Ratioform, son fabricados a partir de láminas de cartón Kraft (SUS) por medio del proceso de devanado en espiral, cuyo ángulo de inclinación es de 41°, valor que de determinado según el espesor del tubo y el proceso de manufactura de cada empresa. Las dimensiones del tubo se basan en la norma ASTM A500-03a, la cual establece un perímetro total del elemento tubular igual o menor a 1626 mm (64 in) y un espesor de la pared igual o menor a 15.88 mm (0.625 in), Tabla X1.

Los valores de esfuerzos mecánicos aquí presentados provienen de los análisis realizados en investigaciones análogas, siendo las pruebas mecánicas a tubos de cartón efectuadas para la creación de las estructuras del Arq. Shigeru Ban. Estos valores se obtienen de las pruebas mecánicas de los elementos implementados en la edificación de los siguientes proyectos: Library of a Poet (pruebas en 1990), Paper House (pruebas en 1991), Paper Dome (pruebas en 1997) y Japan Pavilion (pruebas en 1991). Los datos de las investigaciones previamente mencionadas se tomarán como referencia para las pruebas del proyecto de investigación.

<b>Tubos de Cartón</b>	<b>Cartón Kraft (Cartón sólido no blanqueado - SUS)</b>
Diámetro interno	50.80 mm (2 in)
Diámetro externo	54.356 mm
Espesor de pared	1.778 mm
Resistencia a la compresión	9.53 – 11.17 MPa <sup>1</sup>
Módulo de elasticidad axial (tubos)	1.57 – 2.36 GPa <sup>1</sup>
Resistencia a la flexión	14.5 – 16.82 MPa <sup>1</sup>
Módulo de elasticidad (flexión)	1.46 – 2.17 <sup>1</sup>
Esfuerzo máximo a la tensión (Ultimate stress tension) de cartón sólido en dirección de la máquina (MD)	27.1 MPa <sup>2</sup>
Contenido de humedad	10 %

Tabla X1. Valores de las dimensiones y de las propiedades mecánicas de los tubos de cartón a implementar en el proyecto.

<sup>1</sup> Datos obtenidos de las pruebas mecánicas efectuadas para la elaboración de las secciones de tubos de cartón en los proyectos del Arq. Shigeru Ban.

<sup>2</sup> Dato obtenido del documento Paper in Architecture, de la tabla de comparación esfuerzos mecánicos de los materiales de construcción. El valor del cartón sólido se obtuvo de los ensayos de la investigadora Julia Schonwalder.

### Fibras de carbono 12 K, marca Quintum – Refuerzo (fase dispersa).

Se utiliza como material de refuerzo en el compuesto un tejido cruzado (asargado – twill) de fibras de carbono 12K de la marca Quintum, comercialmente denominado como Tejido 12K Twill. El tejido se designa como de alta resistencia a esfuerzos de tensión. Este tipo de tejido es utilizado principalmente para la manufactura de elementos estructurales. A continuación, se muestran los datos técnicos relacionados a las propiedades mecánicas de la fibra y del tejido, Tabla X2 y Tabla X3.

Propiedades mecánicas - Fibras de carbono 12K	
Resistencia a la tensión	4,900 MPa
Módulo de tensión	240 GPa
Densidad	1.82 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión	9.53 – 11.17 MPa <sup>1</sup>
Límite elástico (12K)	800 mg/m

Tabla X2. Propiedades mecánicas de las fibras de carbono 12K de la marca Quintum.

Propiedades mecánicas – Tejido 12K Twill de fibras de carbono	
Resistencia a la tensión	5,445 MPa
Módulo de tensión	231 GPa
Alargamiento de rotura	1.70 %
Densidad	1.79 g/cm <sup>3</sup>
Ancho de lámina	1.27 m
Peso	650 g/m <sup>2</sup>
Tejido	Twill

Tamaño de hebra	12K
-----------------	-----

Tabla X3. Propiedades mecánicas del tejido 12K Twill de fibras de carbono de la marca Quintum.

### Resina epóxica – Resina epoxi FV (aglomerante en interfaces).

La resina epóxica implementada procede del proveedor Resineco – Green Composites. Esta resina es utilizada para la elaboración de compositos de fibras de vidrio y fibras de carbono. Su presentación comercial es Epoxi FV. Se caracteriza por poseer viscosidad media – alta para facilitar la impregnación en superficies verticales, tiempo de secado rápido y endurecimiento a temperatura ambiente sin post-curado; se emplea con el catalizador al 50%, posee un tiempo de curado de 24 horas, Tabla X4.

Propiedades de resina epoxi FV	
Viscosidad (a 20 °C)	1,500 – 2,000 mPa.s
Relación de mezcla	100g : 50g
Tiempo de gelado (100 g a 20 °C)	38 – 40 min
Tiempo de secado al tacto (25 °C)	8 horas
Tiempo de curado (lijado)	24 horas

Tabla X4. Propiedades de la resina epoxi FV de la marca Resineco.

### Tamaño de la muestra

Con base a las normas seleccionadas, mencionadas previamente, el diseño del experimento tendrá como base de muestreo la manufactura de 6 probetas de prueba según cada variable por analizar (la normativa plantea como mínimo 5) para los ensayos mecánicos; en las que se analizará la correlación de las variables independientes con las variables dependientes de las propiedades mecánicas. En las Tablas X5 y X6, se presentan los muestreos que se realizarán durante el proceso de experimentación para el análisis de las variables dependientes.

<b>Muestreos para ensayo mecánico a compresión EC2, norma ASTM E9</b>		
Dimensiones de muestras: Tubos cilíndricos, relación 2:1, longitud de 111 mm, diámetro interno de 50 mm, espesor de pared de 3 mm, diámetro externo de 55.5 mm.		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
6 muestras – Nomenclatura EC2-CA-n	6 muestras – Nomenclatura EC2-CR-n	6 muestras – Nomenclatura EC2-CF-n

*Tabla X5. Muestreos para ensayo mecánico a compresión, norma ASTM E9, para proyecto de experimentación.*

<b>Muestreos para ensayo mecánico a tensión ET2, norma ASTM D638</b>		
Dimensiones de muestras: Prismas rectangulares planos, longitud de 165 mm, anchura de 19 mm, espesor de pared de 3 mm.		
Primera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos.	Segunda variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV.	Tercera variable: Tubos de cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill.
6 muestras – Nomenclatura ET2-CA-n	6 muestras – Nomenclatura ET2-CR-n	6 muestras – Nomenclatura ET2-CF-n

*Tabla X6. Muestreos para ensayo mecánico a tensión, norma ASTM D638, para proyecto de experimentación.*

## **Instrumentos de medición**

### **Norma ASTM D638-03 – Ensayo a esfuerzos de tensión ET2.**

El ensayo a esfuerzos de tensión ET2 ha sido realizado bajo los parámetros designados en la norma ASTM D638, para la determinación de las propiedades de resistencia a la tensión de las tres variables analizadas. Los materiales han sido sometidos a prueba con una geometría de prisma rectangular, obtenida de una sección del perfil tubular. La norma D638 se emplea para el ensayo de materiales

compuestos que contengan fases poliméricas, siendo las utilizadas en el material del proyecto de investigación (fibras de celulosa, fibras de carbono, resina epóxica).

En la Figura 28 X1 se presentan las dimensiones de los especímenes de prueba que serán sometidos al ensayo de resistencia a la tensión ET2, según la norma ASTM D638. En la Tabla 25 X7 se mencionan los parámetros de ensayo, las especificaciones de los especímenes de prueba y las características del instrumento de medición seleccionado, para la obtención de los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de las variables experimentadas.

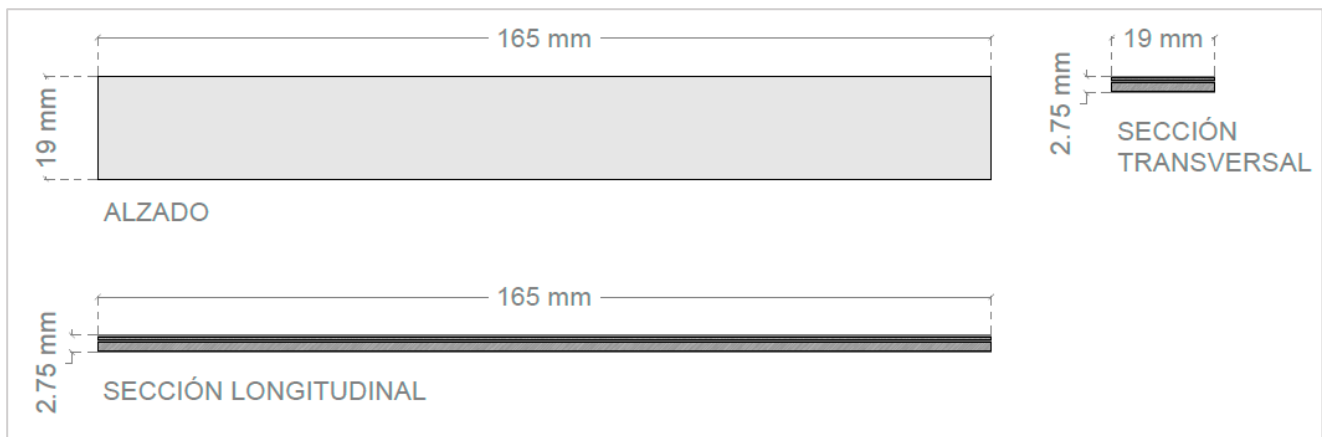


Figura X1. Dimensiones de los especímenes de prueba para el ensayo resistencia a la tensión ET2; variable 3, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

<b>Ensayo de esfuerzos a tensión ET2, norma ASTM D638</b>	
<b>Parámetros de ensayo</b>	
Velocidad de ensayo	5 mm por minuto $\pm$ 25%.
Valores obtenidos de propiedades a tensión por norma ASTM D638	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Límite de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Módulo de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Esfuerzo último a la rotura (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Diagrama esfuerzo – deformación.</li> </ul>
<b>Especificaciones de especímenes de prueba</b>	
Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable 1: Fase de cartón SUS-Kraft.</li> <li>• Variable 2: Fase de cartón SUS-Kraft con recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable 3: Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill, con aglomerante en interfaces y recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>
Estructura	Láminas (prismas rectangulares) obtenidas a partir de tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.
Dimensiones específicas (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capa de cartón de 1.5 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 41°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Ratioform.</li> <li>Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Resineco modelo epoxi FV.</li> </ul>
Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (prisma rectangular)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Espesor de pared: 2.75 mm.</li> <li>Área de la sección: 57 mm<sup>2</sup>.</li> <li>Longitud: 165 mm.</li> <li>Anchura: 19 mm.</li> </ul>
Números de especímenes	18 especímenes (6 especímenes por variable).
Parámetros de especímenes	165 mm de longitud total Con marcas de calibración gráfica para observar el alargamiento del espécimen de prueba.
Nomenclatura de especímenes	<ul style="list-style-type: none"> <li>ET2-CA-n (cartón).</li> <li>ET2-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>ET2-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
<b>Instrumento de medición</b>	
Equipos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipo 1: Máquina de Prueba Universal (Universal Testing Machine) con estación de trabajo, marca MTS Insight 10 kN (Variables ET2-CA-n y ET2-CR-n).</li> <li>Equipo 2: Actuador con célula de carga y mordazas en marco estructural, marca MTS 100 kN (Variable ET2-CF-n).</li> </ul>
Ubicación de equipos	Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM), UPC, España.
Responsable de laboratorio	Dr. Lluís Gil Espert
Imágenes de instrumentos de medición	



*Tabla X7. Especificaciones de ensayo a esfuerzos de tensión ET2, norma ASTM D638.*

### **Norma ASTM E9-89a - Ensayos a esfuerzos de compresión EC2.**

Se aplican los parámetros designados en la norma E9-89 con base en el tipo de normativa para elementos tubulares estructurales metálicos de las normas A500 y A370, para determinar los valores de esfuerzo del material ante cargas a compresión.

El ensayo a compresión consiste en someter los especímenes a una carga axial a compresión incrementada. En la se presentan las dimensiones de los especímenes de prueba sometidos al ensayo de resistencia a la compresión. El ensayo EC2 ha sido efectuado con una máquina universal marca MTS Insight con una capacidad de carga máxima de 10 kN.

En la Figura X2 se presentan las dimensiones de las probetas que serán sometidas al ensayo de compresión. La superficie de apoyo de las especímenes y de los platos de sujeción de la máquina deben estar lisos y correctamente calibrados para garantizar la distribución uniforme de la carga. Las dimensiones de diámetro interno, diámetro externo y espesor han sido determinadas según las

características de los materiales (matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill).

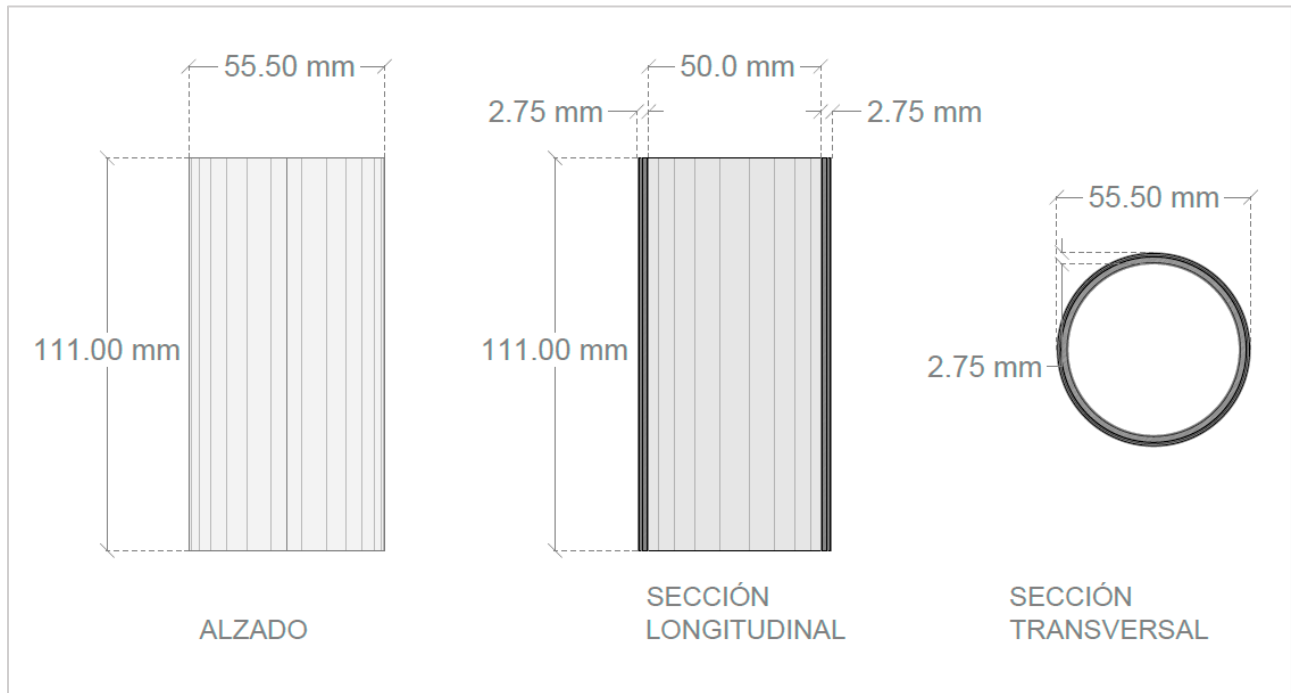



Figura X2. Dimensiones de especímenes de prueba para el ensayo a compresión EC2; variable 3, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

La Tabla X8 muestra los parámetros de ensayo, las especificaciones de los especímenes de prueba y las características del instrumento de medición seleccionado, para la obtención de los valores de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de las variables experimentadas.

Ensayo de esfuerzos a compresión EC2, norma ASTM E9	
Parámetros de ensayo	
Velocidad de ensayo	10 mm por minuto (Variables EC-CA y EC-CR). 2.5 mm por minuto (Variables EC-CF).

Valores obtenidos de propiedades a compresión por norma ASTM E9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Límite de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Módulo de elasticidad aparente (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Esfuerzo último a la rotura (kg/cm<sup>2</sup>).</li> <li>• Diagrama esfuerzo – deformación.</li> </ul>
<b>Especificaciones de especímenes de prueba</b>	
Composición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable 1: Fase de cartón SUS-Kraft.</li> <li>• Variable 2: Fase de cartón SUS-Kraft con recubrimiento de resina epóxica.</li> <li>• Variable 3: Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill, con aglomerante en interfaces y recubrimiento de resina epóxica.</li> </ul>
Estructura	Tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.
Dimensiones específicas para ensayo EC2 (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.5 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 41°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Ratioform.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Resineco modelo epoxi FV.</li> </ul>
Dimensiones de espécimen de material compuesto Variable 3 (tubo cilíndrico), ensayo EC2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro interior: 50 mm.</li> <li>• Espesor de pared: 2.75 mm.</li> <li>• Diámetro exterior: 55.50 mm.</li> <li>• Área de la sección: 455.73 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 111 mm.</li> </ul>
Números de especímenes, ensayo EC2	18 especímenes (6 especímenes por variable).
Parámetros de especímenes	Relación de 2/1 (L/D)
Nomenclatura de especímenes, ensayo EC2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EC2-CA-n (cartón).</li> <li>• EC2-CR-n (cartón con resina epóxica).</li> <li>• EC2-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina epóxica).</li> </ul>
<b>Instrumentos de medición</b>	

Equipo	Máquina de Prueba Universal (Universal Testing Machine) con estación de trabajo, marca MTS Insight 10 kN.
Ubicación de equipo	Laboratorio para la Innovación Tecnológica de Estructuras y Materiales (LITEM), UPC, España.
Responsable de laboratorio LITEM	Dr. Lluís Gil Espert
Imagen de instrumento de medición	
	

*Tabla X8. Especificaciones de ensayos a esfuerzos de compresión EC2, norma ASTM E9.*

## Capítulo II: Manufactura de especímenes

Los especímenes de prueba han sido elaborados mediante el método de Contacto (Hand Lay-up – estratificación manual), técnica implementada para la fabricación de materiales compuestos de matriz termoestable. El método consiste en una manufactura manual artesanal sin instrumentos especializados, a temperatura ambiente. Por las condiciones del laboratorio LITEM algunas técnicas de manufactura han sido modificadas de las especificaciones utilizadas en el laboratorio LMSE de la UNAM, las cuales son mencionadas en las etapas correspondientes.

El proyecto de investigación contempla tres tipos de especímenes de prueba en su composición (CA-n, CR-n, CF-n), por lo que el método de manufactura de cada uno es distinto. Las características de composición y microestructura de los especímenes para cada tipo de ensayo han sido fabricados con las mismas especificaciones, teniendo tres tipos de variables, de manera que la geometría de estos sólo es modificada para la correcta ejecución de cada ensayo según los parámetros de las normas ASTM utilizadas. El proceso de elaboración de cada tipo de especímenes de prueba se menciona a continuación, mencionando las especificaciones que cada uno requiere.

### **Manufactura de especímenes tipo CA-n – Primera variable (Variable 1)**

Los especímenes tipo CA-n (Cartón Kraft-SUS sin aditamentos o aditivos) conforman la primera variable de análisis en el proyecto de investigación. Se encuentran conformados por una fase fibrosa comprimida de fibras de celulosa, denominada comercialmente como cartón. El material ha sido adquirido a partir de elementos con geometría tubular de sección cilíndrica (tubos cilíndricos), con un diámetro interno de 50 mm, compuestos específicamente por láminas de cartón Kraft (SUS) dispuestas en espiral con un ángulo de 41°, generando un espesor total del material de 1.5 mm, Figura X3.



*Figura X3. Tubos de sección cilíndrica compuestos por cartón Kraft, utilizados como fase en los especímenes de prueba.*



La geometría de los especímenes para cada tipo de ensayo por realizar es establecida en las normas ASTM seleccionadas. Para la fabricación de los especímenes de prueba CA-n de los ensayos de resistencia a esfuerzos de compresión, la normativa menciona que los elementos deben poseer una geometría tubular de sección cilíndrica; por lo que se procede a utilizar los tubos de cartón sin alterar sus características de composición. Para obtener los especímenes de prueba con las dimensiones establecidas en las normas para cada tipo de ensayo se han utilizado un arco con segueta estándar y un cutter ancho, de manera que las superficies de contacto con la prensa queden careadas correctamente.

Inicialmente se procede a colocar los tubos de cartón en una superficie lisa y limpia, para prevenir defectos en el corte y la incorporación de agentes contaminantes en los especímenes de prueba, Figura X4. Se colocan las marcas de corte alrededor del tubo, dejando 1 mm más de longitud de la probeta en ambos extremos para su posterior lijado. Posteriormente el corte es realizado a un ángulo de 90° del eje axial del tubo, obteniendo la pieza que será lijada.



*Figura X4. Preparación de área de trabajo en área de laboratorio LITEM, UPC.*

Por medio del proceso de lijado se realiza el careo preciso de las probetas en sus extremos; parte fundamental en los especímenes de prueba del ensayo a esfuerzos de compresión, cuyas superficies de contacto con la máquina de ensayo debe ser lisa para asegurar una correcta transmisión de la carga. El lijado es realizado por medio de lijas de agua, número de grano 80. Este proceso debe ser realizado cuidadosamente para evitar el desprendimiento adicional o el deterioro de las fibras de celulosa en el tubo de cartón. Una vez obtenidos los especímenes, se procede a medir su longitud total, a marcarlos con

su nomenclatura correspondiente y a obtener su pesaje en una báscula digital para registrar los datos en una bitácora de trabajo, Figura X5 y Figura X6.



Figura X5. Proceso de pesaje de muestras CF con báscula digital en área de laboratorio LITEM, UPC.

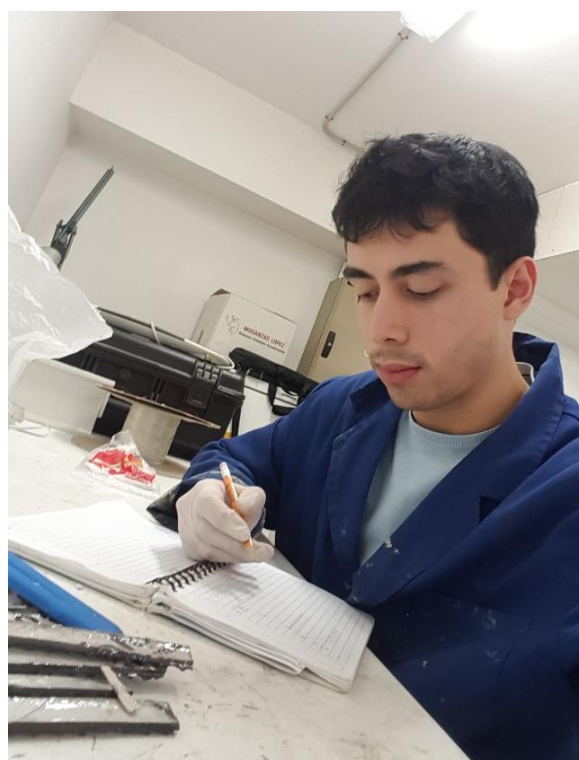


Figura X6. Registro de datos de pesaje de muestras en área de laboratorio LITEM, UPC.



En la manufactura de los especímenes de prueba para los ensayos de esfuerzos a tensión e inflamabilidad, se procede a recortar el tubo de cartón en su superficie utilizando un cutter para obtener probetas relativamente planas con geometría rectangular del tubo cilíndrico, y nuevamente se procede a tomar el registro de datos, para posteriormente poder ser sometidos a ensayo, Figura X7 y Figura X8.



Figura X7. Pesaje de muestra ET2-CA para ensayo de esfuerzos a tensión con báscula digital en área de laboratorio LITEM, UPC.

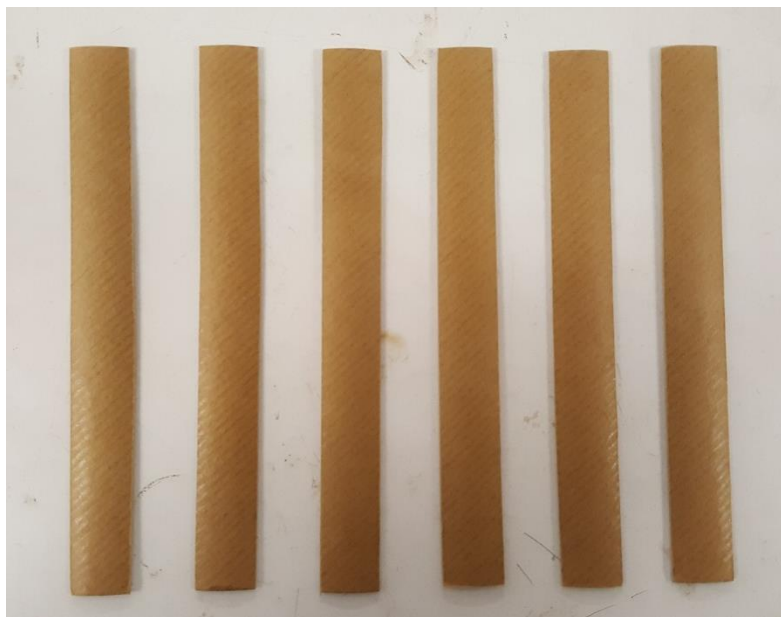
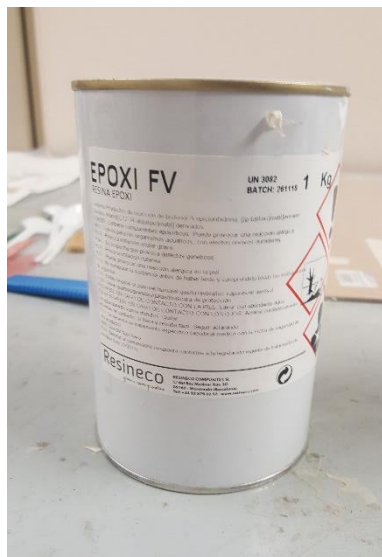


Figura X8. Obtención de especímenes de prueba tipo ET2-CA-n para ensayo de esfuerzos a tensión.

## Manufactura de especímenes tipo CR-n – Segunda variable (Variable 2)

La segunda variable experimentada en el proyecto de investigación se encuentra conformada por los especímenes tipo CR-n (Cartón Kraft-SUS con resina epoxi FV). Del mismo modo que los especímenes tipo CA-n, las probetas CR-n se componen por una fase fibrosa comprimida de fibras de celulosa, cartón. Estos especímenes además poseen una fase de recubrimiento constituida por una resina epóxica, de la marca Resineco, modelo FV. El uso del recubrimiento se plantea como protección de barrera para la fase de cartón, la cual ante efectos de intemperismo puede sufrir deterioro por la disociación de las fibras de celulosa. El espesor del recubrimiento puede variar según la cantidad de capas aplicadas sobre el cartón. Para el análisis de esta variable se ha contemplado sólo la aplicación de una capa de recubrimiento, debido a que sólo se plantea como una barrera, no como un reforzamiento del material.

Al inicio el proceso de manufactura de los especímenes tipo CR-n es idéntico al de los especímenes tipo CA-n, ya que las condiciones de experimentación se rigen por las normas ASTM seleccionadas y deben poseer las mismas características para poder realizar la comparación entre las distintas variables del proyecto de investigación. Una vez preparados los especímenes CR-n como los especímenes CA-n (posteriormente a su recorte y lijado) se procede a realizar la aplicación del recubrimiento de resina epóxica, Figura X9 y Figura X10. Como se mencionó previamente, los materiales del proyecto de investigación han sido elaborados bajo la técnica de estratificación manual; siguiendo este método, se han utilizado brochas de cerda natural de 1 pulgada y 2 pulgadas para aplicación de la resina sobre el cartón.



Figuras X9 y X10. Resina epóxica con endurecedor FV, marca Resineco.

Primeramente, se realiza la preparación de la resina epoxi FV sobre un recipiente con una capacidad mínima para 100 ml. Por la elevada viscosidad de la resina, se recolecta del envase (lata de 1 litro) con una cuchara limpia desechable y se coloca en el recipiente de mezcla, posteriormente se añade el catalizador con una relación de 100:50 gramos y se mezcla durante 45 segundos hasta obtener una sustancia homogénea. Una vez preparada la resina con el catalizador puede ser utilizada con buena manejabilidad durante 30 minutos.

En el caso de los elementos con geometría tubular, se procede a impregnar primeramente la superficie interior. Posteriormente se aplica una capa de resina epóxica sobre la superficie exterior del tubo y, por último, se aplica la resina sobre las secciones ubicadas a los extremos de los especímenes, de manera que el elemento quede recubierto enteramente por el agente de recubrimiento. La cantidad aplicada de resina se realiza visualmente, de manera que toda la superficie de los especímenes quede recubierta, siendo equivalente a aproximadamente el 30% del peso total del espécimen. Posteriormente, se colocan los especímenes ya recubiertos sobre una superficie lisa y aislados de la intemperie para su proceso de secado durante 24 horas, Figura X11. Una vez secos los especímenes, se procede a tomar el registro de los datos de pesaje, Figura X12.



*Figura X11. Proceso de secado a temperatura ambiente de especímenes de prueba tipo ET2-CR-n para ensayo de esfuerzos a tensión.*



Figura X12. Pesaje de muestra ET2-CR para ensayo de esfuerzos a tensión con báscula digital en área de laboratorio LITEM, UPC.

### **Manufactura de especímenes tipo CF-n – Tercera variable (Variable 3)**

El material compuesto ligero a base de una matriz de cartón SUS-Kraft reforzada con un tejido de fibras de carbono 12K Twill confirma la tercera variable del proyecto de investigación; con una nomenclatura de los especímenes tipo CF-n. El objetivo principal de los materiales compuestos es lograr una combinación de propiedades que no posee un material aislado e incorporar las mejores características de los materiales que lo componen. La elaboración de los especímenes CF-n son planteados en relación con la teoría de los materiales compuestos, en los que se encuentra una matriz (fase dispersa) y un refuerzo (fase continua); teniendo como matriz el cartón y como refuerzo el tejido de fibras de carbono. Para lograr la unión de ambas fases se ha planteado el uso de la resina epoxi FV que funge como agente aglomerante en la zona de interface, así como recubrimiento protector en las superficies expuestas a la intemperie. El espesor de los especímenes CF-n al incorporar las fases mencionadas adquiere un espesor aproximado de 2.75 mm.

Del mismo modo que los especímenes tipo CR-n, el proceso de manufactura de los especímenes tipo CF-n se basa inicialmente en la preparación de la fase matriz (cartón), con el recorte y el lijado de las probetas según las especificaciones de las normas ASTM de cada ensayo. Implementando la técnica de



estratificación manual, para la aplicación de la resina epóxica se han utilizado brochas de cerda natural de 1 pulgada y 2 pulgadas.

Inicialmente, se prepara la fase de refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill, al recortar el tejido del rollo con las medidas específicas para cada tipo de espécimen. Para esto, es necesario enmascarar los bordes de cada tejido, de manera que, al recortarlo, este no sea deshilachado, Figura X13. Se procede a tomar el pesaje de los tejidos recortados para asegurar una correcta proporción de las fases componentes del material compuesto, Figura X14.

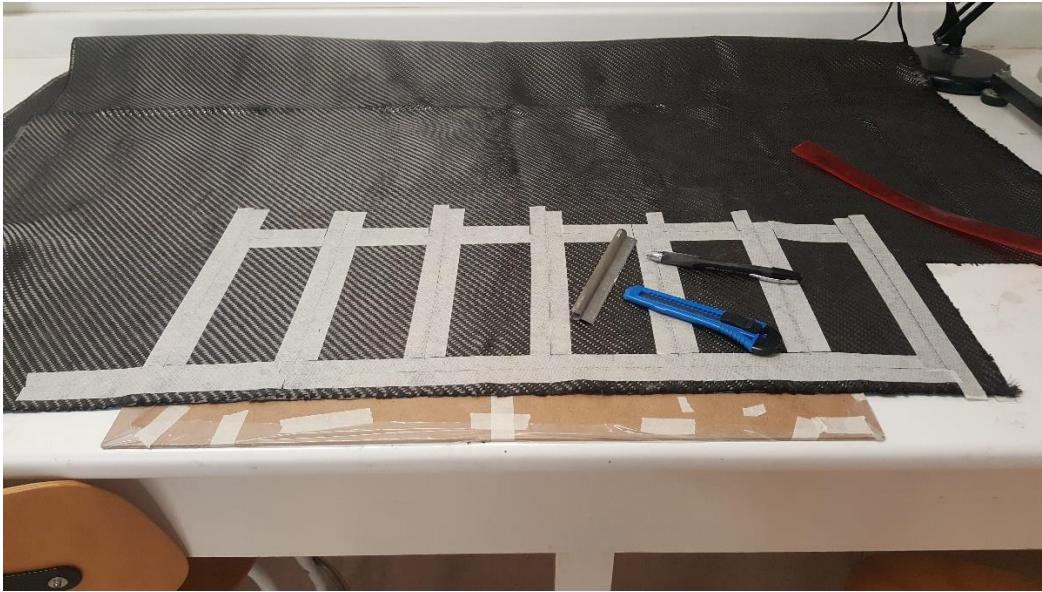


Figura X13. Enmascarado de tela de fibras de carbono 12K Twill, con cinta masking tape, para posterior recorte.



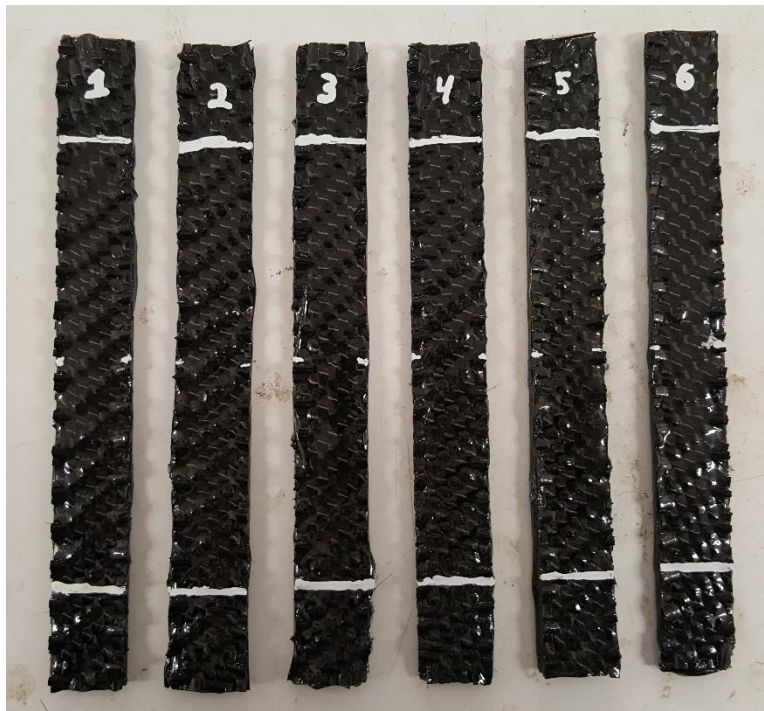
Figura X14. Pesaje de capa del tejido de fibras de carbono para los especímenes de prueba, con báscula digital en área de laboratorio LITEM, UPC.

Posteriormente se realiza la preparación de la resina epoxi FV sobre un recipiente como ha sido mencionado en la fabricación de los especímenes CR-n. Una vez conformada la resina epóxica, se procede a aplicarse en la superficie interna del tubo de cartón, de manera que quede totalmente recubierta por una fina capa protectora. A continuación, se aplica una capa de aproximadamente 0.25 mm sobre la superficie externa del tubo para la posterior adición del tejido de fibras de carbono. Al mismo tiempo se aplica una capa de 0.25 mm sobre la cara del tejido de fibras de carbono que será unida al tubo de cartón, de manera que se genera una capa de resina epóxica en la zona de interface de 0.5 mm de espesor, que asegura un correcto embebimiento de ambas fases con la resina epóxica.

Cuidadosamente, con el uso de guantes de látex, se procede a enrollar el tejido de fibras de carbono alrededor del tubo de cartón, comprimiendo lentamente la superficie para evitar oquedades en la unión de las fases. En elementos de geometría tubular se realiza un empalme del tejido de 50 mm para asegurar un refuerzo íntegro del elemento evitando fallas en los bordes de unión. Una vez revestido el tubo de cartón con el tejido de fibras de carbono, es aplicada la última capa de resina epóxica, de manera que la superficie quede totalmente recubierta; así mismo, se realiza este procedimiento con las secciones de los extremos. El contenido del material compuesto en porcentaje es de 30% de matriz cartón, 21% de tejido de refuerzo de fibras de carbono y 49% de resina epóxica, del peso total del espécimen. Los especímenes son colocados sobre una superficie lisa y aislados de la intemperie para su proceso de secado durante 24 horas, Figura X15. Posteriormente, son marcados según la nomenclatura correspondiente y pesados para ser ensayados, Figura X16.



*Figura X15. Proceso de secado a temperatura ambiente de especímenes de prueba tipo EC2-CR-n y EC2-CF-n para ensayo de esfuerzos a compresión.*



*Figura X16. Obtención de especímenes de prueba tipo ET2-CF-n para ensayo de esfuerzos a tensión.*

### Capítulo III: Ensayo de resistencia a la tensión ET2

#### Norma ASTM D638-03 (Método de prueba estándar para la tracción propiedades de los plásticos)

##### Especificaciones de ensayo – especímenes de prueba

Definición: La prueba a tensión consiste en someter a un espécimen del material bajo análisis ante una carga determinada a tensión, suficiente para causar la ruptura. El aparato de prueba tiene por función transmitir la carga desde los cabezales de la máquina al espécimen bajo prueba; es requisito esencial que la carga transmitida sea de manera axial.

Parámetros de los especímenes de prueba: Se deben utilizar probetas cuya forma concuerde con su aplicación práctica. Las probetas deben estar fabricadas en su longitud total del material de manera uniforme. La geometría de la probeta depende del tipo de materiales que la componen; se ha seleccionado el tipo de especímenes 1 debido a que es el recomendado para materiales poliméricos rígidos y para materiales compuestos. Las dimensiones establecidas son de 165 mm de longitud por 19 mm de anchura, con el espesor propio del material menor a 7 mm (se ha modificado la geometría en forma de campana de la probeta por las características innatas de las fases componentes, dando lugar a un prisma rectangular), Figura X17.



Figura X17. Especímenes de prueba para ensayo de esfuerzos a tensión ET2.



Velocidad de prueba: La velocidad de prueba no debe ser superior a la necesaria para obtener valores precisos. La velocidad de prueba para los especímenes de prueba tipo 1, se establece de 5 mm/min +/- 25%.

Determinación de propiedades a tensión: A partir del ensayo se obtienen los valores del material analizado de límite de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>), esfuerzo máximo resistente a la tensión, esfuerzo último a la tensión, alargamiento, módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>) y gráfica esfuerzo – deformación.

En la Figura X18 se presentan las dimensiones de las probetas que serán sometidas al ensayo de tensión ET2, con las modificaciones mencionadas previamente, según la norma ASTM D638. En la Tabla X9, se mencionan las especificaciones técnicas de las probetas para el ensayo de tensión.

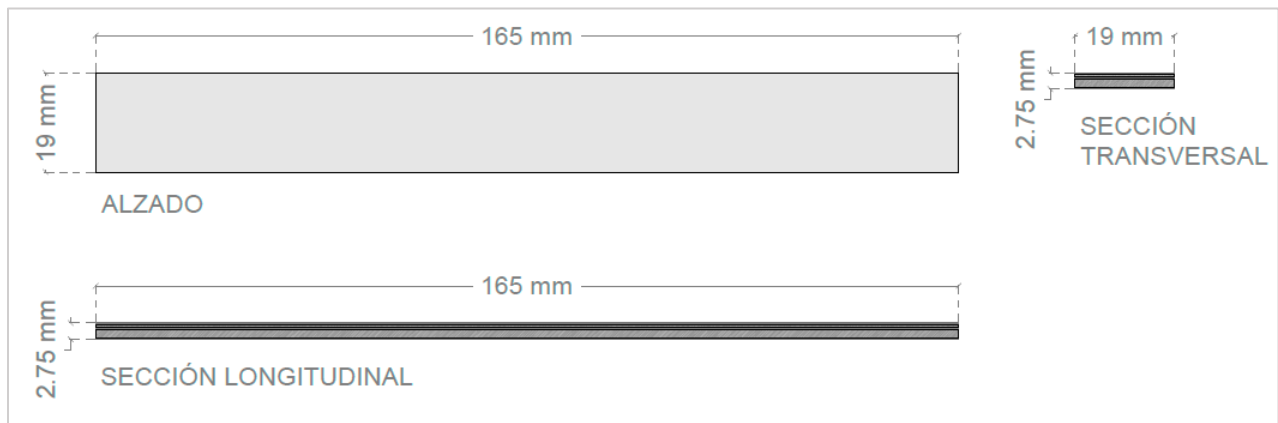
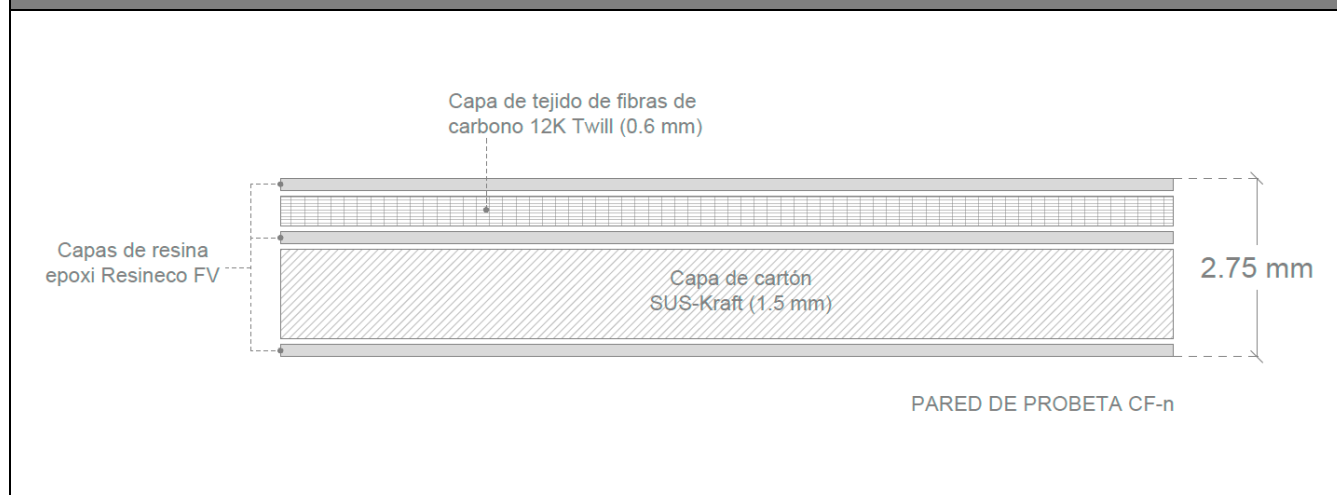


Figura X18. Dimensiones de probetas para ensayo a tensión ET2, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

Especificaciones de probetas para ensayo a tensión ET2, norma ASTM D638	
Composición	Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill.
Estructura	Prisma rectangular plano; materiales dispuestos en capas.

Dimensiones específicas (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.5 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 41°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Ratioform.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Resineco modelo epoxi FV.</li> </ul>
Dimensiones de probeta de material compuesto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espesor de pared: 2.75 mm.</li> <li>• Área de la sección: 57 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 165 mm.</li> <li>• Anchura: 19 mm.</li> </ul>
Velocidad de ensayo	5 milímetros por minuto +/- 25%.
Nomenclatura de probetas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ET2-CA-n (cartón)</li> <li>• ET2-CR-n (cartón con resina)</li> <li>• ET2-CF-n (cartón con fibras de carbono y resina)</li> </ul>

**Diagrama de espesor de pared de la probeta del material compuesto (ET2-CF-n)**



*Tabla X9. Especificaciones de probetas para ensayo a tensión ET2 del material compuesto, norma ASTM D638.*

## **Análisis de resultados**

### **Resultados de Variable 1 – Especímenes de prueba ET2-CA-n.**

El ensayo de resistencia a esfuerzos de tensión de la Variable 1 (CA-n) consiste en someter a prueba los especímenes constituidos a base de cartón, con el fin de observar las propiedades mecánicas a la tensión

del material que funge como matriz en el material compuesto propuesto en la investigación. Se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con geometría prismática rectangular plana, bajo la denominación ET2-CA-n (láminas de cartón Kraft SUS sin aditamentos o aditivos) con los parámetros presentados en la Tabla X9, Figura X19. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET2-CA-n se muestran en la Tabla X10.

Espécimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
ET2-CA-01	42.84	150.32	1.0395	132.06
ET2-CA-02	39.67	139.22	1.0660	129.20
ET2-CA-03	50.08	175.73	0.9670	162.12
ET2-CA-04	37.23	130.63	0.9050	126.33
ET2-CA-05	48.55	170.36	1.1770	159.26
ET2-CA-06	36.00	126.33	0.7925	118.10

Tabla X10. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET2-CA.

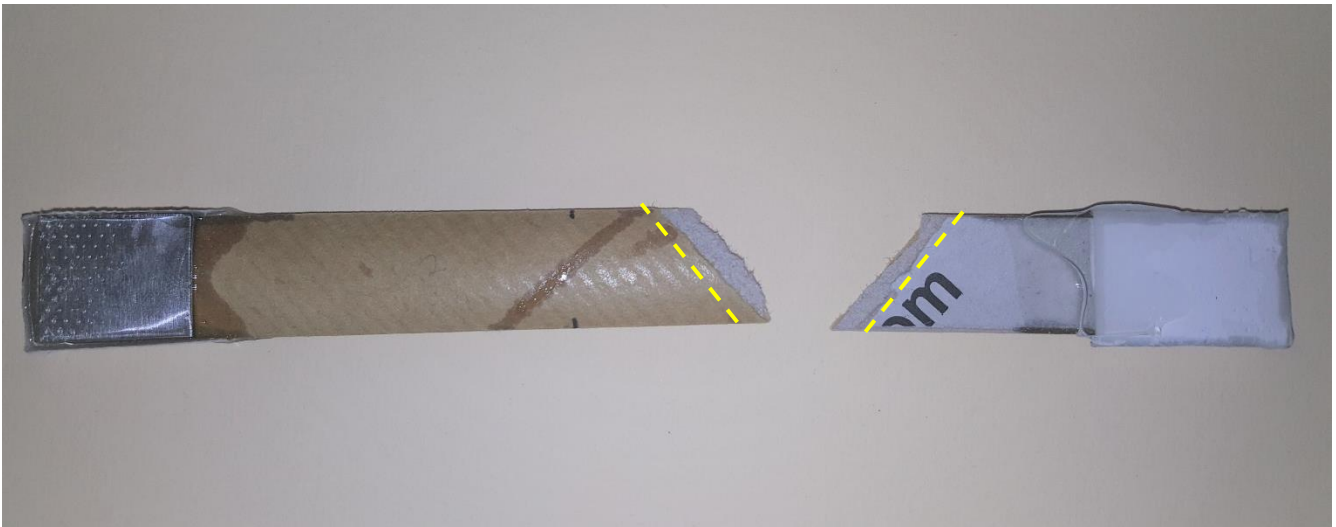


Figura X19. Especímenes de prueba ET2-CA-n para ensayo a la tensión.

### *Comportamiento mecánico de Variable 1, especímenes ET2-CA.*

En el ensayo a esfuerzos de tensión de las muestras ET2-CA se identificó que todos los especímenes fueron susceptibles al devanado multicapa helicoidal, de manera que las fallas se presentaron de manera diagonal en las áreas de unión del multicapa del cartón. La deformación de los especímenes fue de tipo dúctil, al producirse una amplia deformación previo a la rotura. Cabe destacar que, al efectuar estos ensayos, el proceso de colocación de los especímenes en los equipos de prueba tuvo que ser efectuado cuidadosamente, para evitar ejercer una precarga o provocar una rotura ajena a los esfuerzos de tensión del ensayo.

A nivel de microestructura, en las fallas por rotura que fueron propiciadas por el devanado multicapa helicoidal, las fibras de celulosa se separaron entre sí, en distintos niveles del multicapa, debido a una relativamente baja resistencia de adherencia entre capas del cartón, Figura X20. Se prevé que este efecto podría ser disminuido al manufacturar el cartón en una sola capa del mismo espesor, de manera que el material se comportase como un sólido entero. Las fallas por rotura se generaron en una posición media entre el centro y los extremos de sujeción.



*Figura X20. Especimen de prueba ET2-CA-02. Se observa la rotura por delaminación de la fase de cartón, mostrando relativamente baja resistencia entre capas.*

***Propiedades mecánicas de Variable 1, especímenes ET2-CA.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de la Variable 1 (ET2-CA) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba ET2-CA, implementando el método de regresión polinomial de grado 4, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Se desarrolló una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular. En el análisis estadístico del muestreo ET2-CA se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET2-CA-01, ET2-CA-02, ET2-CA-03, ET2-CA-04, ET2-CA-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET2-CA se presentan en la Tabla X11.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 1, especímenes ET2-CA</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>143.45 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>143.87 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>488.35 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>28.32 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla X11. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 1, ensayo ET2-CA.*

En la Figura X21 se presenta la gráfica esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes ET2-CA. Los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. Por las condiciones de microestructura del material (fibras de celulosa entrelazadas), no se presenta una deformación elástica completamente regular.

En la zona plástica, el material de la Variable 1 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de tensión a una deformación de 1.08 cm/cm. A nivel de microestructura, durante el ensayo a esfuerzos de tensión, no se produce el efecto de reacondicionamiento repetitivo de las fibras de celulosa (visto en los ensayos a

compresión); en cambio, las fibras son tensadas en la dirección axial del eje del espécimen hasta la rotura de los enlaces y los entrelazamientos de las redes del cartón, y la delaminación entre capas.

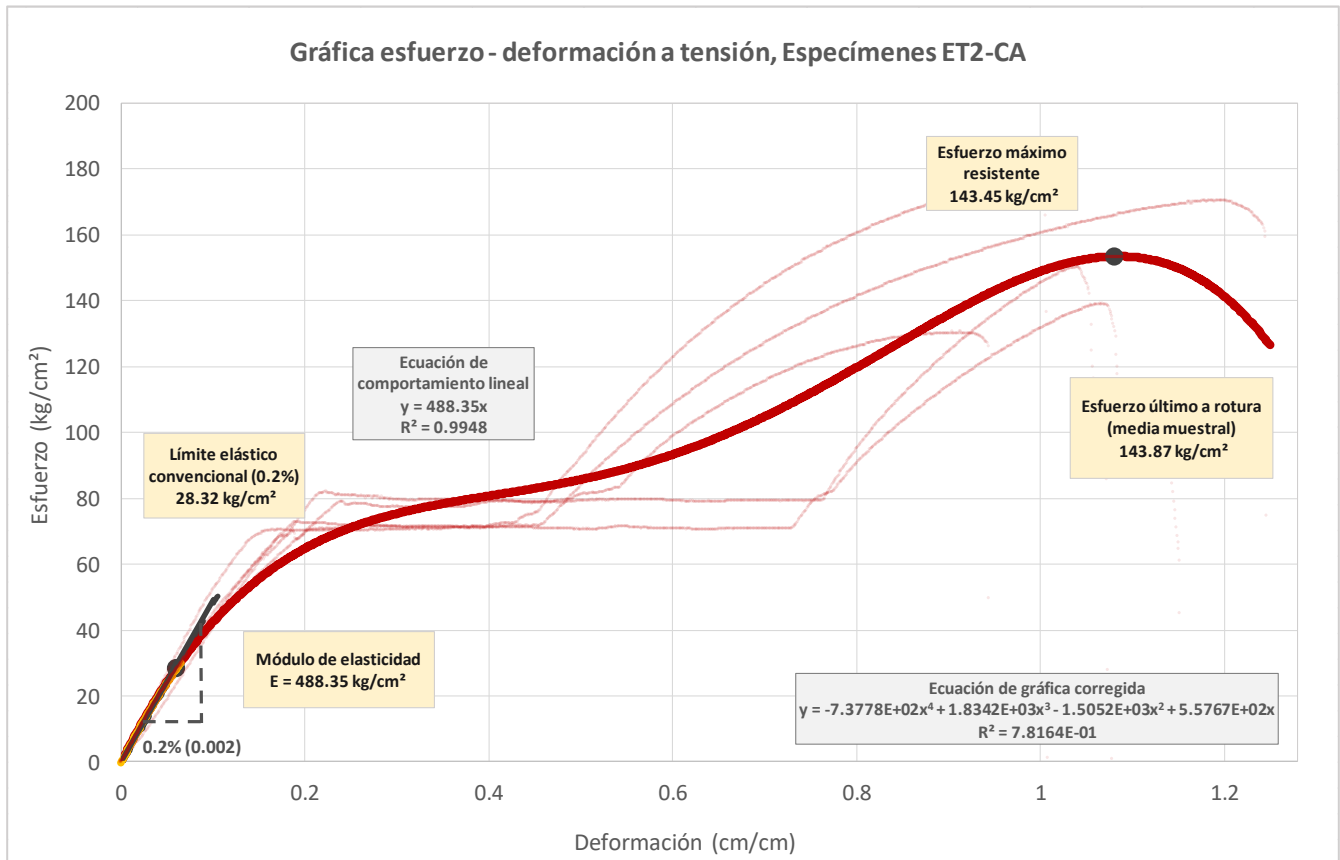


Figura X21. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de la Variable 1, ensayo ET2-CA.

El comportamiento de estos especímenes se muestra ampliamente dúctil, con una zona elástica muy breve que adquiere su límite elástico convencional a los 28.32 kg/cm<sup>2</sup>. Al alcanzar un esfuerzo de 70 kg/cm<sup>2</sup> se observa una zona de transición que significa el reacomodo de las fibras de celulosa y/o del espécimen con las mordazas de sujeción. Posteriormente los valores de resistencia vuelven a aumentar hasta obtener el esfuerzo máximo resistente del material (143.45 kg/cm<sup>2</sup>), seguido de la caída por la rotura total de los especímenes. Cabe mencionar que el material obtuvo un módulo de elasticidad relativamente bajo (488.35 kg/cm<sup>2</sup>), significando la poca rigidez del elemento.

## Resultados de Variable 2 – Especímenes de prueba ET2-CR-n.

El ensayo de resistencia a esfuerzos de tensión de la Variable 2 (CR-n) consiste en someter a prueba los especímenes constituidos a base de cartón con un recubrimiento interno y externo de resina epóxica. El uso del recubrimiento de resina epóxica aplicado sobre el cartón se ha establecido como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo. Se observó que la aplicación de la resina epóxica sobre el cartón modifica las propiedades físicas de las capas externas, tornando al material más rígido y frágil, suceso que condicionó el comportamiento mecánico del material. Se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con la denominación ET2-CR-n (láminas de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV) con los parámetros presentados en la Tabla X9, Figura X22. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET2-CR-n se muestran en la Tabla X12.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
ET2-CR-01	64	224.76	1.1545	216.88
ET2-CR-02	47	163.92	0.8440	162.12
ET2-CR-03	61	214.02	1.0280	211.15
ET2-CR-04	58	202.57	0.9115	176.44
ET2-CR-05	61	212.95	1.0680	210.80
ET2-CR-06	62	217.60	0.9490	217.24

Tabla X12. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET2-CR.



*Figura X22. Especímenes de prueba ET2-CR-n para ensayo a la tensión.*

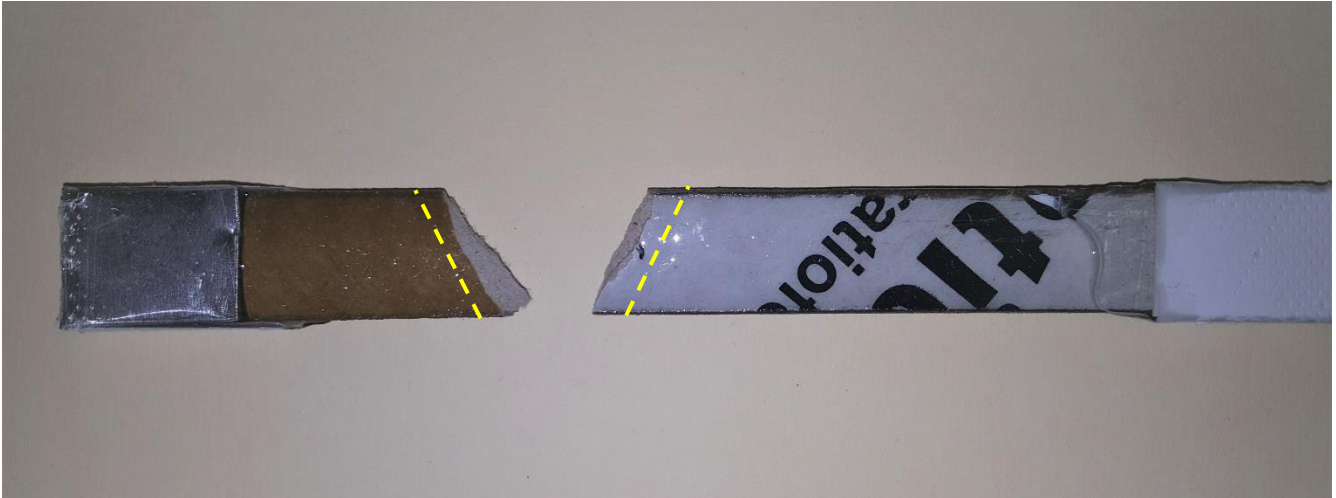
### ***Comportamiento mecánico de Variable 2, especímenes ET2-CR.***

En el ensayo a esfuerzos de tensión de las muestras ET2-CR se observa una ligera disminución del efecto de falla por rotura por el devanado multicapa helicoidal, debido al aumento de uniformidad del elemento por la aplicación de la resina epóxica como recubrimiento; cuestión que facilitó la manipulación de los especímenes al ser emplazados en las mordazas de los equipos de prueba. La deformación de los especímenes de la Variable 2, fue de tipo semirrígido y dúctil; semirrígido al haber presentado un aumento en los valores de resistencia iniciales en comparación a la Variable 1. Se presentó delaminación de las capas exteriores con resina epóxica que le otorgaban mayor resistencia a la fase de cartón, una vez dado este desprendimiento, el comportamiento del material es de tipo dúctil, manifestando amplia deformación, comportamiento similar al presentado por los especímenes de la Variable 1.

El efecto de falla por rotura, observado en la Variable 1 fue repetido en estos especímenes, con un aumento aproximado del 40% de los valores de resistencia de los esfuerzos a tensión. Cabe destacar que, al aplicar la resina epóxica como recubrimiento en los especímenes para el ensayo a esfuerzos de tensión, no se generó un incremento en la rigidez del elemento; significando que la rigidez del material sigue condicionada por la fase matriz de cartón.



De manera similar a la Variable 1, en los especímenes ET2-CR, una vez presentando el desprendimiento de las capas exteriores con resina epóxica, las fallas por rotura se generaron en una posición media entre el centro y los extremos de sujeción; repitiendo el fenómeno de delaminación y la separación de las fibras de celulosa, Figura X24.



*Figura X24. Espécimen de prueba ET2-CR-03. Se observa que en los especímenes del muestreo ET2-CR-n las fallas por rotura se presentaron en una posición media entre el centro y los extremos de sujeción, de manera similar a los especímenes ET2-CA-n.*

Los especímenes que obtuvieron valores de resistencia mayores, se caracterizaron por poseer una mayor cantidad de resina epóxica, así como un recubrimiento más uniforme de esta; mostrando una tendencia de que el aumento de la resina sobre la fase de cartón, incrementa la resistencia del material, tanto como recubrimiento, como en el grado de penetración y relleno de oquedades en la red de fibras de celulosa.

#### ***Propiedades mecánicas de Variable 2, especímenes ET2-CR.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de la Variable 2 (ET2-CR) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba ET2-CR, implementando el método de regresión polinomial de grado 4, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Se desarrolló una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular. Se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET2-CR-01, ET2-CR-02, ET2-CR-03, ET2-CR-04, ET2-CR-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET2-CR se presentan en la Tabla X13.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 2, especímenes ET2-CR</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>216.91 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>195.26 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>544.69 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>26.68 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla X13. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 2, ensayo ET2-CR.*

En la Figura X25 se presenta la gráfica esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes ET2-CR. Los especímenes e los dos muestreos exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. El comportamiento lineal y el límite elástico convencional del muestreo de los especímenes ET2-CR es muy similar al de la Variable 1 (ET2-CA); igualmente, hubo un incremento sustancial del esfuerzo máximo resistente, debido a la aplicación de la resina epóxica como recubrimiento.

En la zona plástica, el material de la Variable 2 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de tensión a una deformación de 1.05 cm/cm. De manera similar al ensayo de la Variable 1, una vez desprendidas las capas exteriores con resina epóxica, las fibras de celulosa son tensadas en la dirección axial del eje del espécimen hasta la rotura de los enlaces y los entrelazamientos de las redes del cartón, y la delaminación entre capas.

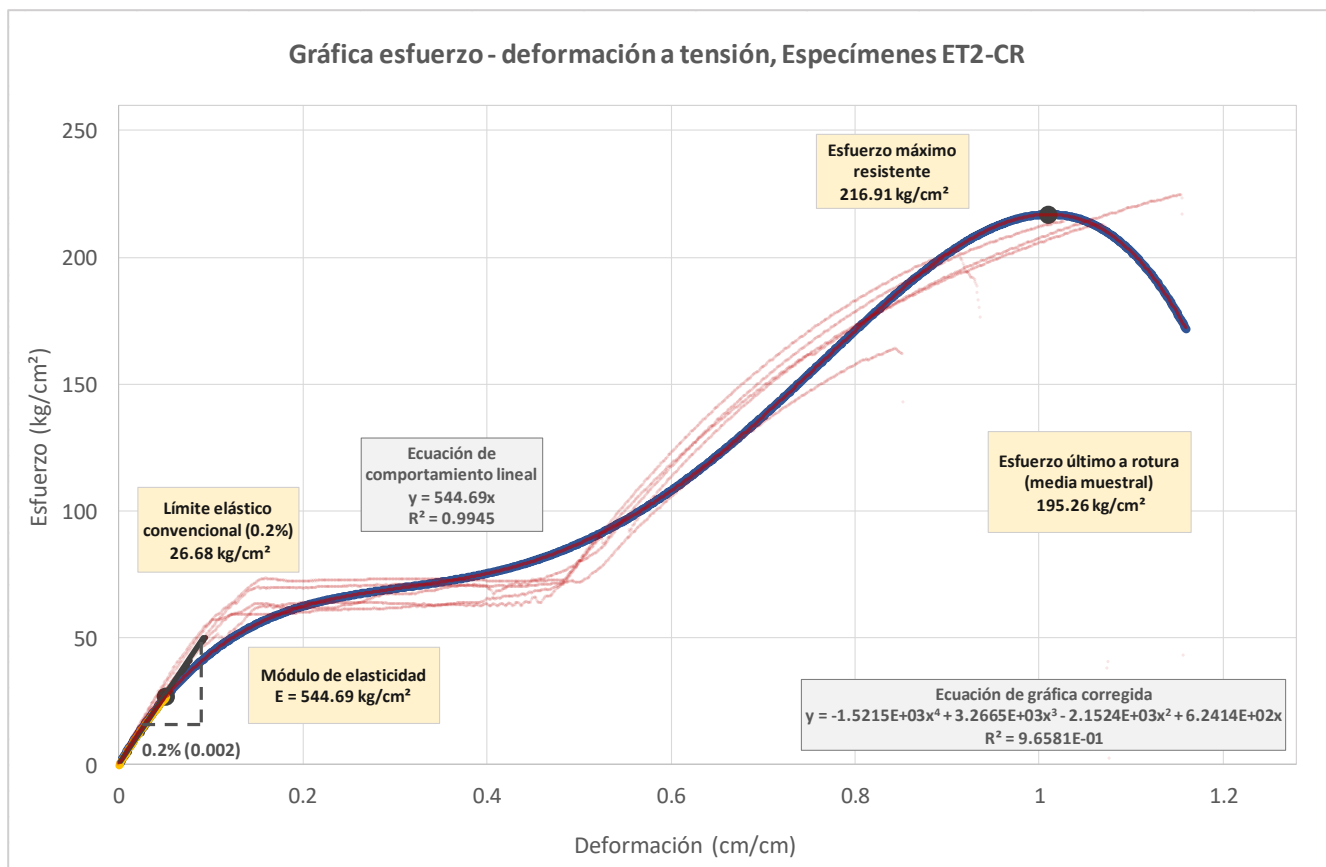


Figura X25. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de la Variable 2, ensayo ET2-CR.

El comportamiento de los especímenes es inicialmente semirrígido y posteriormente dúctil, con zonas elásticas breves, adquiriendo su límite elástico convencional a los 28.32 kg/cm<sup>2</sup>. Al obtener un esfuerzo superior a los 70 kg/cm<sup>2</sup> se observa una zona de transición (visto del mismo modo que en los especímenes ET2-CA de la Variable 1) por el reacomodo de las fibras de celulosa y del espécimen con las mordazas de sujeción. En estos especímenes se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 216.91 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 544.69 kg/cm<sup>2</sup>.

### Resultados de Variable 3 – Especímenes de prueba ET2-CF-n.

El ensayo de resistencia a esfuerzos de tensión de la Variable 3 (CF-n) consiste en someter a prueba los especímenes constituidos a base de una matriz de cartón reforzada con un tejido tipo Twill de fibras de carbono 12K, unido por medio de una resina epóxica, que funge como agente aglomerante en las zonas

de interface. Al igual que en la Variable 2, la cara inferior de las láminas fue recubierta con resina epóxica como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo.

La Variable 3 consiste en el material compuesto planteado para el proyecto de investigación, con el objetivo de optimizar las propiedades mecánicas de las fases componentes para la elaboración de estructuras ligeras de gran claro. Se realizó el ensayo a esfuerzos de tensión de seis especímenes de prueba con la denominación ET2-CF-n (láminas de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill) con los parámetros presentados en la Tabla X9, Figura X26. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes ET2-CF-n se muestran en la Tabla X14.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a rotura (media muestral)
<b>ET2-CF-01</b>	670	1,282.36	0.1948	1,032.68
<b>ET2-CF-02</b>	671	1,283.34	0.1694	937.03
<b>ET2-CF-03</b>	647	1,238.83	0.1478	1,138.30
<b>ET2-CF-04</b>	514	983.57	0.1209	849.38
<b>ET2-CF-05</b>	456	871.90	0.1011	815.47
<b>ET2-CF-06</b>	494	945.42	0.1192	856.80

*Tabla X14. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del ensayo de los especímenes ET2-CF.*

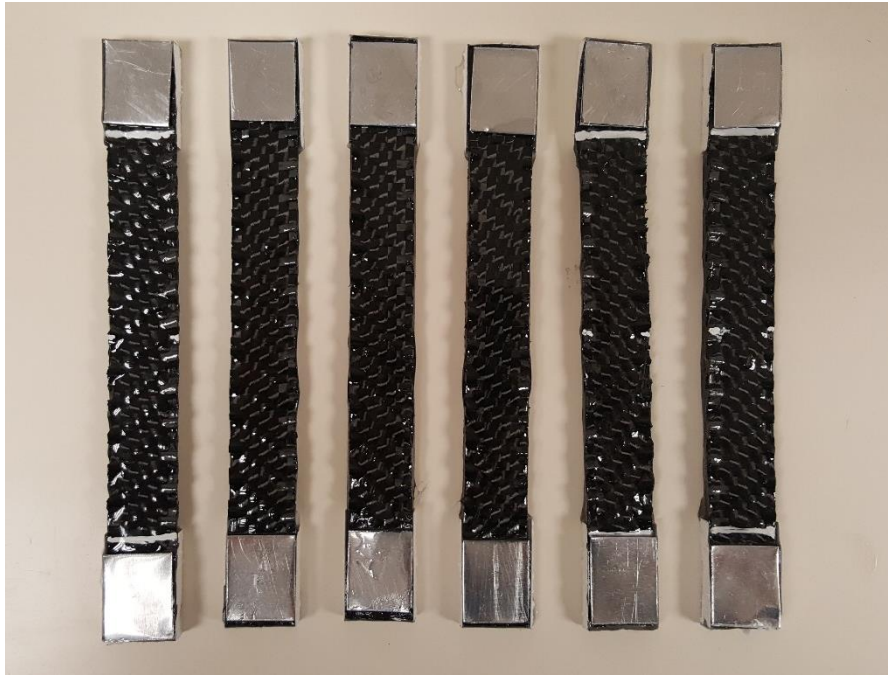


Figura X26. Especímenes de prueba ET2-CF-n para ensayo a la tensión.

### ***Comportamiento mecánico de Variable 3, especímenes ET2-CF.***

En el ensayo a esfuerzos de tensión de las muestras ET2-CF, el comportamiento de los especímenes fue ampliamente condicionado por la fase matriz, que funge como base de incrustación para la fase de refuerzo. A diferencia del ensayo a esfuerzos de compresión (EC-CF-n), en el ensayo a esfuerzos de tensión, la relación de resistencia entre el cartón y las fibras de carbono es ampliamente heterogéneo, por las elevadas prestaciones características de resistencia a esfuerzos de tensión de las fibras de carbono. En comparación a las Variables 1 y 2, la resistencia a esfuerzos de tensión del material compuesto se incrementó exponencialmente alcanzando  $1,010.36 \text{ kg/cm}^2$ .

Se presentó el comportamiento mecánico característico de los materiales compuestos, en el que ambas fases de materiales trabajan de manera conjunta para transmitir y resistir los esfuerzos de tensión, hasta que la fase matriz (cartón) supera su umbral de resistencia máxima y cede a la rotura; posteriormente, las fibras de carbono comienzan a resistir toda la magnitud de la carga aplicada hasta alcanzar su resistencia máxima como material en forma de tejido tipo Twill. El comportamiento de los especímenes de la Variable 3 a esfuerzos de tensión es semirrígido y dúctil. El comportamiento semirrígido se observó por la presencia de la resina epóxica, que incrementa la rigidez de ambas fases. Durante el ensayo la resina epóxica no lograba mantener las deformaciones de las fases de cartón y fibras de carbono, produciéndose

microfracturas en esta. El comportamiento dúctil se presentó una vez que la resina comenzó a fracturarse, permitiendo la deformación dúctil del cartón como material y en su disposición multicapa y en la deformación dúctil del tejido de fibras de carbono.

La susceptibilidad de rotura, en las zonas de unión del devanado multicapa helicoidal, disminuye notablemente; debido a que el aumento de la rigidez y la resistencia mecánica del material compuesto genera roturas predominantemente perpendiculares al eje axial (se observa que el tipo de falla por ruptura final depende de la fase que posee mayor rigidez, siendo el tejido de fibras de carbono). Las fallas se presentaron principalmente por la delaminación de la fase matriz de cartón en las áreas de sujeción de las mordazas, generando el deslizamiento del espécimen y evitando la total rotura de la fase de refuerzo, Figura X27. En algunos especímenes, en las áreas de sujeción de las mordazas, se produjo la desunión del cartón y las fibras de carbono en la zona de interface, indicando baja adherencia entre ambas fases.



*Figura X27. Espécimen de prueba ET2-CF-06. Las fallas por rotura de los especímenes tipo ET2-CF-n se presentaron dentro de los extremos de sujeción de las mordazas, por la delaminación entre capas de la fase matriz de cartón.*

### ***Propiedades mecánicas de Variable 3, especímenes ET2-CF.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de la Variable 3 (ET2-CF) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba ET2-CF, implementando el método de regresión polinomial de grado 5, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Se desarrolló una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando

los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular. Se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: ET2-CF-01, ET2-CF-02, ET2-CF-03, ET2-CF-04, ET2-CF-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión del muestreo ET2-CF se presentan en la Tabla X15.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión – Variable 3, especímenes ET2-CF</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>1,010.36 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a rotura (media muestral)	<b>963.73 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>25,921.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>259.21 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla X15. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de Variable 3, ensayo ET2-CF.*

En la Figura X28 se presenta las gráfica esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes ET2-CF. El comportamiento lineal y el límite elástico convencional de los especímenes ET2-CF es más regular en comparación a los de las Variables 1 y 2, así como el incremento de sus valores de esfuerzo; de manera similar a los especímenes a ensayos de compresión. En la zona plástica, el material compuesto (Variable 3) adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de tensión a una deformación de 0.013 cm/cm. Se percibe que los especímenes de prueba de la Variable 3 (ET2-CF) tienden a presentar un comportamiento menos previsible que las Variables 1 y 2, debido a la complejidad de manufactura del material compuesto por un método de estratificación manual.



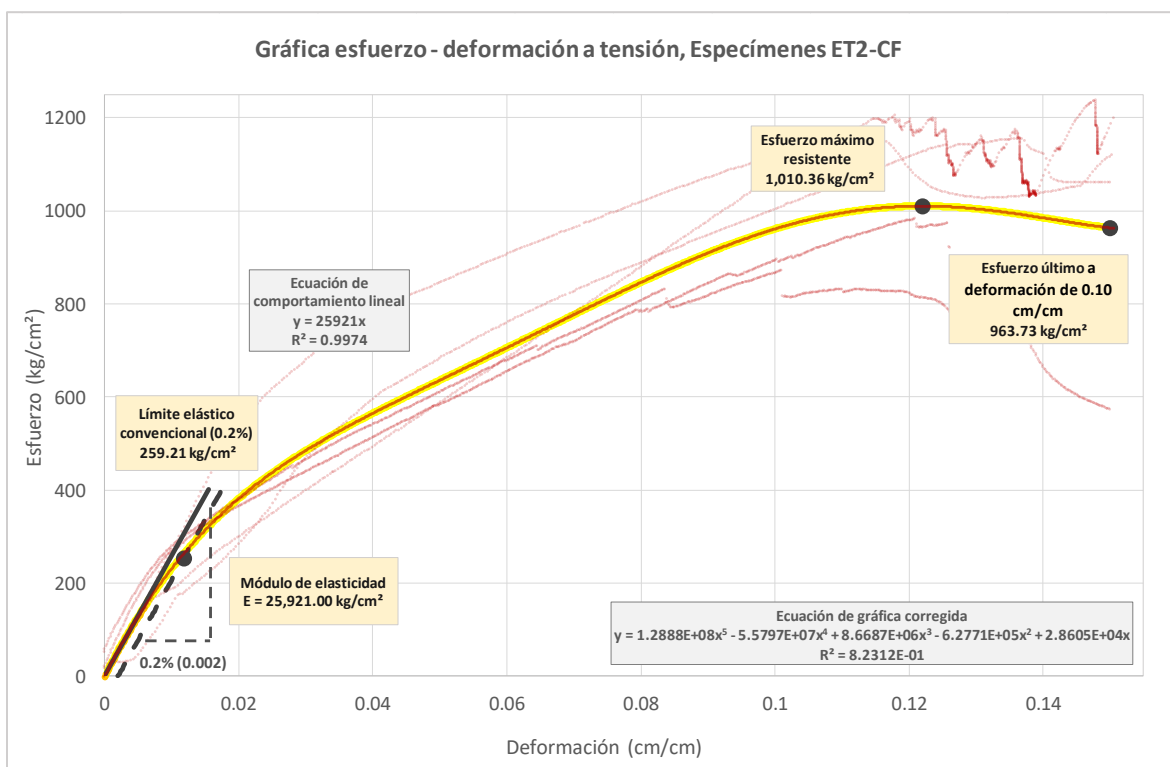


Figura X28. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (material compuesto), ensayo EC2-CF.

### Análisis comparativo de variables – Ensayo a esfuerzos de tensión ET2.

Por medio del análisis comparativo de las variables se puede determinar el comportamiento y las propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de las fases constituyentes del material compuesto, con el objetivo de establecer el grado de refuerzo que le otorga la fase dispersa (tejido de fibras de carbono 12K Twill) a la fase matriz de cartón. En el ámbito de la Arquitectura, los elementos estructurales conformados por cartón no son implementados para resistir esfuerzos mecánicos a tensión; por la limitada de rigidez y resistencia del material para ser utilizado en elementos estructurales que trabajen a dichos esfuerzos. Debido a esto, surge la necesidad de emplear un material que funja como fase de refuerzo, para conformar un material compuesto que pueda ser implementado en estructuras que demanden resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, ejemplo de ello son las armaduras planas y las estructuras espaciales.

El comportamiento mecánico de los especímenes ET2-CA-n (Variable 1) fue de tipo dúctil, al presentar una breve deformación elástica en comparación con una amplia deformación plástica. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, predisuestas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), observándose por medio del efecto prolongado de delaminación



multicapa, aludiendo a una adherencia entre capas relativamente baja. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo ET2-CA-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 143.45 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 488.35 kg/cm<sup>2</sup>.

Los especímenes de prueba ET2-CR-n (Variable 2) presentaron un comportamiento semirrígido y dúctil. La aplicación de la resina epóxica en las capas exteriores como agente protector, permitió la conformación de un material con mayor uniformidad en su superficie al rellenar las aristas de unión del devanado multicapa helicoidal, efecto que influyó en la obtención de valores de resistencia mayores. Al inicio del ensayo de los especímenes de la Variable 2, estos se mostraron con un comportamiento semirrígido, al estar restringidas las fibras de celulosa de la capa externa por la resina epóxica (de manera similar a la madera natural con las fibras de celulosa contenidas en la lignina); una vez fracturada la capa externa, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. La aplicación principal de la resina epóxica sobre el cartón fue como agente protector de barrera ante los efectos de intemperismo; por medio de los ensayos se determinó que la incorporación de la resina epóxica logró incrementar la resistencia de la fase de cartón a esfuerzos de tensión. En los especímenes del muestreo ET2-CR-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 216.91 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 51% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 544.69 kg/cm<sup>2</sup>. Cabe mencionar que, con la aplicación de una mayor cantidad de resina en la fase de cartón, así como la uniformidad de esta en el elemento, se obtendrán valores de resistencia a esfuerzos de tensión más elevados y una mayor rigidez del material.

Los especímenes de prueba ET2-CF-n (Variable 3) comprenden el material compuesto del proyecto de investigación, constituidos a base de una matriz de cartón reforzada por un tejido de fibras de carbono 12K Twill. La unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de tensión, elevando exponencialmente los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes. En los especímenes ET2-CF-n, el comportamiento mecánico y las fallas fueron de tipo semirrígido y dúctil. Como se observó en el ensayo de los especímenes de la Variable 2, la resina epóxica genera un aumento en la rigidez del material, proporcional a su cantidad en masa; más al ejercer un aumento de presión, la resina no tolera los umbrales de deformación de la fase matriz de cartón y la fase de refuerzos de fibras de carbono, por lo que, la resina al presentar microfracturas, el comportamiento del material compuesto se torna dúctil al mostrar una amplia deformación plástica. Es importante mencionar, que en la conformación del material compuesto se genera un espesor de pared mayor dando por resultado mayor rigidez en los especímenes de prueba, efecto que disminuyó casi completamente la rotura por el devanado multicapa helicoidal. En los especímenes del muestreo ET2-CF-n se obtuvo un

esfuerzo máximo resistente de 1,010.36 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 604% en relación con la Variable 1 y del 366% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 25,921.00 kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla X16, Figura X29, se presentan las propiedades mecánicas y las gráficas esfuerzo - deformación del ensayo a esfuerzos de tensión de las tres variables experimentadas. Se observa el aumento de la rigidez y el exponencial incremento de la resistencia mecánica de la fase matriz de cartón con la incorporación de las fibras de carbono como refuerzo para el material compuesto.

Propiedades mecánicas de variables a esfuerzos de tensión			
	Muestreo ET2-CA Variable 1	Muestreo ET2-CR Variable 2	Muestreo ET2-CF Variable 3
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>143.45 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>216.91 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>1,010.36 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>488.35 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>544.69 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,921.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>28.32 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>26.68 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>259.21 kg/cm<sup>2</sup></b>

Tabla X16. Comparación de valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de tensión de las tres variables experimentadas.

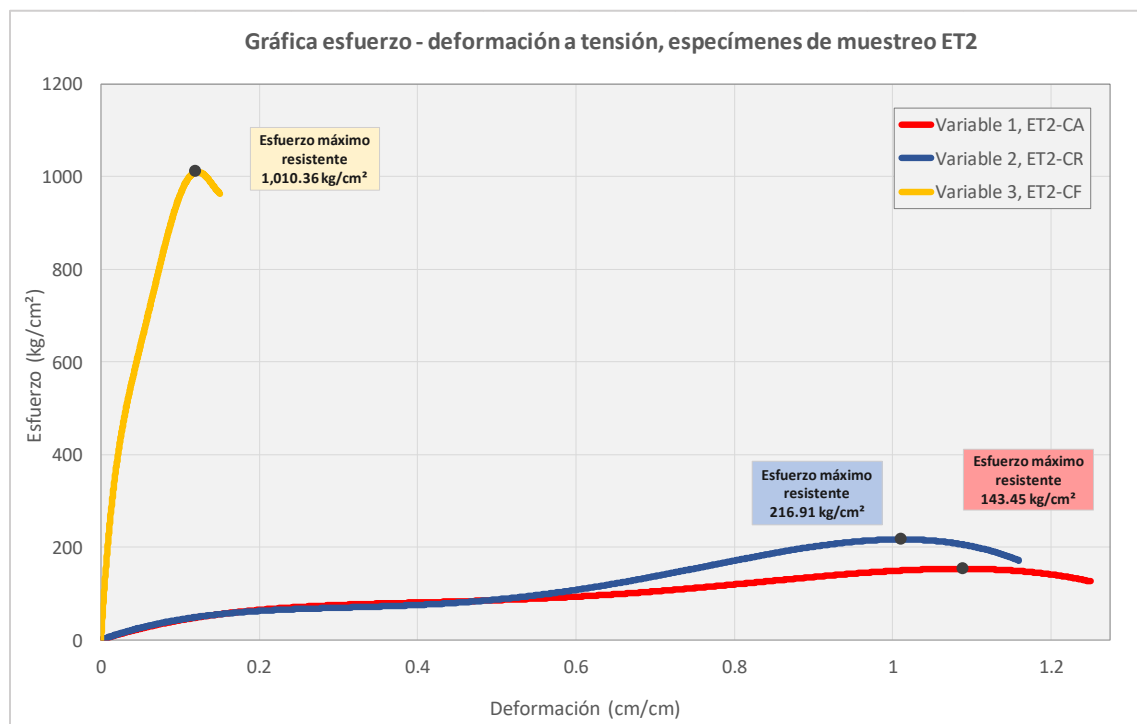


Figura X29. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de tensión de las tres variables experimentadas, muestreo ET2.

## **Capítulo IV: Ensayo de resistencia a la compresión EC2 - Norma ASTM E9-89a (Métodos de prueba estándar de ensayos de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente)**

### **Especificaciones de ensayo – especímenes de prueba**

Definición: Se utilizan los parámetros designados en la norma E9-89a siguiendo el tipo de normativa con base en elementos tubulares estructurales metálicos de las normas A500 y A370, para determinar los valores de esfuerzo del material ante cargas a compresión. Los métodos de prueba incluyen los instrumentos, especímenes y procedimientos para pruebas de compresión de carga axial para materiales metálicos a temperatura ambiente. Los especímenes son sometidos a una carga axial a compresión incrementada. Se registran los valores de carga y deformación para determinar las propiedades del material.

Las máquinas de prueba utilizadas para el ensayo de compresión deben cumplir con las especificaciones establecidas en la norma ASTM E4. Para máquinas universales con un único espacio de prueba, la calibración debe ser realizada para compresión.

Velocidad de prueba: La velocidad de prueba no debe ser superior a la necesaria para obtener valores precisos. Se utilizará el valor de velocidad de prueba de 2.5 mm por minuto, valor designado como idóneo con base en ensayos realizados previamente.

Parámetros de los especímenes de prueba: Se recomienda que los especímenes a compresión tengan forma cilíndrica; en el caso del proyecto la geometría corresponderá según la aplicación práctica del producto. Los especímenes pueden ser clasificados por su longitud en tres tipos: especímenes cortos (recomendado para aleaciones), especímenes medios (recomendado para metales, se determina resistencia mecánica), especímenes largos (recomendado para definir módulo de elasticidad). La mejor relación de longitud/diámetro es de 1.5/1 – 2/1 (L/D). Las probetas para el ensayo de compresión del proyecto presentan una relación de 2/1 (L/D), Imagen 17. Los especímenes deben poseer una superficie de apoyo plana correctamente careada en ambos extremos para que la carga aplicada sea distribuida de manera uniforme. El número de probetas recomendado para determinar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión de un material es de 5 a 10.



*Figura X30. Muestreo de especímenes de prueba EC-CR-n y EC-CF-n, para ensayo de esfuerzos a compresión EC2.*

Determinación de propiedades a compresión: A partir del ensayo se obtienen los valores del material analizado de límite de elasticidad ( $\text{kg/cm}^2$ ), esfuerzo máximo resistente a la compresión, esfuerzo último a la compresión, desplazamiento, módulo de elasticidad ( $\text{kg/cm}^2$ ) y gráfica esfuerzo – deformación.

En la Figura X31 se presentan las dimensiones de las probetas que serán sometidas al ensayo de compresión. La superficie de apoyo de las probetas y de los platos de sujeción de la máquina deben estar lisos y correctamente calibrados para garantizar la distribución uniforme de la carga. Las dimensiones de diámetro interno, diámetro externo y espesor han sido determinadas según las características de los materiales (matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill). En la Tabla X17 se especifican las dimensiones de las probetas para el ensayo de compresión.

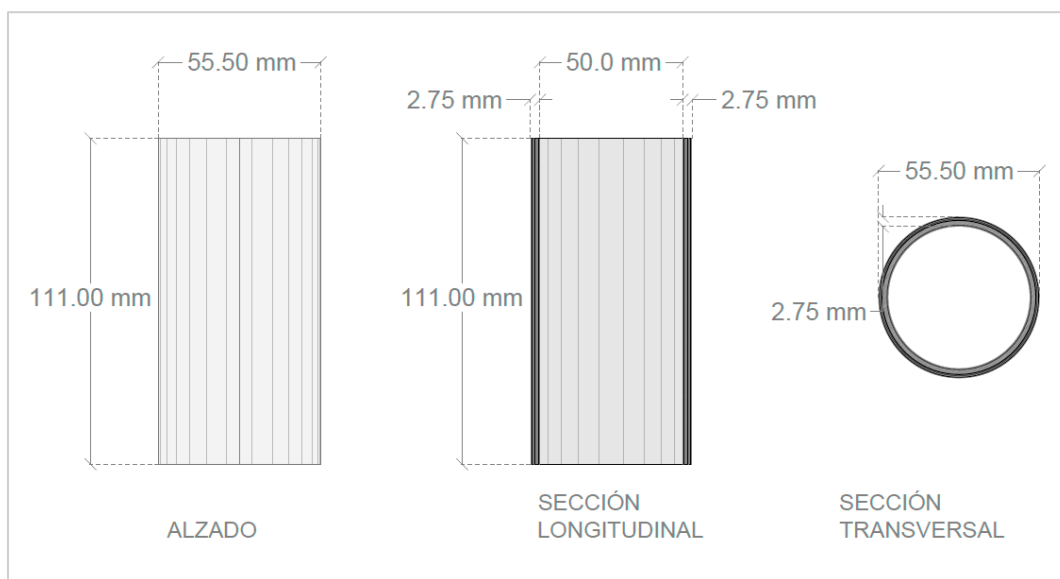


Figura X31. Dimensiones de probetas para ensayo a compresión, material compuesto con matriz de cartón y refuerzo de fibras de carbono.

Especificaciones de probetas para ensayo a compresión, norma ASTM E9	
Composición	Material compuesto con matriz de cartón SUS-Kraft y refuerzo de fibras de carbono tejido 12K Twill.
Estructura	Tubos de sección cilíndrica; materiales dispuestos en capas.
Dimensiones específicas (por material)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capa de cartón de 1.5 mm de espesor, dispuesta en forma de espiral con un ángulo de 41°, lámina orientada en MD (dirección de máquina), marca Ratioform.</li> <li>• Capa de fibras de carbono tejido tipo Twill de 12K, espesor de 0.6 mm, marca Quintum.</li> <li>• Resina epóxica adhesiva en interface y recubrimientos marca Resineco modelo FV.</li> </ul>
Dimensiones de probeta de material compuesto (tubo cilíndrico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro interior: 50 mm.</li> <li>• Espesor de pared: 2.75 mm.</li> <li>• Diámetro exterior: 55.50 mm.</li> <li>• Área de la sección: 455.73 mm<sup>2</sup>.</li> <li>• Longitud: 111 mm.</li> </ul>
Velocidad de ensayo	2.5 milímetros por minuto.

Nomenclatura de probetas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EC2-CA-n (tubo de cartón)</li> <li>• EC2-CR-n (tubo de cartón con resina)</li> <li>• EC2-CF-n (tubo de cartón con fibras de carbono y resina)</li> </ul>
--------------------------	---

Tabla X17. Especificaciones de probetas para ensayo a compresión EC2 del material compuesto, norma ASTM E9.

## Análisis de resultados

### Resultados de Variable 1 – Especímenes de prueba EC2-CA-n.

El ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión de la Variable 1 (CA-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de cartón, con el fin de observar las propiedades mecánicas a la compresión del material que funge como matriz en el material compuesto propuesto en la investigación. Se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de seis especímenes de prueba con la denominación EC2-CA-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS sin aditamentos o aditivos) con los parámetros presentados en la Tabla X17, Figura X32. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC2-CA-n se muestran en la Tabla X18. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó una deformación límite de 0.10 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

Especímen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.10 mm/mm)
EC2-CA-01	213	87.79	0.0631	73.52
EC2-CA-02	206	85.02	0.0543	71.79
EC2-CA-03	198	81.96	0.0708	74.02
EC2-CA-04	205	84.56	0.0612	76.03
EC2-CA-05	209	86.28	0.0643	67.18
EC2-CA-06	199	82.25	0.0854	76.79

Tabla X18. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC2-CA.



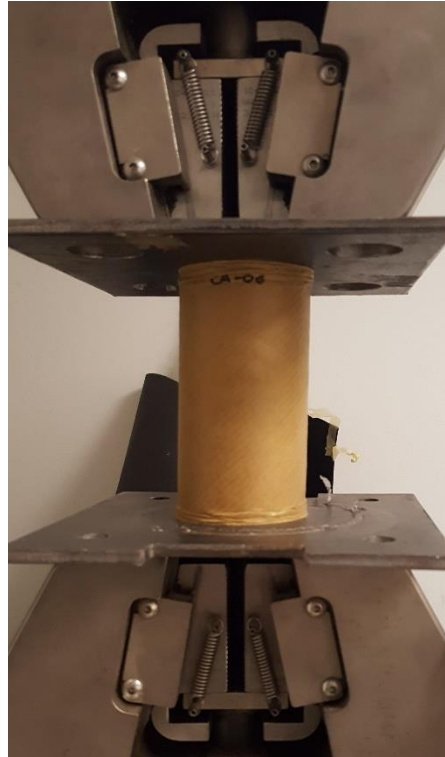
*Figura X32. Especímenes de prueba EC2-CA-n para ensayo a la compresión.*

### ***Comportamiento mecánico de Variable 1, especímenes EC2-CA.***

En el ensayo a esfuerzos de compresión de las muestras EC2-CA fueron identificados patrones generales que condicionaron el comportamiento mecánicos de los especímenes y sus valores de resistencia. De manera conjunta, en los especímenes se presentó un comportamiento del tipo dúctil, al producirse deformación plástica sin fractura; igualmente, se observó una susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal (generado en la fabricación de los tubos de cartón), cuyas aristas de unión no mantienen un elemento geométrico uniforme. Durante la ejecución del ensayo de los especímenes de prueba, se presentó el aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial, desde las superficies de apoyo hacia el centro; exhibido primordialmente desde las superficies de apoyo del cabezal desplazable, Figura X33.

Para el ensayo de especímenes a esfuerzos de compresión, es necesario un careo apropiado de las superficies de apoyo. De ser insuficiente, se genera un aplastamiento no uniforme con áreas de sobrecarga, lo cual propicia un plegado discontinuo y zonas con pandeo local. La distribución no

uniforme de la carga en la sección de los especímenes, produce el desplazamiento del eje axial de su centroide, menor estabilidad y posteriormente fallas dúctiles de plegado discontinuo; comportamiento traducido en el remetimiento de las secciones y en la obtención de valores menores de resistencia a la compresión.



*Figura X33. Especimen EC2-CA-06. En los extremos se observa el aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial.*

En los especímenes que se obtuvo mayores valores de resistencia a la compresión, se observa un pandeo global, de manera que la carga aplicada fue transmitida uniformemente desde la base (cabezal desplazable) hacia el apoyo superior a lo largo del eje axial. En algunos especímenes se presentó una delaminación entre capas debido a defectos de manufactura en la fabricación de los tubos de cartón (baja unión entrecapas), provocando áreas de sobrecarga, lo que dio lugar al desprendimiento de las capas externas.

#### ***Propiedades mecánicas de Variable 1, especímenes EC2-CA.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de la Variable 1 (EC2-CA) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba EC2-CA, implementando el método de regresión polinomial de grado 5, con los



softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Se desarrolló una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular. Se utilizaron los valores de los seis especímenes de prueba: EC2-CA-01, EC2-CA-02, EC2-CA-03, EC2-CA-04, EC2-CA-05, EC2-CA-06. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC2-CA se presentan en la Tabla X19.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 1, especímenes EC2-CA</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>82.61 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a una deformación de 0.10 cm/cm	<b>69.45 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>2,332.40 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>76.96 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla X19. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 1, ensayo EC2-CA.*

En la Figura X34 se presenta la esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes EC2-CA. Los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. Cabe destacar, que debido a las condiciones de microestructura del material (fibras de celulosa entrelazadas), no presenta una deformación elástica completamente regular. Posterior al límite elástico convencional, se establece su zona plástica, a partir de la cual el material presenta una deformación plástica, es decir, irreversible.

En la zona plástica, el material de la Variable 1 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de compresión a una deformación de 0.05 cm/cm. Debido a las características de microestructura del cartón (material fibroso), se produce un reacomodo repetitivo de las fibras de celulosa, llegando a adquirir un aplastamiento por plegado continuo y, por lo tanto, una zona plástica muy amplia sin una disminución de resistencia considerable. Se presenta un comportamiento plástico de larga permanencia, debido a las

características de microestructura del cartón (fibras de celulosa entrelazadas), con una descenso de resistencia ligeramente mayor en los especímenes EC2-CA.

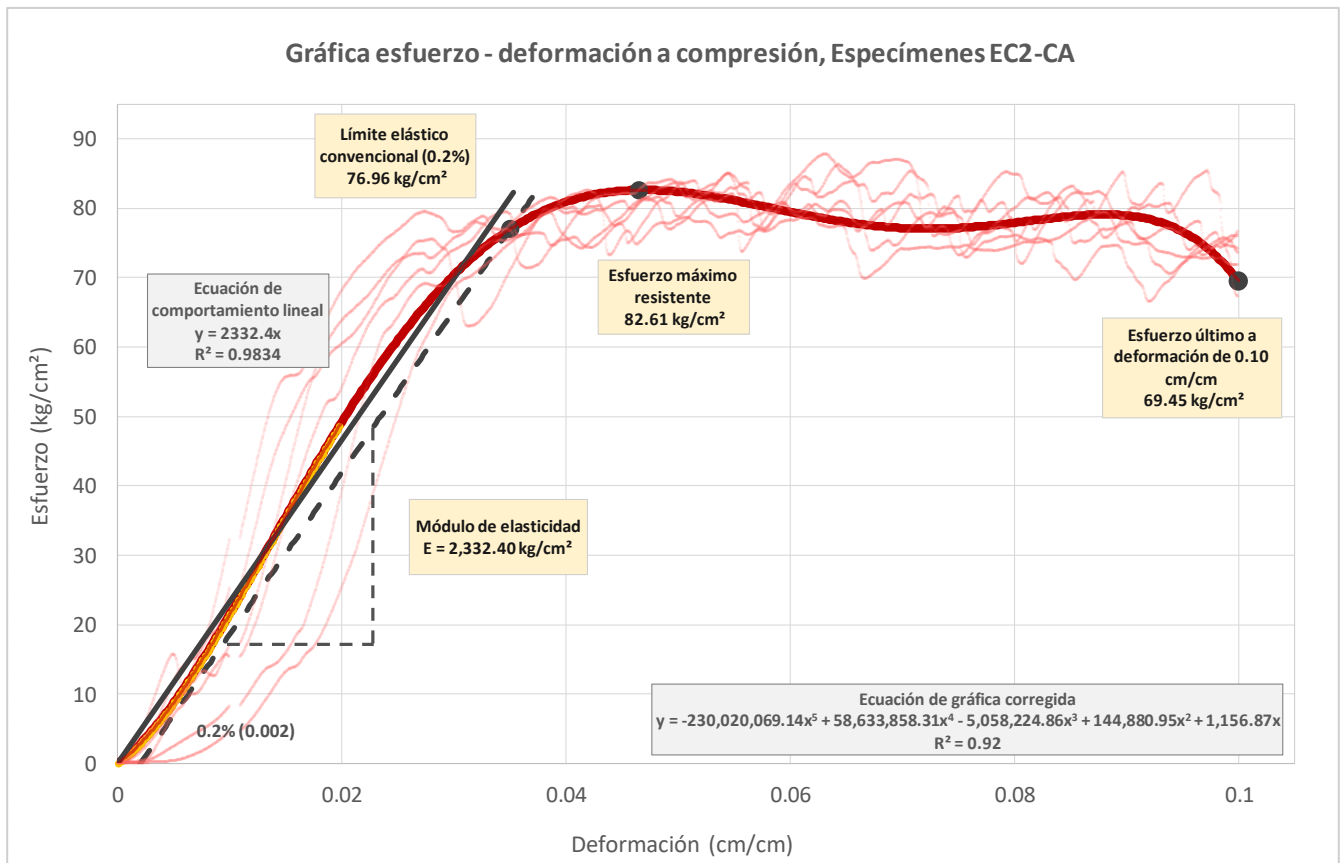


Figura X34. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 1, ensayo EC2-CA.

### Resultados de Variable 2 – Especímenes de prueba EC1-CR-n, EC2-CR-n.

El ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión de la Variable 2 (CR-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de cartón con un recubrimiento interno y externo de resina epóxica. El uso del recubrimiento de resina epóxica aplicado sobre el cartón se ha establecido como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo. Se observó que la aplicación de la resina epóxica sobre el cartón modifica las propiedades físicas de las capas externas, tornando al material más rígido y frágil, suceso que condicionó el comportamiento mecánico del material.

Se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de seis especímenes de prueba con la denominación EC2-CR-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV) con los parámetros presentados en la Tabla X17, Figura X35. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión

de los especímenes EC2-CR-n se muestran en la Tabla 29. X20. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó una deformación límite de 0.045 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

Especimen de prueba	Carga máxima soportada (kg)	Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)	Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.045 mm/mm)
EC2-CR-01	223	92.07	0.0450	92.07
EC2-CR-02	229	94.17	0.0388	92.28
EC2-CR-03	227	93.33	0.0440	93.00
EC2-CR-04	225	92.83	0.0450	92.83
EC2-CR-05	225	92.75	0.0434	86.95
EC2-CR-06	216	89.18	0.0332	83.38

Tabla X20. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC2-CR.



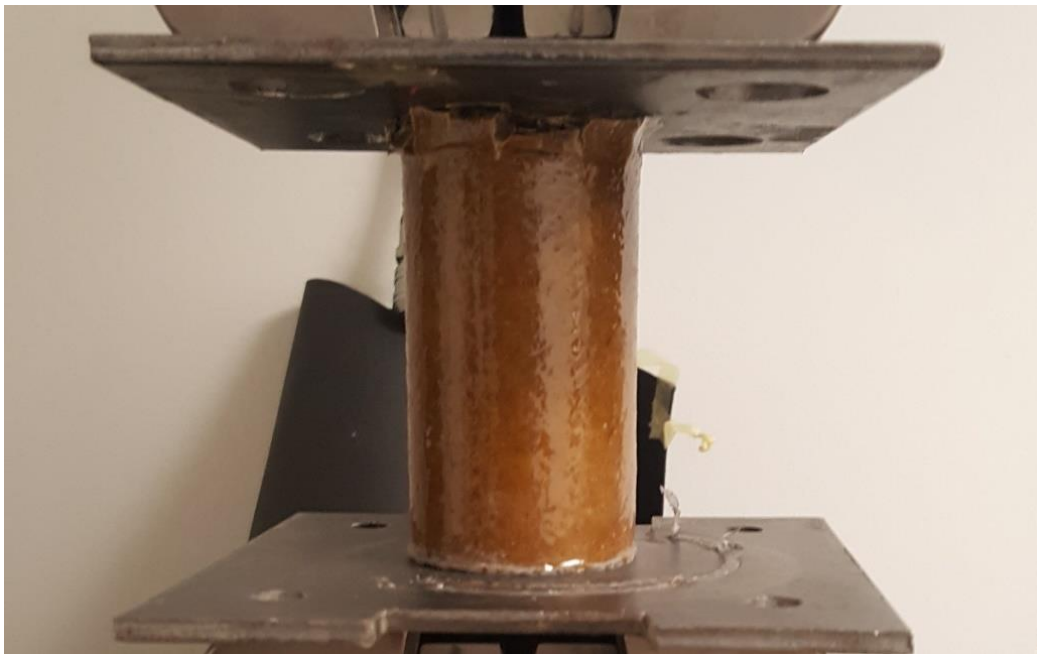
Figura X35. Especímenes de prueba EC2-CR-n para ensayo a la compresión.

### **Comportamiento mecánico de Variable 2, especímenes EC2-CR.**

En el ensayo a esfuerzos de compresión de las muestras EC2-CR fueron identificados patrones generales que condicionaron el comportamiento mecánicos de los especímenes y sus valores de resistencia. De manera conjunta, en todos los especímenes se presentó un comportamiento de tipo dúctil a semirrígido,

ya que algunos especímenes presentaron deformación plástica sin fractura, mientras que otros exhibieron fracturas de tipo frágil en algunas zonas del elemento. En comparación a los especímenes tipo EC2-CA de la Variable 1, se observó una disminución de la susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal, debido que el recubrimiento de resina epóxica aumentó la rigidez de las capas externas y, relleno las aristas de unión, conformando un elemento geométrico con mayor uniformidad. El aumento de la rigidez de los especímenes, produjo una transmisión de los esfuerzos más eficiente, lo que resultó en la disminución de la deformación del elemento y del efecto de áreas de sobrecarga por careo insuficiente y, la reducción del aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial.

Los especímenes que obtuvieron valores mayores de resistencia a esfuerzos de compresión mostraron un ligero aplastamiento en las superficies de contacto y escasa deformación a lo largo del elemento. En estos especímenes la transmisión de los esfuerzos se mantuvo uniforme a lo largo del eje axial generando un ligero pandeo global. En los especímenes que se obtuvo menor resistencia a esfuerzos de compresión, se presentó delaminación de las capas externas que poseían mayor rigidez por el recubrimiento de resina epóxica, por lo que, al desprenderse estas capas, las capas internas estuvieron sujetas al aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial; efecto observado en los especímenes de prueba compuestos sólo por cartón de la Variable 1 (EC2-CA), Figura X36.



*Figura X36. Especimen de prueba EC2-CR-02. En la parte superior se observa el efecto de delaminación de las capas externas recubiertas por resina epóxica.*

### ***Propiedades mecánicas de Variable 2, especímenes EC2-CR.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de la Variable 2 (EC2-CR) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba EC2-CR, implementando el método de regresión polinomial de grado 5, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Se desarrolló una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular. En el análisis estadístico del muestreo EC2-CR se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: EC2-CR-01, EC2-CR-02, EC2-CR-03, EC2-CR-04, EC2-CR-06. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC2-CR se presentan en la Tabla X21.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 2, especímenes EC2-CR</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>99.24 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a una deformación de 0.045 cm/cm	<b>99.24 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>3,995.50 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>85.90 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla X21. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 2, ensayo EC2-CR.*

En la Figura X36 se presenta las gráfica esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes EC2-CR. Los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.2%. El comportamiento lineal y el límite elástico convencional de los especímenes EC-CR son muy similares a los de la Variable 1, con un ligero incremento en los valores de esfuerzo; debido al aumento de rigidez de los especímenes por la aplicación de la resina epóxica como recubrimiento.

En la zona plástica, el material de la Variable 2 adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de compresión a una deformación de 0.045 cm/cm. En su microestructura, el efecto de aplastamiento por plegado continuo de las fibras de celulosa se produce ligeramente aplazado en comparación a los especímenes de la Variable 1, a causa de que los elementos poseen mayor rigidez; una vez que ocurre el desprendimiento de las capas externas que poseen la resina epóxica de las capas externas, el efecto de aplastamiento por plegado continuo, sin la disminución de resistencia considerable, se presenta de manera análoga a los especímenes de la Variable 1. El valor del módulo de elasticidad aumentó un 171% (EC2-CR) con respecto a los especímenes de la Variable 1; debido al aumento de la rigidez de los elementos por la incorporación del recubrimiento de resina epóxica.

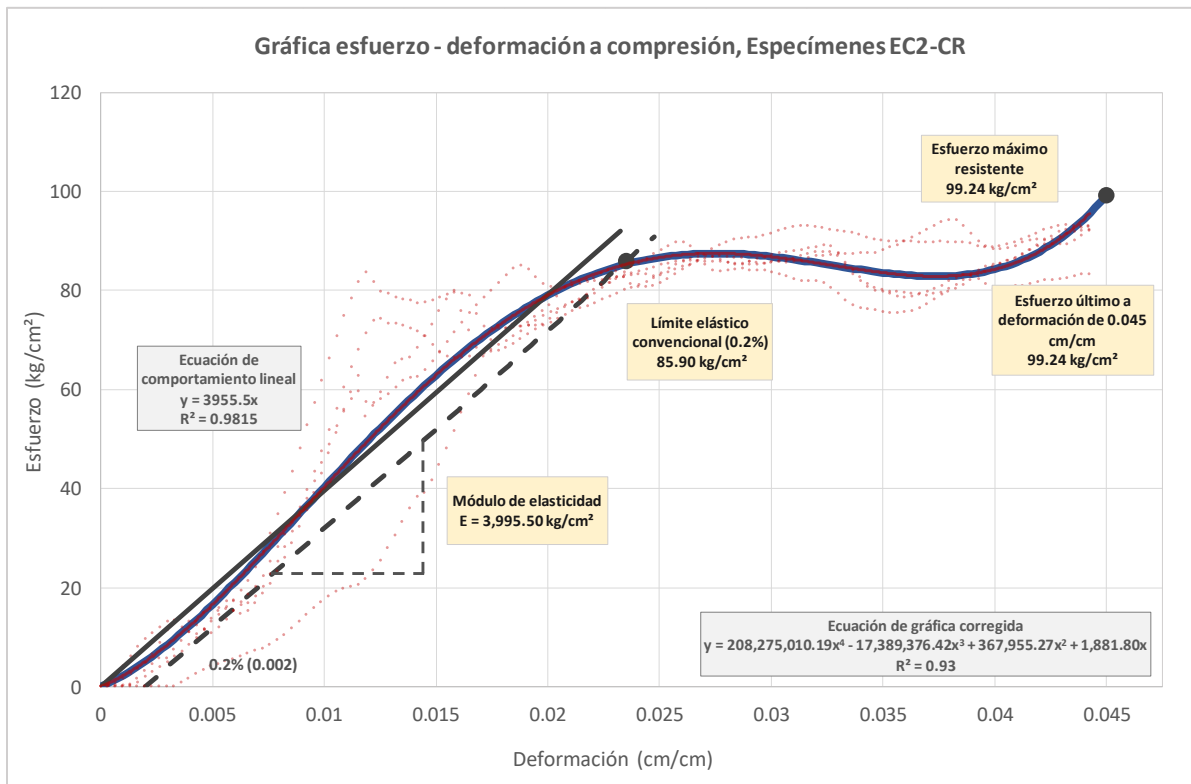


Figura X36. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 2, ensayo EC2-CR.

### Resultados de Variable 3 – Especímenes de prueba EC2-CF-n.

El ensayo de resistencia a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (CF-n) consiste en someter a prueba los especímenes con geometría tubular constituidos a base de una matriz de cartón reforzada con un tejido tipo Twill de fibras de carbono 12K, unido por medio de una resina epóxica, que funge como agente

aglomerante en las zonas de interface. Al igual que en la Variable 2, el interior del tubo cilíndrico fue recubierto con resina epóxica como agente protector para el cartón ante los efectos de intemperismo.

La Variable 3 consiste en el material compuesto planteado para el proyecto de investigación, con el objetivo de optimizar las propiedades mecánicas del cartón y de las fibras de carbono para generar un material compuesto de baja densidad con buena resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión para estructuras ligeras de gran claro. Los valores de resistencia a esfuerzos de compresión obtenidos del ensayo son comparados más adelante con las Variables 1 y 2, y con la madera como material tradicional de la industria de la Construcción.

Se realizó el ensayo a esfuerzos de compresión de seis especímenes de prueba con la denominación EC2-CF-n (tubos cilíndricos de cartón Kraft SUS con resina epóxica Resineco FV y tejido de fibras de carbono 12K Twill) con los parámetros presentados en la Tabla X17, Figura X37. Los valores obtenidos del ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes EC2-CF-n se muestran en la Tabla X22. En la obtención de los valores de las propiedades mecánicas se determinó a una deformación límite de 0.021 mm/mm, para poder efectuar la comparación entre los especímenes de prueba.

<b>Especimen de prueba</b>	<b>Carga máxima soportada (kg)</b>	<b>Esfuerzo máximo resistente a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformación en esfuerzo máximo (mm/mm)</b>	<b>Esfuerzo último a compresión (establecido a deformación de 0.045 mm/mm)</b>
<b>EC2-CF-01</b>	1,431	314.00	0.0114	250.81
<b>EC2-CF-02</b>	1,705	374.13	0.0148	318.39
<b>EC2-CF-03</b>	2,593	568.98	0.0166	531.46
<b>EC2-CF-04</b>	1,054	231.28	0.0167	207.36
<b>EC2-CF-05</b>	1,413	310.05	0.0129	282.84
<b>EC2-CF-06</b>	2,260	495.91	0.0135	395.41

*Tabla X22. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del ensayo de los especímenes EC2-CF.*



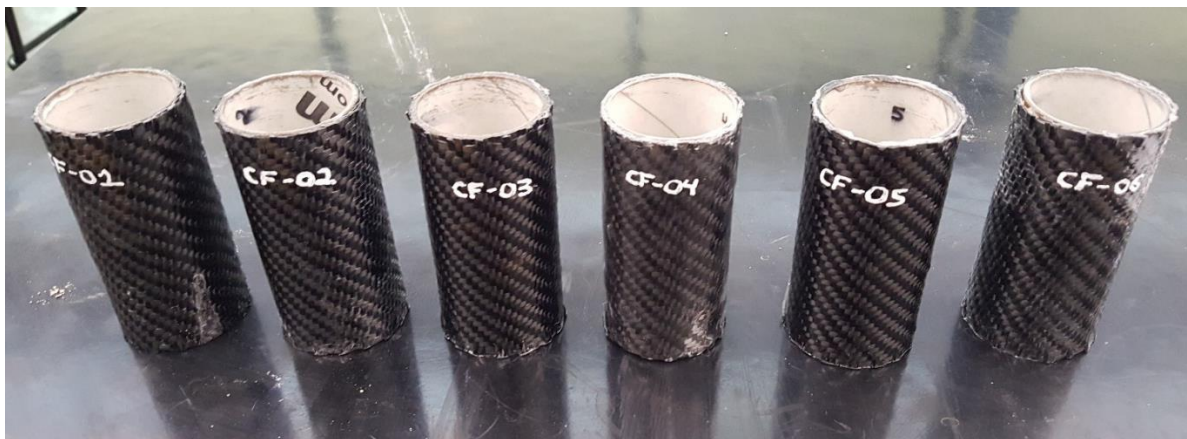


Figura X37. Especímenes de prueba EC2-CF-n para ensayo a la compresión.

### ***Comportamiento mecánico de Variable 3, especímenes EC2-CF.***

En el ensayo a esfuerzos de compresión de las muestras EC2-CF fueron identificados patrones generales que condicionaron el comportamiento mecánico de los especímenes y sus valores de resistencia. La conformación del material compuesto por medio de capas de cada fase (matriz, refuerzo, agente aglomerante) incrementó las áreas de sección, lo que generó un aumento notable en la rigidez de los elementos, propiciando fallas de tipo frágil. Debido a la elevada rigidez de los elementos, la susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal (observada en las Variables 1 y 2) es casi nula. En el interior de los tubos cilíndricos se hacen notables las fallas de tipo frágil, presentes al centro, observadas como un efecto de plegado perpendicular al eje axial del elemento, Figura X38.

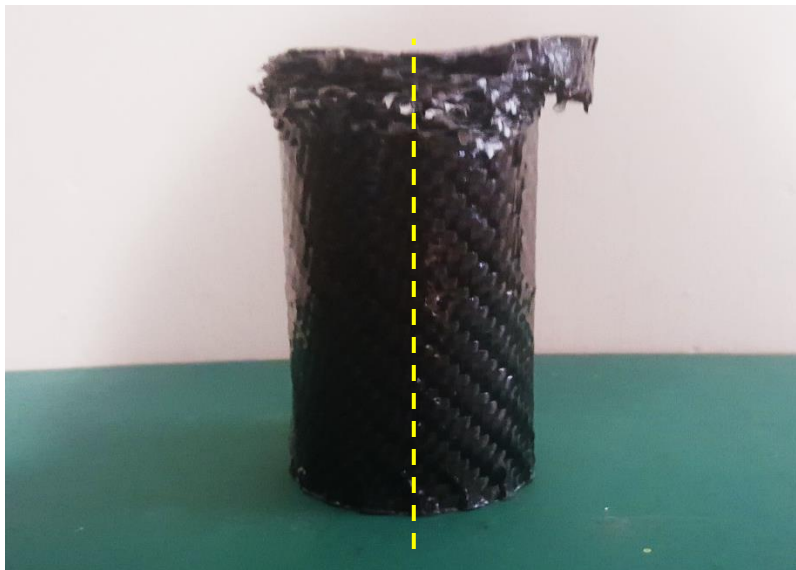


Figura X38. Especímen de prueba EC2-CF-02. Debido a la elevada rigidez del material compuesto, el elemento presenta escasa deformación. Al interior del tubo se observa la deformación de la fase matriz de cartón que sirve como base para el tejido de fibras de carbono.



La unión de la capa de fibras de carbono, en forma de tejido, sobre la matriz de cartón, actúa como cinturón de contención, restringiendo la deformación por aplastamiento continuo del elemento, y, por lo tanto, manteniendo la distribución de los esfuerzos de manera uniforme a lo largo del eje axial, lo que permite un notable incremento en la resistencia a la compresión en comparación a las Variables 1 y 2.

Cabe destacar que, el comportamiento mecánico del material compuesto y sus valores de resistencia, están condicionados por la calidad de manufactura de los especímenes de prueba, haciendo énfasis en la importancia de una correcta adherencia de las capas en la zona de interface (unión entre capas de la fase de refuerzo con la fase matriz), el careo de las superficies de contacto y, en menor medida, la distribución uniforme de la resina epoxi en el elemento. Al haber una correcta unión entre capas de las fases componentes, estas trabajan en conjunto para transmitir los esfuerzos a compresión de manera más eficiente, adquiriendo valores de resistencia mayores y deformaciones menores. Cabe mencionar que, cuando la fase matriz cede por aplastamiento continuo, la capa de tejido de fibras de carbono comienza a desprenderse de esta y a fracturarse desde las superficies de apoyo, al no poder asimilar la deformación plástica del cartón y al obstaculizarse con el resto del tejido a lo largo del eje axial, Figura X39.



*Figura X39. Especímen EC2-CF-03. Desprendimiento de la capa externa de tejido de fibras de carbono sobre la capa matriz de cartón.*

Los elementos que obtuvieron valores de resistencia mayores a esfuerzos de compresión presentaron una ligera deformación por pandeo global hasta llegar a la fractura de tipo frágil al centro; mientras que en los especímenes que se obtuvo menor resistencia, se exhibió el efecto de desprendimiento entre capas y el desplazamiento de la carga sobre el eje axial del elemento.

***Propiedades mecánicas de Variable 3, especímenes EC2-CF.***

Las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (EC-CF) fueron calculadas por medio del análisis estadístico de los valores de esfuerzo y deformación, obtenidos del ensayo de los especímenes de prueba EC2-CF, implementando el método de regresión polinomial de grado 3, con los softwares de procesamiento de datos Excel y Past. Fue desarrollada una gráfica de esfuerzo – deformación, seleccionando los especímenes de prueba con un comportamiento mecánico regular.

En el análisis estadístico del muestreo EC2-CF se utilizaron los valores de cinco especímenes de prueba: EC2-CF-01, EC2-CF-02, EC2-CF-03, EC2-CF-04, EC2-CF-05. Los valores estadísticos obtenidos de las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión del muestreo EC2-CF se presentan en la Tabla X23.

<b>Propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión – Variable 3, especímenes EC2-CF</b>	
Esfuerzo máximo resistente	<b>341.67 kg/cm<sup>2</sup></b>
Esfuerzo último a una deformación de 0.021 cm/cm	<b>298.75 kg/cm<sup>2</sup></b>
Módulo de elasticidad (E)	<b>25,036.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
Límite elástico convencional (0.2%)	<b>337.98 kg/cm<sup>2</sup></b>

*Tabla X23. Valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de Variable 3, ensayo EC2-CF.*

En la Figura X40 se muestra la gráfica esfuerzo – deformación del análisis estadístico de los especímenes EC2-CF. Los especímenes exhibieron una zona elástica aparente, ejemplificada por un comportamiento lineal desde el inicio del ensayo hasta la determinación del límite elástico convencional a una deformación del 0.21%. El comportamiento lineal y el límite elástico convencional de los especímenes EC2-CF son más regulares en comparación a los de las Variables 1 y 2, debido a la elevada rigidez del material compuesto y a la geometría de los especímenes (mayor espesor de la sección por la unión de las

fases). En la zona plástica, el material compuesto (Variable 3) adquiere su mayor resistencia a esfuerzos de compresión a una deformación de 0.017 cm/cm.

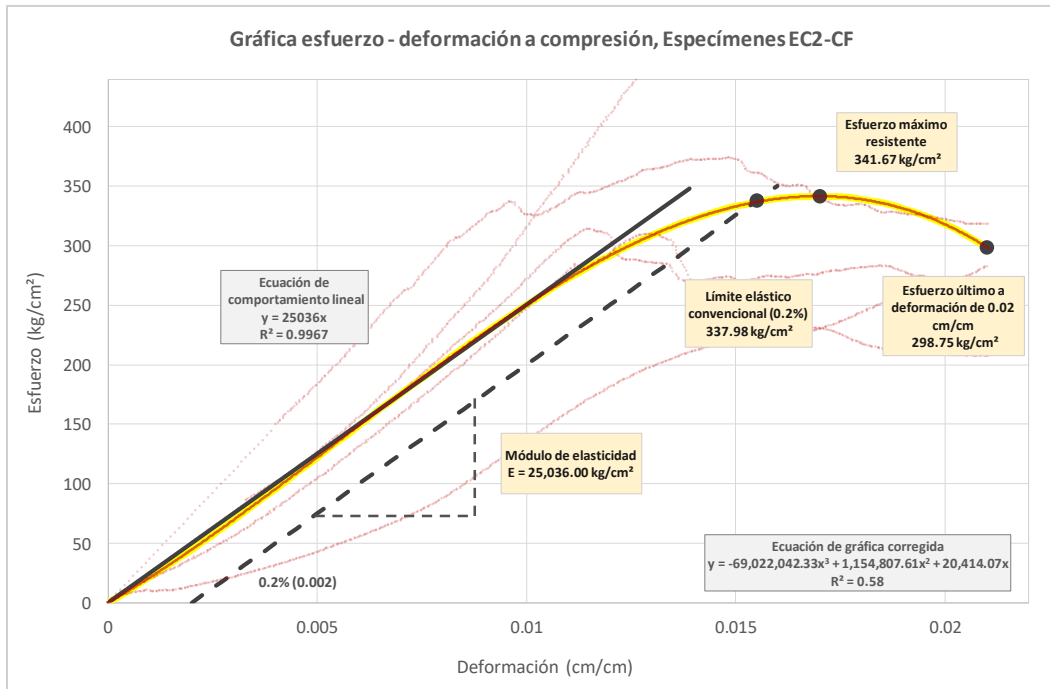


Figura X40. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de la Variable 3 (material compuesto), ensayo EC2-CF.

De manera general, se observa que el comportamiento mecánico de los especímenes de la Variable 3 (EC-CF) es menos previsible que las Variables 1 y 2, por el aumento de factores que influyen en la conformación del material compuesto; como son, la manufactura de los especímenes por el método de estratificación manual, la precisión del espesor de las capas de las fases componentes y/o la ausencia de oquedades en las zonas de interface. En la Variable 3, el valor del módulo de elasticidad aumentó un 973% en comparación a la Variable 1 y en un 527% respecto a la Variable 2.

### Análisis comparativo de variables – Ensayo a esfuerzos de compresión.

El análisis comparativo de las variables pretende determinar el comportamiento y las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de las fases constituyentes del material compuesto, con el objetivo de establecer el grado de refuerzo que le otorga la fase dispersa (tejido de fibras de carbono 12K Twill) a la fase matriz de cartón. En el ensayo de la Variable 1 (especímenes EC2-CA-n) se obtuvieron valores de resistencia similares a pruebas realizadas en investigaciones sobre tubos de cartón estructurales

aplicados en la Arquitectura<sup>19</sup>, concluyendo que la fase matriz de cartón utilizada posee las características de microestructura, composición química y procesamiento, para ser implementada en elementos estructurales arquitectónicos. De manera general, el comportamiento mecánico de los especímenes EC2-CA-n (Variable 1) fue primordialmente de tipo dúctil, ya que la deformación elástica de estos elementos fue breve en comparación con su deformación plástica. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, propiciadas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), ejemplificándose por el aplastamiento de las superficies de contacto y el plegado diagonal en las zonas de unión multicapa. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo EC2-CA-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 82.61 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 2,332.40 kg/cm<sup>2</sup>.

Los especímenes de prueba EC2-CR-n (Variable 2) presentaron un comportamiento semirrígido y dúctil. La incorporación de la resina epóxica como agente protector de recubrimiento aumentó la rigidez y resistencia de la fase de cartón, produciendo inicialmente fallas de tipo frágil en ciertas áreas de los especímenes de prueba. Una vez fracturadas las capas exteriores con recubrimiento de resina epóxica, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. Cabe mencionar que, la aplicación de la resina epóxica sobre el cartón se realizó con el objetivo principal de ser un agente protector de barrera ante los efectos de intemperismo. Aun así, la incorporación de la resina epóxica generó un aumento en las capacidades de resistencia mecánica de la fase de cartón. En los especímenes del EC2-CR-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 99.24 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 20% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 3,995.50 kg/cm<sup>2</sup>.

Los especímenes de prueba EC-CF-n (Variable 3) comprenden el material compuesto del proyecto de investigación, constituidos a base de una matriz de cartón reforzada por un tejido de fibras de carbono 12K Twill. La unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de compresión, elevando los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes; en comparación a las Variables 1 y 2. El comportamiento mecánico y la falla de los especímenes EC2-CF-n fue de tipo frágil, al presentar deformaciones relativamente bajas. Cabe destacar que, el incremento de la rigidez del material estuvo ampliamente condicionado por el aumento del espesor de pared de los especímenes; lo que a su vez disminuyó las fallas de plegado continuo por devanado multicapa helicoidal, observadas en las Variables 1 y 2. En los especímenes del muestreo EC2-CF-n se obtuvo un esfuerzo

---

<sup>19</sup> En las pruebas de resistencia para tubos de cartón, realizadas por el Arq. Shigeru Ban, se obtuvieron valores de esfuerzo máximo resistente de 97.17 kg/cm<sup>2</sup> a 113.90 kg/cm<sup>2</sup>.

máximo resistente de 341.67 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 314% en relación con la Variable 1 y del 244% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 25,036.00 kg/cm<sup>2</sup>. En la Tabla X24 y la Figura X41, se presentan las propiedades mecánicas y las gráficas esfuerzo - deformación del ensayo a esfuerzos de compresión de las tres variables experimentadas. En las gráficas se observa el notable incremento de la rigidez y de la resistencia mecánica de la fase matriz de cartón con la incorporación de la resina epóxica como recubrimiento y, con la combinación de la fase de refuerzo de fibras de carbono para la conformación del material compuesto.

Propiedades mecánicas de variables a esfuerzos de compresión			
	Muestreo EC2-CA Variable 1	Muestreo EC2-CR Variable 2	Muestreo EC2-CF Variable 3
<b>Esfuerzo máximo resistente</b>	<b>82.61 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>99.24 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>341.67 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	<b>2,332.40 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>3,995.50 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>25,036.00 kg/cm<sup>2</sup></b>
<b>Límite elástico convencional (0.2%)</b>	<b>76.96 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>85.90 kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>337.98 kg/cm<sup>2</sup></b>

Tabla X24. Comparación de valores de propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión de las tres variables experimentadas.

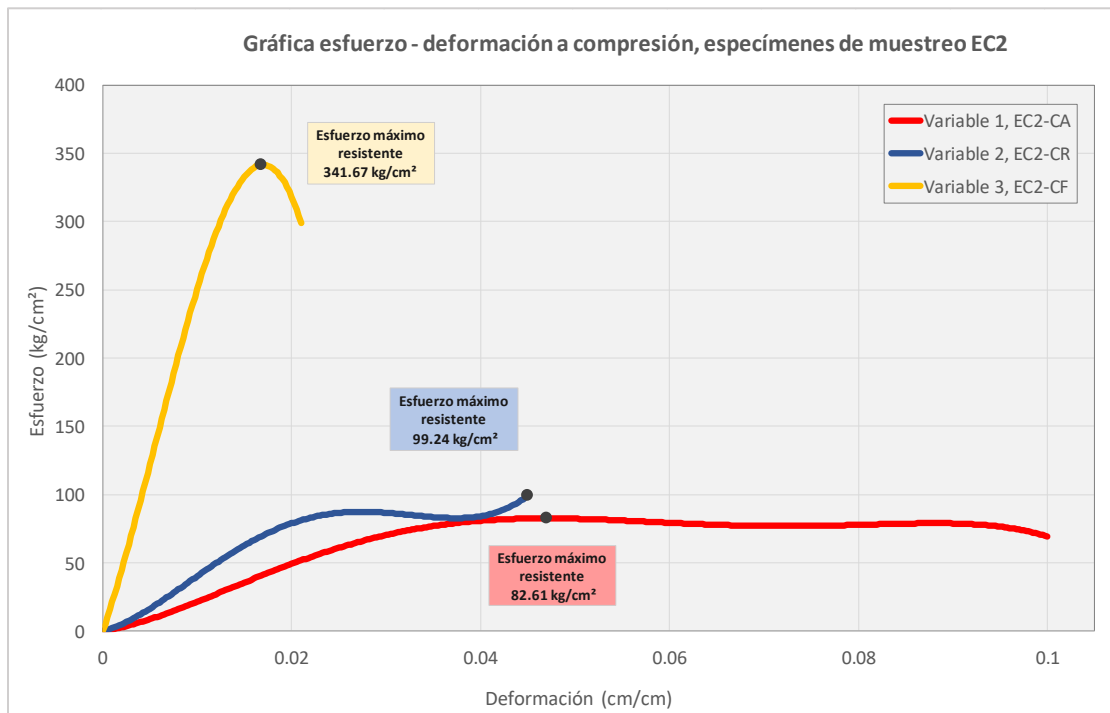


Figura X41. Gráfica esfuerzo – deformación a esfuerzos de compresión de las tres variables experimentadas, muestreo EC2.

## Capítulo V: Conclusiones

En el proceso de experimentación, se determinaron tres variables experimentales para el ensayo del material compuesto, siendo: Variable 1 – Matriz aislada de cartón SUS – Kraft, Variable 2 – Matriz de cartón SUS – Kraft con recubrimiento de resina epóxica, Variable 3 (material compuesto de proyecto de investigación) – Matriz de cartón SUS – Kraft con fase de refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill. Se elaboraron los ensayos mecánicos de resistencia a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión, de las tres variables mencionadas; efectuados en dos muestreos con la siguiente nomenclatura: EC2 (ensayo de compresión 2), ET2 (ensayo de tensión).

Para la obtención de las propiedades mecánicas de los especímenes de prueba de las tres variables de experimentación, se implementó el método de análisis estadístico de regresión polinomial, por medio de los softwares de procesamiento de datos Excel y Past, utilizando los valores de esfuerzo y deformación de los ensayos realizados a esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión.

El comportamiento mecánico a esfuerzos de compresión de los especímenes de cartón (Variable 1 – EC-CA) fue predominantemente de tipo dúctil al presentar deformación plástica prolongada sin fractura. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, propiciadas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), ejemplificándose por el aplastamiento de las superficies de contacto y el plegado diagonal en las zonas de unión multicapa. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo EC2-CA se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de  $82.61 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $2,332.40 \text{ kg/cm}^2$ .

El comportamiento mecánico a esfuerzos de compresión de los especímenes de cartón con resina epóxica (Variable 2 – EC-CR) fue de tipo semirrígido y dúctil. La incorporación de la resina epóxica como agente protector de recubrimiento aumentó la rigidez y resistencia de la fase de cartón, produciendo inicialmente fallas de tipo frágil en ciertas áreas de los especímenes de prueba. Una vez fracturadas las capas exteriores con recubrimiento de resina epóxica, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. En comparación a los especímenes tipo EC-CA de la Variable 1, se observó una disminución de la susceptibilidad de plegado por el devanado multicapa helicoidal, debido que el recubrimiento de resina epóxica aumentó la rigidez de las capas externas y, relleno las aristas de unión, conformando un elemento geométrico con mayor uniformidad. El aumento de la rigidez de los especímenes, produjo una transmisión de los esfuerzos más eficiente, lo que resultó

en la disminución de la deformación del elemento y del efecto de áreas de sobrecarga por careo insuficiente y, la reducción del aplastamiento por plegado continuo a lo largo del eje axial. En los especímenes del muestreo EC2-CR-n se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 99.24 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 20% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 3,995.50 kg/cm<sup>2</sup>.

En el ensayo a esfuerzos de compresión de los especímenes del material compuesto a base de una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill (Variable 3 – EC-CF) se determinó que la unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de compresión, elevando los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes; en comparación a las Variables 1 y 2. Se observó que la capa de fibras de carbono, en forma de tejido, sobre la matriz de cartón, actúa como cinturón de contención, restringiendo la deformación por aplastamiento continuo del elemento, lo que logra mantener la distribución de los esfuerzos de manera uniforme a lo largo del eje axial. El comportamiento mecánico y la falla de los especímenes EC-CF fue de tipo frágil, al presentar deformaciones relativamente bajas, siendo ligeramente perceptibles a la vista en el caso del muestreo EC1-CF. En los especímenes del muestreo EC2-CF se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 341.67 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 314% en relación con la Variable 1 y del 244% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 25,036.00 kg/cm<sup>2</sup>.

El comportamiento mecánico a esfuerzos de tensión de los especímenes de cartón (Variable 1 – ET-CA) fue de tipo dúctil, al presentar una breve deformación elástica en comparación con una amplia deformación plástica. Las fallas de que se produjeron fueron dúctiles, predispuestas por el método de manufactura comercial de los tubos de cartón (devanado multicapa helicoidal), observándose por medio del efecto prolongado de delaminación multicapa, aludiendo a una adherencia entre capas relativamente baja. A nivel de microestructura, durante el ensayo a esfuerzos de tensión, no se produce el efecto de reacomodo repetitivo de las fibras de celulosa (como se observó en el ensayo a esfuerzos de compresión); en cambio, las fibras son tensadas en la dirección axial del eje del espécimen hasta la rotura de los enlaces y los entrelazamientos de las redes del cartón, y la delaminación entre capas. Estadísticamente, en los especímenes del muestreo ET2-CA se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 143.45 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad de 488.35 kg/cm<sup>2</sup>.

El comportamiento mecánico a esfuerzos de tensión de los especímenes de cartón con resina epóxica (Variable 2 – ET-CR) fue de tipo semirrígido y dúctil. La aplicación de la resina epóxica en las capas exteriores como agente protector, permitió la conformación de un material con mayor uniformidad en su superficie al rellenar las aristas de unión del devanado multicapa helicoidal, efecto que influyó en la

obtención de valores de resistencia mayores. Al inicio del ensayo de los especímenes de la Variable 2, estos se mostraron con un comportamiento semirrígido, al estar restringidas las fibras de celulosa de la capa externa por la resina epóxica (de manera similar a la madera natural con las fibras de celulosa contenidas en la lignina); una vez fracturada la capa externa, las capas interiores del cartón presentaron el comportamiento dúctil observado en los especímenes de la Variable 1. Cabe mencionar que, con la aplicación de una mayor cantidad de resina en la fase de cartón, así como la uniformidad de esta en el elemento, se obtendrán valores de resistencia a esfuerzos de tensión más elevados y una mayor rigidez del material. En los especímenes del muestreo ET2-CR se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 216.91 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 51% en relación con la Variable 1) y un módulo de elasticidad de 544.69 kg/cm<sup>2</sup>.

En el ensayo a esfuerzos de tensión de los especímenes del material compuesto a base de una matriz de cartón y un refuerzo de tejido de fibras de carbono 12K Twill (Variable 3 – ET-CF), la unión de las fases constituyentes generó un material con mayores prestaciones a esfuerzos de tensión, elevando exponencialmente los valores de esfuerzo máximo resistente y la rigidez de los especímenes. Es importante mencionar que, se presentó el comportamiento mecánico característico de los materiales compuestos, en el que ambas fases de materiales trabajan de manera conjunta para transmitir y resistir los esfuerzos de tensión, hasta que la fase matriz (cartón) supera su umbral de resistencia máxima y cede a la rotura; posteriormente, las fibras de carbono comienzan a resistir toda la magnitud de la carga aplicada hasta alcanzar su resistencia máxima como material en forma de tejido tipo Twill. En los especímenes ET-CF, el comportamiento mecánico y las fallas fueron de tipo semirrígido y dúctil. Como se observó en el ensayo de los especímenes de la Variable 2, la resina epóxica genera un aumento en la rigidez del material, proporcional a su cantidad en masa; más al ejercer un aumento de presión, la resina no tolera los umbrales de deformación de la fase matriz de cartón y la fase de refuerzos de fibras de carbono, por lo que, la resina al presentar microfracturas, el comportamiento del material compuesto se torna dúctil al mostrar una amplia deformación plástica. En los especímenes del muestreo ET2-CF se obtuvo un esfuerzo máximo resistente de 1,010.36 kg/cm<sup>2</sup> (incremento del 604% en relación con la Variable 1 y del 366% en relación con la Variable 2) y un módulo de elasticidad de 25,921.00 kg/cm<sup>2</sup>.