



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Bases para la regulación de la capacidad de  
disipación de energía de materiales compuestos  
laminados

presentada por

**Ing. María Fernanda De Jesús Ramírez**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestra en Ciencias de la Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Arturo Abúndez Pliego**

Codirector de tesis

**Dr. Enrique Alcudia Zacarias**

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2024

Cuernavaca, Mor.,  
No. De Oficio:  
Asunto:

17/junio/2024  
SAC/191/2024  
Autorización de  
impresión de tesis

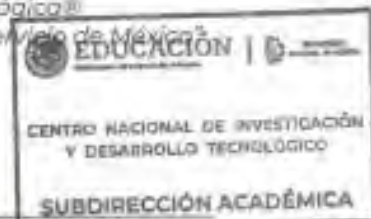
**MARÍA FERNANDA DE JESÚS RAMÍREZ  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA MECÁNICA  
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Bases para la regulación de la capacidad de disipación de energía de materiales compuestos laminados"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®  
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



Cuernavaca, Mor., **14/junio/2024**

OFICIO No. DIM/081/2024

**Asunto:** Aceptación de documento de tesis  
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

**DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. María Fernanda de Jesús Ramírez con número de control M22CE071, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"Bases para la regulación de la capacidad de disipación de energía de materiales compuestos laminados"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.



**DR. ARTURO ABÚNDEZ PLIEGO**  
Director de tesis



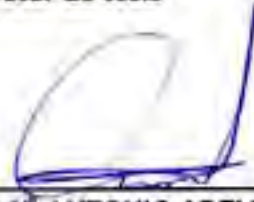
**DR. ENRIQUE ALCUDIA ZACARÍAS**  
Co-director de tesis



**DRA. CLAUDIA CORTÉS  
GARCÍA**  
Revisora 1



**DR. JORGE COLÍN  
OCAMPO**  
Revisor 2



**DR. JOSÉ ANTONIO ARELLANO  
CABRERA**  
Revisor 3

C.C.P. Depto. Servicios Escolares.  
Expediente / Estudiante  
Iniciales RCA/mrs

# Dedicatoria

---

*A Gemma, mi hermana y confidente. Gracias por tu apoyo inquebrantable; tu presencia ha sido mi fortaleza en los momentos más cruciales. Agradezco tu confianza desde el principio; tu fe en mí me ha llevado hasta aquí. Eres mi alma gemela no solo en esta travesía académica sino en toda la vida. Con todo mi amor y gratitud.*

*A mis padres Reina e Ildéfonso, mis eternos pilares. Gracias por ser mi constante apoyo, por ser la razón de quien soy hoy. Son mi mayor fuente de admiración e inspiración. Todo lo que logro es gracias a su amor y guía incondicional.*

*A mi hermana Yesenia. Gracias por estar a mi lado cuando más te necesitaba y por alentarme en este significativo proceso de cambio en mi vida.*

*A mis hermanos, Álvaro, Carlos y Gerardo. A lo largo de este proceso, su compañía ha sido invaluable para mí. Gracias por estar a mi lado, por cada palabra de aliento que me han brindado. Su apoyo ha sido un motor que me impulsa a seguir adelante.*

# Agradecimientos

---

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado a través de la beca nacional No. 1231855, que hizo posible la realización de mis estudios de maestría.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y apoyar a mi formación académica.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por abrirme sus puertas para realizar una parte importante de esta investigación, así como su contribución a mi desarrollo académico.

Al Dr. Arturo Abúndez Pliego, por su guía constante durante el proceso de esta investigación. Agradezco su confianza, sus enseñanzas y la paciencia que demostró mientras me guiaba en este camino de aprendizaje. Además, agradezco su amistad, la cual valoro enormemente. Muchas gracias.

Al Dr. Enrique Alcudia Zacarías por apoyarme durante mi estancia en Tijuana, Baja California, así como su contribución durante la realización de la parte experimental de esta investigación. Aprecio la confianza que depositó en mí, muchas gracias.

A la Dra. Claudia Cortés García, al Dr. Jorge Colín Ocampo y Dr. José Antonio Arellano Cabrera, por su participación como miembros de mi comité revisor. Sus comentarios y sugerencias fueron fundamentales para mejorar esta investigación.

A mis amigos Maria del Carmen y Reynaldo Angel, por acompañarme en esta travesía académica y en una nueva etapa de mi vida, su compañía y amistad fue fortaleza en momentos cruciales.

A Salomón, Tlálóc, Luis y Alexa, por brindarme su amistad, por su apoyo y por hacer que mi estancia en Cuernavaca fuera más amena y divertida.

A todos y cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento por su contribución y apoyo.

# Resumen

---

En esta investigación se presenta un análisis de las variables de diseño en estructuras de materiales compuestos con el objetivo de identificar aquéllas que impactan en la absorción de energía específica (SEA, por sus siglas en inglés). Para ello, se llevó a cabo una revisión de la literatura, extrayendo datos relevantes de diversas investigaciones con el objetivo de analizar las tendencias y relaciones entre las variables y la SEA. Como resultado, se llegó a la conclusión que la secuencia de apilado ( $S_a$ ) y la orientación de la fibra ( $\theta$ ) son las variables que ejercen una mayor influencia en la SEA. Para este estudio, se fabricaron tubos de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) utilizando el método de preimpregnado, con orientaciones de fibra a  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ , y tres distintas secuencias de apilado. Se realizaron ensayos de compresión siguiendo diferentes configuraciones  $[0,90/\pm\theta/\pm\theta]_s$ ,  $[\pm\theta/0,90/\pm\theta]_s$  y  $[\pm\theta/\pm\theta/0,90]_s$ . El propósito fue analizar el grado de influencia de estas dos variables sobre la capacidad de los tubos para absorber energía y proponer modelos empíricos por regresión lineal múltiple para correlacionar las variables de diseño con la absorción de energía específica.

Los resultados experimentales mostraron que para obtener un análisis más detallado de la absorción de energía específica en relación a la influencia de las variables de diseño, es necesario al dividir la curva Fuerza-Desplazamiento de los ensayos a compresión de los materiales compuestos en tres fases: a) Fuerza máxima de aplastamiento, b) Región inestable y c) Colapso progresivo. Se determinó que en la Fase 1 y la Fase 2, la influencia de las variables de diseño (secuencia de apilado y orientación de la fibra) es más notable. Principalmente en la Fase 1 se puede observar cómo la orientación de la fibra influye en la SEA y cómo la secuencia de apilado puede cambiar el modo de falla de las estructuras, mientras que la Fase 3 está más influenciada por la longitud del tubo de material compuesto.

Posteriormente, los resultados experimentales se utilizaron para calcular la SEA y se compararon con los modelos desarrollados. Se propusieron modelos empíricos para las fases 1 y 2, así como para la suma de ambas  $SEA_{Fase1}$ ,  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$ ,

respectivamente, los cuales mostraron una correlación del 80.07%, 87.79%, y 86.12%, respectivamente, que se consideran buenas correlaciones entre los resultados del modelo y aquéllos obtenidos experimentalmente.

**Palabras claves:** Absorción de energía específica, materiales compuestos, estructuras tubulares, ensayos experimentales, secuencia de apilado, orientación de la fibra, modelos empíricos, análisis estadístico.

# Abstract

---

This research presents an analysis of design variables in composite material structures with the objective of identifying those that impact specific energy absorption (SEA). A literature review was conducted to extract relevant data from various studies to analyze trends and relationships between variables and SEA. As a result, it was concluded that stacking sequence ( $S_a$ ) and fiber orientation ( $\theta$ ) exert the greatest influence on SEA. For this study, glass fiber-reinforced polymer (GFRP) tubes were fabricated using the prepreg method with fiber orientations at  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  and  $\pm 45^\circ$ , and three different stacking sequences. Compression tests were performed following different configurations  $[0,90/\pm\theta/\pm\theta]_s$ ,  $[\pm\theta/0,90/\pm\theta]_s$  and  $[\pm\theta/\pm\theta/0,90]_s$ , to analyze the degree of influence of these variables on the tubes' energy absorption capacity and propose empirical models by multiple linear regression to correlate design variables with specific energy absorption.

Experimental results showed that for a more detailed analysis of specific energy absorption concerning the influence of design variables, it is necessary to divide the Force-Displacement curve of composite material compression tests into three phases: a) Maximum crushing force, b) Unstable region, and c) Progressive collapse. It was determined that in Phase 1 and Phase 2, the influence of design variables (stacking sequence and fiber orientation) is more noticeable. Mainly in Phase 1, the influence of fiber orientation on SEA and how the stacking sequence can change the failure mode of structures can be observed, while Phase 3 is more influenced by the length of the composite material tube.

Subsequently, experimental results were used to calculate SEA and compared with the developed models. Empirical models were proposed for Phases 1 and 2, as well as for the sum of both  $SEA_{Fase1}$ ,  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$  estimated SEA with an adequate fit. For  $SEA_{Fase1}$ , the estimated SEA was 80.07%, for  $SEA_{Fase2}$ , respectively, showing correlations of 80.07%, 87.79%, and 86.12%, which are considered good correlations between model results and those obtained experimentally.



**Keywords:** Specific energy absorption, composite materials, tubular structures, experimental tests, stacking sequence, fiber orientation, empirical models, statistical analysis.

# Contenido

---

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Contenido</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XII</b>

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I. Estado del Arte</b>	<b>4</b>
1.1 Materiales compuestos .....	4
1.1.1 Mecanismos detonantes de la falla .....	6
1.1.2 Geometría y forma de la estructura .....	11
1.1.3 Mecanismos y modos de falla.....	13
1.1.4 Variables de laminado .....	16
1.1.5 Conclusiones del estado del arte .....	18
1.2 Justificación .....	20
1.3 Definición del problema .....	21
1.4 Hipótesis .....	22
1.5 Objetivo general .....	22
1.5.1 Objetivos específicos .....	22
1.6 Alcances y limitaciones .....	23
<b>Capítulo II. Marco Teórico</b>	<b>24</b>
2.1 Definición de materiales compuestos.....	24
2.2 Componentes en materiales compuestos .....	25
2.2.1 Matriz.....	26
2.2.2 Refuerzo.....	28
2.3 Materiales compuestos laminados .....	31
2.3.1 Apilado de laminados .....	31
2.4 Mecanismos de falla .....	34

2.5 Características de la absorción de energía .....	35
2.6 Métodos de fabricación de estructuras tubulares .....	36
2.6.1 Proceso de laminación manual (Hand lay-up) .....	38
2.6.2 Proceso de bobinado de filamentos ( <i>Filament Winding</i> ) .....	38
2.6.3 Proceso de Preimpregnado .....	40
2.6.4 Comparación de procesos de manufactura de estructuras de material compuesto .....	41
<b>Capítulo III. Metodología para la Regulación de la Capacidad de Absorción de Energía de Estructuras Tubulares</b> .....	<b>44</b>
3.1 Metodología para el desarrollo del modelo de absorción de energía específica	45
3.1.1 Proceso sistemático para obtener las variables del modelo de disipación de energía .....	46
3.1.2 Extracción y procesamiento de resultados experimentales reportados en la literatura .....	46
3.1.3 Análisis exploratorio de los datos .....	49
3.1.4 Interpretación de los resultados .....	53
3.1.5 Generalidades del modelo regresión lineal múltiple .....	54
3.1.6.1 Variables de entrada y salida para el modelo de la absorción de energía específica .....	57
3.2 Ensayos experimentales en estructuras tubulares .....	58
3.2.1 Diseño experimental.....	59
3.2.2 Preparación de los tubos.....	66
3.2.3 Preparación de ensayos y equipo .....	68
<b>Capítulo IV. . Análisis y Discusión de Resultados</b> .....	<b>73</b>
4.1 Obtención de probetas y ensayos de compresión.....	73
4.1.1 Obtención de la manufactura de las probetas .....	73
4.1.2 Preparación de ensayos de compresión .....	74
4.2 Modos de falla en estructuras tubulares de materiales compuestos.....	78
4.2.1 Fase I. Fuerza máxima de aplastamiento (Peak crush load) .....	81
4.2.2 Fase 2. Región de inestabilidad .....	82
4.3 Análisis por configuración de laminado en la Fase 1 y Fase 2 .....	83

4.3.1	Influencia de la secuencia de apilado ( $S_a$ ) sobre tubos con fibras orientadas a $[\pm 15]$ .....	84
4.3.2	Influencia de la secuencia de apilado ( $S_a$ ) sobre tubos con fibras orientadas a $[\pm 30]$ .....	87
4.3.3	Influencia de la secuencia de apilado ( $S_a$ ) sobre tubos con fibras orientadas a $[\pm 45]$ .....	89
4.4	Influencia de la orientación de la fibra sobre la absorción de energía en tubos compuestos.....	91
4.4.1	Influencia de la orientación de la fibra sobre tubos con fibras en la configuración A .....	92
4.4.2	Influencia de la orientación de la fibra sobre tubos con fibras en la configuración B .....	94
4.4.3	Influencia de la orientación de la fibra sobre tubos con fibras en la configuración C.....	96
4.5	Modelos para el cálculo de la absorción de energía específica.....	99
4.5.1	Modelo para la predicción de la SEA en la fase 1 .....	101
4.5.2	Modelo para la predicción de la SEA en la fase 2 .....	105
4.5.3	Modelo para la predicción de la SEA en la suma de las fases 1 y 2.....	108
4.5.4	Comparación de los modelos $SEAFase1$ , $SEAFase2$ y $SEAFase1y2$ en la predicción de la SEA.....	112
<b>Conclusiones</b>		<b>115</b>
<b>Trabajos Futuros</b>		<b>118</b>
<b>Referencias</b>		<b>119</b>
<b>Apéndices</b>		<b>128</b>
Apéndice A. Base de datos de la secuencia de apilado 0,90 reportados en la literatura .....		128
Apéndice B. Influencia de la orientación de la fibra en estructuras de material compuesto.....		130
Apéndice C. Configuración del apilado del laminado .....		131
Apéndice D. Manufactura de las probetas de material compuesto .....		132
Apéndice E. Selección de las probetas para el desarrollo del modelo empírico .....		142
Apéndice F. Programa de los modelos $SEA_{Fase1}$ , $SEA_{Fase2}$ y $SEA_{Fase1y2}$ .....		147

# Índice de Figuras

---

## Capítulo I. Estado del Arte

Figura 1.1 Curva típica de carga-deflexión; (a) Tubo de material compuesto, (b) Tubo de aluminio [24] .....	5
Figura 1.2 Curva carga-desplazamiento típica para falla progresiva: (I) Inicio, (II) Progresivo, (III) Compresión [25] .....	6
Figura 1.3 Curvas típicas de fuerza-desplazamiento para la falla catastrófica y falla progresiva [28] .....	7
Figura 1.4 a) Curva fuerza-desplazamiento para el iniciador tipo chaflán y tulipán [29] b) Ángulos de iniciador de falla [20] .....	8
Figura 1.5 Corte de iniciación; (a) Tubo circular y chaflan de 45° y (b) Tubo ranurado y chaflán de 45° [32] .....	9
Figura 1.6 Representación de disparo de agujero circular. [33] .....	9
Figura 1.7 Esquema de los procedimientos de "presionar y cortar"; (a) Compresión del tubo, (b) Recorte de 8 rendijas verticales, (c) Extracción de las esquinas o los lados planos, (d) Compresión con solo esquinas o lados planes [5] .....	10
Figura 1.8 Mecanismos desencadenantes de fallas; (a) Chaflán, (b) Tapas de aplastamiento [34] .....	10
Figura 1.9 Diferentes geometrías investigadas por Palanivelu et al. [37] .....	11
Figura 1.10 Diferentes formas geométricas de los tubos compuestos y sus dimensiones consideradas para el estudio [37] .....	11
Figura 1.11 Modos de falla para la compresión axial de un tubo circular: 1) pandeo global, 2) pandeo local, 3) fluencia (o fractura), 4) aplastamiento axial [45] .....	14
Figura 1.12 Modos de fallo locales [47] .....	15

## Capítulo II. Marco Teórico

Figura 2.1 Composición básica de un material compuesto [15] .....	24
Figura 2.2 Componentes de los materiales compuestos [15] .....	26
Figura 2.3 Efecto de las cargas sobre los materiales compuestos: (a) Compresión, (b) Tracción [59] .....	27
Figura 2.4 Clasificación de los materiales compuestos, según el tipo de refuerzo [15] .....	29
Figura 2.5 Efecto de la orientación de las fibras sobre la resistencia del compuesto [59] .....	32
Figura 2.6 Laminado en equilibrio [64] .....	32
Figura 2.7 Laminado simétrico [64] .....	33
Figura 2.8 Laminado asimétrico [64] .....	33
Figura 2.9 Laminado unidireccional [64] .....	33

Figura 2.10 Laminado angular [64] .....	34
Figura 2.11 Orientación estándar de las fibras [62] .....	34
Figura 2.12 Mecanismos de daño en compuestos: (a) rotura de fibras, (b) pandeo de fibra por esfuerzos de compresión, c) debonding d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación [65] .....	34
Figura 2.13 Curva de carga-desplazamiento de material compuesto (Modificado de [24]) .....	36
Figura 2.14 Esquema proceso laminación manual (Adaptación) [70] .....	38
Figura 2.15 Elementos del proceso de laminación manual (Adaptado de [71]) .....	38
Figura 2.16 Diagrama básico del patrón de bobinado; (a) método de bobinado en húmedo; (b) método de bobinado con preimpregnado [73] .....	39
Figura 2.17 Método preimpregnado [4] .....	40
Figura 2.18 Tejidos de preimpregnado: a) Unidireccional, b) Bidireccional (Modificado de [74]) .....	42

### **Capítulo III. Metodología para la Regulación de la Capacidad de Absorción de Energía de Estructuras Tubulares**

Figura 3.1 Metodología para obtener las recomendaciones para el diseño de estructuras tubulares de materiales compuestos .....	45
Figura 3.2 Proceso sistemático para analizar las variables del modelo de estimación de la SEA .....	46
Figura 3.3 Metodología de análisis para clasificar los laminados reportados de la literatura .....	50
Figura 3.4 Influencia de la secuencia de apilado de laminados [0,90] .....	51
Figura 3.5 Influencia de la orientación de la fibra en estructuras tubular .....	53
Figura 3.6 Proceso experimental para la elaboración y análisis de datos de los tubos de material compuesto reforzados con fibras .....	59
Figura 3.7 Fibra de vidrio prepreg [77] .....	60
Figura 3.8 Dimensiones de probetas para ensayos a compresión .....	62
Figura 3.9 Representación de los valores de $S_a$ para un laminado simétrico de seis láminas (Vista superior) .....	63
Figura 3.10 Representación de los valores de $S_a$ para un tubo laminado balanceado y simétrico de seis láminas .....	65
Figura 3.11 Proceso de manufactura "Preimpregnado" .....	68
Figura 3.13 Medición de las probetas: a) Espesor, b) Diámetro, c) Longitud, d) Masa .....	69
Figura 3.14 Configuración de la máquina-accesorios para realizar los ensayos de compresión en la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-IC 100 kN .....	72

## Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados

Figura 4.1 Lote 1: Probetas con ángulos de $[0^\circ/90^\circ]$ .....	73
Figura 4.2 Lote 2: Probetas con ángulos de $[0/90]$ y $[\pm 15]$ en sus tres configuraciones. .....	73
Figura 4.3 Lote 3: Probetas con ángulos de $[0/90]$ y $[\pm 30]$ en sus tres configuraciones .....	74
Figura 4.4 Lote 4: Probetas con ángulos de $[0/90]$ y $[\pm 45]$ en sus tres configuraciones .....	74
Figura 4.5 Deformación de la probeta A15-01: a) Probeta A15-01, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.....	75
Figura 4.6 Deformación de la probeta A15-02: a) Probeta A15-02, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.....	75
Figura 4.7 Deformación de la probeta A15-03: a) Probeta A15-03, b) Momentos de la falla, c) Deformación total.....	76
Figura 4.8 Deformación de la probeta A15-04: a) Probeta A15-04, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.....	77
Figura 4.9 Deformación de la probeta A15-05: a) Probeta A15-05, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.....	78
Figura 4.10 Curva Fuerza-Desplazamiento típica de un tubo de material compuesto.	78
Figura 4.11 Modos de falla con fibras de $\pm 15^\circ$ a) A15 $[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$ , c) B15 $[\pm 15/0,90/\pm 15]_s$ y e) C15 $[\pm 15/\pm 15/0,90]_s$ b, d, f) Curvas Fuerza-Desplazamiento; de los incisos a,c,e.....	79
Figura 4.12 Modos de falla con fibras de $\pm 30^\circ$ a) A30 $[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$ , c) B30 $[\pm 15/0,90/\pm 15]_s$ y e) C30 $[\pm 15/\pm 15/0,90]_s$ b, d, f) Curvas Fuerza-Desplazamiento; de los incisos a,c,e.....	80
Figura 4.13 Modos de falla con fibras de $\pm 15^\circ$ a) A45 $[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$ , c) B45 $[\pm 15/0,90/\pm 15]_s$ y e) C45 $[\pm 15/\pm 15/0,90]_s$ b, d, f) Curvas Fuerza-Desplazamiento; de los incisos a,c,e.....	81
Figura 4.14 Representación gráfica de las configuraciones $A\theta$ , $B\theta$ , $C\theta$ .....	84
Figura 4.15 Curva Fuerza-Desplazamiento con láminas orientadas a $[\pm 15]$ ; a) Fase 1, b) Fase 2.....	86
Figura 4.16 Curva Fuerza-Desplazamiento con láminas orientadas a $[\pm 30]$ ; a) Fase 1, b) Fase 2.....	88
Figura 4.17 Curva Fuerza-Desplazamiento con láminas orientadas $[\pm 45]$ ; a) Fase 1, b) Fase 2.....	90
Figura 4.18 Configuración A.....	92
Figura 4.19 Curva Fuerza-Desplazamiento de la configuración A; a) Fase 1, b) Fase 2	93
Figura 4.20 Configuración B.....	95
Figura 4.21 Curva Fuerza-Desplazamiento de la configuración B; a) Fase 1, b) Fase 2	96
Figura 4.22 Configuración C.....	97

Figura 4.23 Curva Fuerza-Desplazamiento de la configuración C; a) Fase 1, b) Fase 2	98
Figura 4.24 Comparación la absorción de energía específica obtenida experimentalmente y teóricamente del modelo $SEA_{Fase1}$	103
Figura 4.25 Comportamiento del modelo $SEA_{Fase1}$	104
Figura 4.26 Comparación la absorción de energía específica obtenida experimentalmente y teóricamente del modelo $SEA_{Fase2}$	107
Figura 4.27 Comportamiento del modelo $SEA_{Fase2}$	107
Figura 4.28 Comparación la absorción de energía específica obtenida experimentalmente y teóricamente del modelo $SEA_{Fase1y2}$	110
Figura 4.29 Comportamiento del modelo $SEA_{Fase1y2}$	111



# Índice de Tablas

---

## Capítulo I. Estado del Arte

Tabla 1.1 Resultados de las diferentes geometrías y espesores ensayados. Modificado de [37].....	12
--	----

## Capítulo II. Marco Teórico

Tabla 2.1 Características de las resinas más utilizadas [60] .....	28
Tabla 2.2 Características principales de las fibras más utilizadas [60] .....	29
Tabla 2.3 Procedimientos de fabricación de materiales compuestos [69] .....	37
Tabla 2.4 Comparación de procesos de manufactura en estructuras de material compuesto .....	41
Tabla 2.5 Comparación de fibras unidireccionales y bidireccionales .....	43

## Capítulo III. Metodología para la Regulación de la Capacidad de Absorción de Energía de Estructuras Tubulares

Tabla 3.1 Base de datos de laminados [0°/90°] reportados en la literatura .....	48
Tabla 3.2 Orientación de la fibra con diferentes $\theta$ en estructuras tubulares, datos obtenidos de la literatura .....	49
Tabla 3.3 Clasificación de la secuencia de apilado de laminados reportados en la literatura.....	50
Tabla 3.4 Estructura de los datos para la regresión lineal múltiple. Modificado de [76] .....	55
Tabla 3.5 Variables de entrada y salida para modelo de disipación de energía .....	58
Tabla 3.6 Propiedades físicas de fibra de vidrio prepreg [77] .....	60
Tabla 3.7 Requisitos geométricos para las probetas sometidas a ensayos por compresión.....	61
Tabla 3.8 Diseño experimental para evaluar la capacidad de absorción de energía de materiales compuestos de resina epoxi con reforzados de fibras de vidrio.....	64
Tabla 3.9 Valores de $S_a$ para un tubo laminado simétrico de seis láminas .....	65
Tabla 3.10 Materiales y moldes para la manufactura de las probetas .....	66
Tabla 3.11 Parámetros geométricos de los tubos de material compuesto.....	70

## Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados

Tabla 4.1 Configuraciones $A\theta, B\theta, C\theta$ .....	84
Tabla 4.2 EA y SEA en las Fases 1 y 2, de las muestras con láminas orientadas a [ $\pm 15$ ] .....	86

Tabla 4.3 EA y SEA en las Fases 1 y 2, de las muestras con láminas orientadas a $[\pm 30]$	88
Tabla 4.4 EA y SEA en las Fases 1 y 2, de las muestras con láminas orientadas $[\pm 45]$	91
Tabla 4.5 EA y SEA en las Fases 1 y 2, en la configuración A.....	93
Tabla 4.6 EA y SEA en las Fases 1 y 2, en la configuración B.....	96
Tabla 4.7 EA y SEA en las Fases 1 y 2, en la configuración C.....	98
Tabla 4.8 Variables de diseño de los modelos para calcular la SEA.....	99
Tabla 4.9 Organización de la información experimental de los tubos de estudio para la regresión lineal múltiple en la fase 1 .....	100
Tabla 4.10 Organización de la información experimental de los tubos de estudio para la regresión lineal múltiple en la fase 2 .....	100
Tabla 4.11 Organización de la información experimental de los tubos de estudio para la regresión lineal múltiple en la suma de las fases 1 y 2 .....	101
Tabla 4.12 Resumen del análisis estadístico realizado sobre el modelo $SEAFase1$ ...	102
Tabla 4.13 Comparación entre los valores estimados a través del modelo $SEA_{Fase1}$ y los datos experimentales .....	103
Tabla 4.14 Resumen del análisis estadístico realizado sobre el modelo $SEAFase2$ ...	105
Tabla 4.15 Comparación entre los valores estimados a través del modelo $SEA_{Fase2}$ y los datos experimentales .....	106
Tabla 4.16 Resumen del análisis estadístico realizado sobre el modelo $SEAFase1y2$	109
Tabla 4.17 Comparación entre los valores estimados a través del modelo $SEA_{Fase1y2}$ y los datos experimentales .....	110

# Introducción

---

En las últimas décadas, el alarmante índice de muertes, lesiones y daños a objetos de valor durante colisiones catastróficas [1-6], han impulsado el interés de los investigadores por encontrar formas más eficaces para disminuir estos indicadores. Por esta razón, la seguridad se ha convertido en uno de los factores más importantes a la hora de diseñar y comercializar nuevos productos en la industria. Por lo tanto, los materiales con propiedades específicas como el aluminio, plásticos y materiales compuestos están sustituyendo a los aceros comúnmente empleados. Sin embargo, esta sustitución se debe hacer sin perjudicar, sino mejorar el comportamiento del vehículo en lo que a aspectos de seguridad se refiere [7-12].

Las funciones que debe cumplir una estructura para trabajar con pruebas de carga estáticas y dinámicas son absorber energía, garantizar que el compartimento de los pasajeros permanezca intacto y asegurar un nivel de desaceleración aceptable para el conductor y los pasajeros. El análisis y estudio de los materiales compuestos, han demostrado que poseen características como mayor integridad y resistencia a los choques en comparación con los metales.

Al tener una buena capacidad de absorción de energía y generar menor peso, se han realizado numerosos experimentos para estudiar los compuestos de CFRP (Polímero reforzado con fibra de carbono, por sus siglas en inglés) y GFRP (Polímero reforzado con fibra de vidrio, por sus siglas en inglés) [1-3], [7-10], [13-15], ya que podrían ser la próxima sustitución de los metales. En esta propuesta, se presentan los resultados de algunas de las investigaciones por algunos autores, las cuales muestran experimentalmente el comportamiento de diferentes parámetros que afectan directamente la capacidad de absorción de energía. En diversos trabajos se expone la relación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos, pero aún no hay estudios concretos que analicen el comportamiento post – falla, lo cual involucra que la capacidad de soportar carga durante el colapso estructural aún no ha sido examinada a fondo, de tal manera que no se tienen criterios concretos para incluirla dentro del diseño de las estructuras tubulares reforzadas con fibras.

Este modo post – falla es equivalente a la falla por pandeo en una estructura metálica, cuando es sometida a colapso axial. La capacidad de seguir soportando carga está tanto en función de la geometría de la estructura como de las propiedades del material, las cuales se han identificado ampliamente en una gran variedad de estructuras simples analizadas.

El objetivo de este estudio es establecer las bases para regular la capacidad de disipación de energía en materiales compuestos laminados al controlar los mecanismos de falla y su secuencia bajo cargas cuasi-estáticas. Para lograrlo, se ha llevado a cabo un análisis de la información disponible en la literatura para identificar las variables de diseño en estructuras tubulares de material compuesto. En este estudio, se ha seleccionado la orientación de la fibra y la secuencia de apilado como las variables de investigación para analizar su impacto en la capacidad de disipación de energía.

La presente investigación se estructura en cinco capítulos: Capítulo I, se abordan las generalidades de la investigación, incluyendo la justificación, definición del problema, hipótesis, objetivos, alcances y limitaciones. Capítulo II, se presenta la revisión de la literatura dividida en cinco secciones (materiales compuestos, mecanismos detonantes de la falla, geometría y forma de la estructura, mecanismos y modos de falla y variables del laminado), con el fin de comprender el problema y aportar soluciones.

Continuando con el Capítulo III, se definen conceptos que son fundamentales para la comprensión del tema principal, proporcionando el respaldo necesario para el desarrollo de la investigación. A continuación, en el Capítulo IV se detalla la metodología empleada, dividida en dos secciones: la primera sección se centra en el desarrollo de un modelo para estimar la capacidad de disipación de energía específica, fundamentado en un esquema conceptual y en información extraída de fuentes especializadas en la literatura; la segunda sección se enfoca en los ensayos experimentales realizados en estructuras tubulares de material compuesto reforzado con fibra de vidrio, describiendo las etapas que abarcan el diseño experimental, las pruebas realizadas, los materiales utilizados, la recopilación de datos y el análisis de resultados.

Posteriormente en el Capítulo V: se exponen los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la fase experimental de esta investigación. Estos resultados se representan mediante gráficas que muestran las fases (Fuerza máxima de aplastamiento, región inestable y colapso progresivo) del modo de falla de las curvas Fuerza-Desplazamiento de los ensayos realizados. Se calculó tanto la absorción de energía (EA, por sus siglas en inglés) como la absorción de energía específica (SEA, por sus siglas en inglés) para cada configuración, con el objetivo de realizar una comparación que permita determinar cómo la secuencia de apilado y la orientación de la fibra influyen en la SEA. Además, se presentan los modelos  $SEA_{Fase1}$ ,  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$  para la estimación de la absorción de energía específica en función a la secuencia de apilado y la orientación de la fibra.

## Estado del Arte

El estado del arte se divide en cinco partes de acuerdo con la temática investigada. En la primera parte se presentan las características generales de los materiales compuestos. Posteriormente, se describen las principales variables que afectan directamente a la absorción de energía de los materiales, tales como: Mecanismos detonantes de la falla, geometría y forma de la estructura, mecanismos y modos de falla y variables del laminado.

### 1.1 Materiales compuestos

Tanto el acero como otros metales, que son materiales de uso común, se han comenzado a reemplazar por materiales más ligeros como el aluminio, plásticos y materiales compuestos. Actualmente, los materiales compuestos son los que han causado gran impacto, por la versatilidad de su diseño y el comportamiento de sus propiedades mecánicas, por lo cual tienen una variedad de aplicaciones [1-3], [10-12], [16-19].

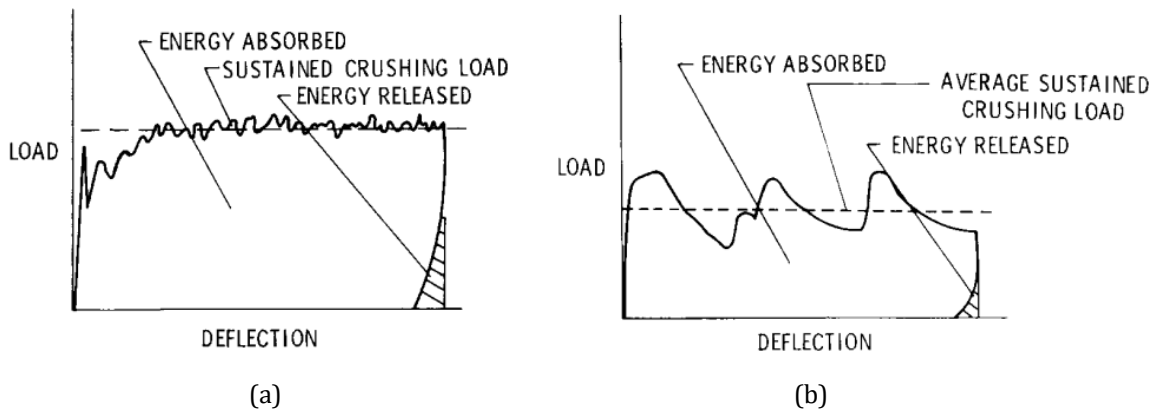
Dentro de sus aplicaciones, se encuentran las estructuras compuestas tubulares utilizadas en la industria automotriz y aeronáutica. Sin embargo, el uso de estos materiales debe realizarse sin comprometer y mejorar el funcionamiento de los componentes industriales en términos de seguridad. Las funciones que deben cumplir las estructuras fabricadas con dichos materiales son absorber energía y asegurar la integridad del material [20].

Schmueser *et al.* [21] determinaron por medio de experimentos que las estructuras metálicas absorben la energía deformándose plásticamente, mientras que los materiales compuestos lo hacen mediante un colapso progresivo generando que la energía sea más eficiente. Los compuestos de plástico reforzado con fibra de carbono

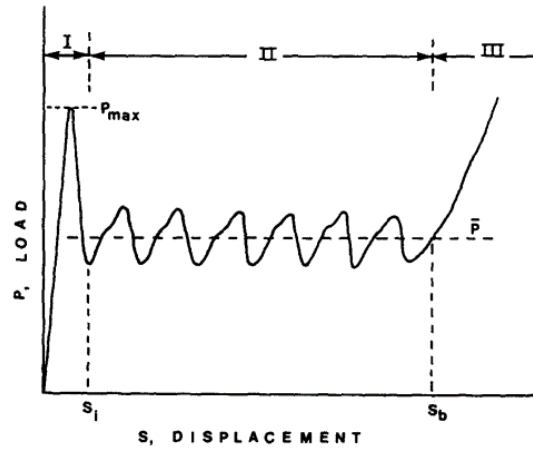
(CFRP, por sus siglas en inglés), tienen mayor capacidad de absorción de energía para disipar la energía de impacto, que las estructuras metálicas comunes [6], [14].

Sin embargo, un problema que surge con este tipo de material es con su estructura interna. Ramakrishna [22] y Curruthers *et al.* [23] determinaron que los materiales compuestos difieren en su comportamiento y propiedades mecánicas, ya que, no son las mismas cuando se someten a pruebas cuasi-estáticas. Además, establecieron que la disipación de energía en el colapso progresivo de las estructuras compuestas no solo depende de las propiedades del material, sino también de las fracciones de volumen de la fibra y la matriz, el orden de apilamiento, la orientación de la fibra, el desencadenante de la falla, la forma y la geometría y en algunos casos el modo de falla.

La Figura 1.1 muestra una comparación de las curvas típicas de deflexión-carga presentadas en el estudio de Farley [24]. Se puede ver en esta figura que el tubo de material compuesto permanece estable después de la falla progresiva hasta la falla catastrófica. En cambio, en los tubos de aluminio, el esfuerzo es diferente para colapsos progresivos. En la Figura 1.2 se representa la curva de carga-desplazamiento de un material sometido a cargas por compresión [25].



**Figura 1.1** Curva típica de carga-deflexión; (a) Tubo de material compuesto, (b) Tubo de aluminio [24]



**Figura 1.2** Curva carga-desplazamiento típica para falla progresiva: (I) Inicio, (II) Progresivo, (III) Compresión [25]

La mayoría de los trabajos desarrollados para estudiar la capacidad de absorción de energía se basan en el desarrollo experimental de estructuras compuestas, sometidas a diferentes escenarios de la carga, así como de la evaluación de la influencia de variables como:

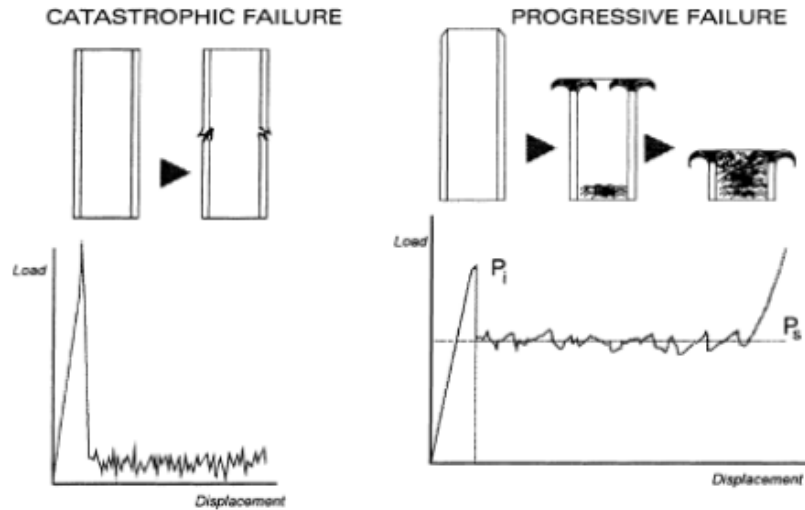
- I. Mecanismos detonantes de la falla
- II. Geometría y forma de la estructura
- III. Mecanismos y modos de falla
- IV. Variables del laminado

### 1.1.1 Mecanismos detonantes de la falla

En el diseño de las estructuras, la iniciación de la falla consiste en formar una concentración de esfuerzos en el borde del perfil de los tubos para originar un fallo progresivo de la estructura, evitando que las cargas sean transmitidas por toda la estructura. De esta manera, se puede evitar que la estructura de materiales compuestos colapse catastróficamente, dando lugar al colapso progresivo [26, 27],

En la Figura 1.3 se muestra la comparación entre las curvas típicas de fuerza-desplazamiento para la falla catastrófica y la falla progresiva de un perfil comprimido axialmente.



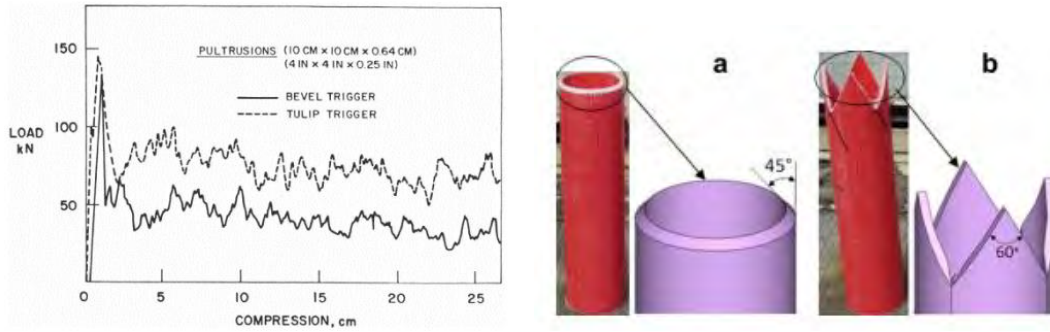


**Figura 1.3** Curvas típicas de fuerza-desplazamiento para la falla catastrófica y falla progresiva [28]

Entre los mecanismos detonantes de falla de las estructuras compuestas, utilizados para reducir la fuerza inicial y conseguir la falla progresiva, se encuentran los siguientes:

- Mecanismos desarrollados a partir de la modificación de los bordes; iniciador tipo chaflán o tipo tulipán.
- Iniciadores de colapso basados en modificar la geometría de la estructura; adelgazando el espesor o reduciendo la sección en puntos determinados.
- Algunas estructuras de sección no constante que por su geometría ya son autoiniciados, cortes por secciones.
- Estructuras que son colapsadas contra un molde o cavidad de extrusión que actúan de iniciador.

Los mecanismos detonantes de falla más utilizados son los de modificación de bordes (chaflán). En 1979 Thornton [28] comparó el iniciador tipo chaflán y tipo tulipán en perfiles cuadrados de materiales compuestos. Concluyó que el efecto del detonante tipo tulipán es más positivo que el tipo chaflán, esto se puede observar en la Figura 1.4 a).

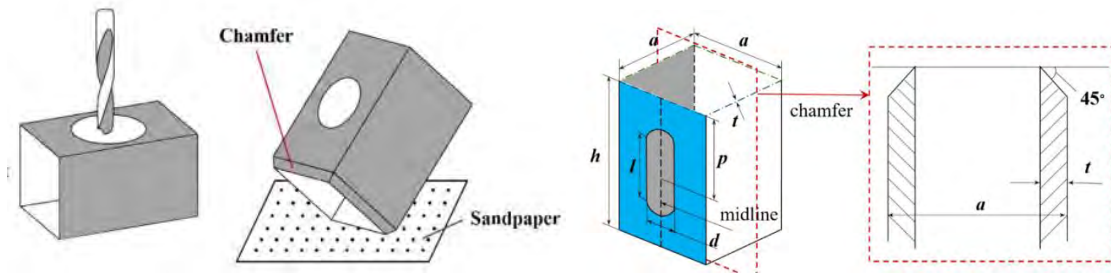


**Figura 1.4** a) Curva fuerza-desplazamiento para el iniciador tipo chaflán y tulipán [29] b) Ángulos de iniciador de falla [20]

Posteriormente, Palanivelu *et al.* [20] realizaron pruebas en tubos cuadrados y circulares en donde adoptaron ángulos de  $45^\circ$  y  $60^\circ$ , como se muestra en la Figura 1.4 b). Se han realizado más estudios con este tipo de mecanismos de iniciación tipo chaflán, en los cuales, por lo regular se utilizan ángulos de  $20^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  [4], [16], [29].

Entre los trabajos realizados actualmente, se encuentran el de Cuesta *et al.* [30] y Ran *et al.* [31] quienes analizaron los tipos de iniciación tipo chaflán con ángulos de 15, 30, 45 y 60 grados, y de tipo tulipán con ángulos de 60 y 90 grados. Concluyeron que los de tipo tulipán disminuyeron la fuerza de aplastamiento en un 36% en comparación con el de chaflán. Los valores de la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE, por sus siglas en inglés) y de energía específica (SE, por sus siglas en inglés) son más altos para los mecanismos tipo tulipán, mientras que la absorción de energía específica (SEA, por sus siglas en inglés) de los biseles y particularmente a  $45^\circ$ , mostró los valores más altos en todos los casos en este trabajo.

Dentro de estos mecanismos, también se encuentran la reducción de material en ciertos puntos combinado con un chaflán, como el trabajo de Song *et al.* y de Thornton [25, 26]. Mediante una serie de experimentos validaron que el chaflán con cortes de dos tipos (corte circular y corte ranurado) en una de las caras de los tubos (ver Figura 1.5), puede activar el modo de trituración progresivo (PCM, por sus siglas en inglés), con una disminución de alrededor del 64 % de  $F_p$  y un 52% de aumento de SEA.

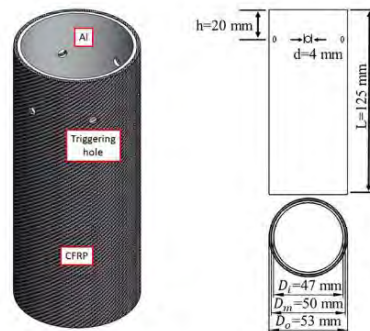


**Figura 1.5** Corte de iniciación; (a) Tubo circular y chaflán de 45° y (b) Tubo ranurado y chaflán de 45° [32]

En el estudio de Cetin *et al.* [33], se investigó el comportamiento de aplastamiento axial de tubos híbridos de aluminio/plástico reforzado con fibra de carbono (Al/CFRP) enrollados en filamento con mecanismo de disparo de agujero circular (Ver Figura 1.6). El diseño híbrido consiste en un tubo interior de pared de aluminio y un tubo exterior de tres capas con ángulos de 30°/-30°/90°.

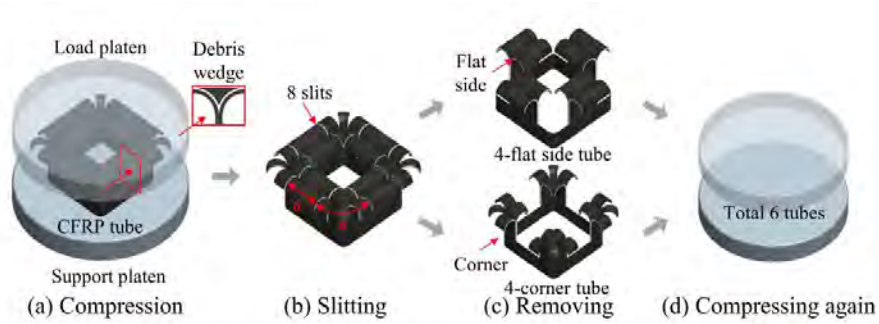
Los resultados experimentales revelaron que el tubo híbrido intacto es capaz de absorber hasta un 50% más de energía de aplastamiento en comparación con la suma de los componentes individuales de la estructura. En todas las configuraciones evaluadas, se observó un patrón de fractura frágil progresiva acompañado de un modo de pandeo local, lo cual indica características favorables para la absorción de energía.

Además, los resultados demostraron que la absorción específica de energía y la eficacia de la fuerza de aplastamiento de los tubos híbridos intactos pueden mejorarse hasta un 39,1% y un 61,7%, respectivamente, mediante el uso de niveles óptimos de los parámetros de diseño.



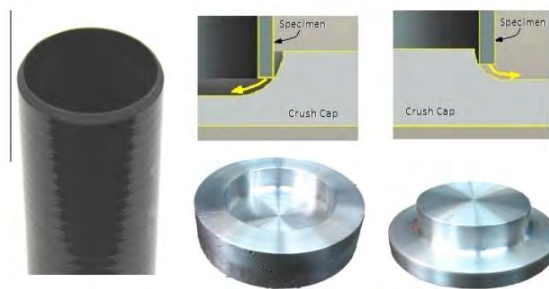
**Figura 1.6** Representación de disparo de agujero circular. [33]

Existen algunas estructuras que por su geometría ya son autoiniciadas, por ejemplo en tubos cuadrados como lo describen Fu *et al.* [5] quienes proponen métodos de prensado y corte para fabricar probetas con elementos laterales y de esquina planos (ver Figura 1.7). Estas probetas se fabrican con el fin de comparar las capacidades de absorción de energía en tubos de CFRP.



**Figura 1.7** Esquema de los procedimientos de "presionar y cortar"; (a) Compresión del tubo, (b) Recorte de 8 rendijas verticales, (c) Extracción de las esquinas o los lados planos, (d) Compresión con solo esquinas o lados planos [5]

Por último, se encuentran las estructuras que actúan como iniciador, cuando las pruebas se someten a cargas por compresión. Siromani *et al.* [34], usaron dos tipos de detonantes de la falla, tubos con extremos achaflanados y otro con tapas contra aplastamiento (Figura 1.8), combinando dos mecanismos desencadenantes de falla. Concluyeron que el disparador de chaflán demostró ser el más efectivo para reducir la carga máxima inicial y producir un SEA alto.



**Figura 1.8** Mecanismos desencadenantes de fallas; (a) Chaflán, (b) Tapas de aplastamiento [34]

### 1.1.2 Geometría y forma de la estructura

La geometría de las estructuras compuestas juega un papel fundamental en la absorción de energía. Se ha demostrado que se pueden lograr diferentes niveles de absorción de energía simplemente cambiando la geometría de la estructura.

Mamalis *et al.* [35], [36], analizaron la energía absorbida en estructuras circulares, cuadradas y rectangulares, siendo la energía absorbida por la sección cuadrada y rectangular 0.8 y 0.5 veces la energía absorbida por la sección circular. Otros trabajos que han estudiado el efecto de la geometría en las estructuras de materiales compuestos son los de Palanivelu *et al.* [34, 35], quienes experimentaron entre nueve formas geométricas diferentes de tubos compuestos: circular, cuadrada, hexagonal, cónica, cónica invertida, dos geometrías cónicas compuestas y dos geometrías corrugadas longitudinalmente. Estas geometrías se pueden observar en la Figura 1.9 y en la Figura 1.10 que muestran las dimensiones de las probetas utilizadas. Realizaron ensayos cuasi estáticos con espesores de 1 mm (relación espesor/diámetro (t/D) entre 0.043 - 0.046) y 2 mm (ratio t/D entre 0.08 - 0.084) para todas las geometrías.

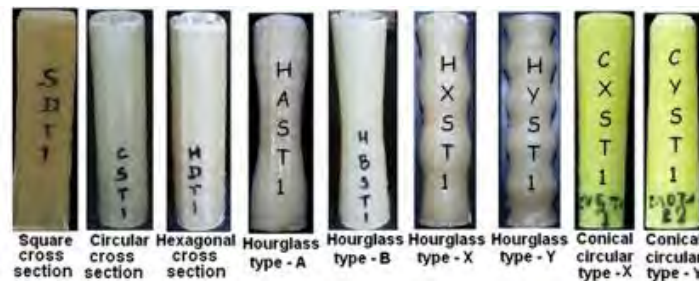


Figura 1.9 Diferentes geometrías investigadas por Palanivelu et al. [37]

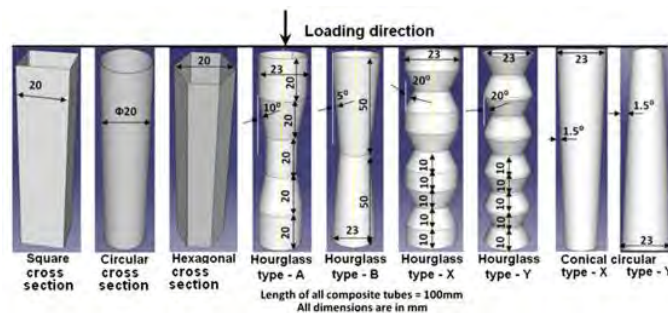


Figura 1.10 Diferentes formas geométricas de los tubos compuestos y sus dimensiones consideradas para el estudio [37]

En la Tabla 1.1 se muestran los resultados de las pruebas. Palanivelu *et al.* [37] observaron que, para espesores de 1 mm, las formas hexagonal y cuadrada no tienen resultados. Esto es debido a que sufrieron un colapso catastrófico, por la rápida generación y propagación de las grietas axiales, mientras que las demás mostraron modos de falla uniformes y progresivos. Esto indica que independientemente de la geometría, la relación  $t/D$  también influye en el modo de falla y en la capacidad de absorción de energía [20].

**Tabla 1.1** Resultados de las diferentes geometrías y espesores ensayados. Modificado de [37]

Sección transversal/Formas geométricas	1mm			2mm		
	Tubos	Carga máxima (kN)	SEA (kJ/kg)	Tubos	Carga máxima (kN)	SEA (kJ/kg)
<b>Sección cuadrada</b>	SS	2.22		SD	7.47	12.3
<b>Sección circular</b>	CS	3.09	51-1	CD	9.97	30.4
<b>Sección hexagonal</b>	HS	2.52		HC	6.30	16.4
<b>Tipo hexagonal – A</b>	HAS	3.10	15.89	HAD	7.00	21.1
<b>Tipo hexagonal – B</b>	HBS	2.99	13.21	HBD	6.42	22.5
<b>Tipo hexagonal – X</b>	HXS	1.25	5.14	HXD	3.85	6.96
<b>Tipo hexagonal – Y</b>	HYS	1.5	4.44	HYD	4.60	13.0
<b>Tipo circular cónico – X</b>	CXS	4.00	13.19	CXD	8.55	23.5
<b>Tipo circular cónico – Y</b>	CYS	4.45	16.20	CYD	9.34	28.8

Tal y como se observa en la Tabla 1.1, las geometrías con mayor absorción de energía son la circular y la circular cónica para ambos espesores. Los resultados confirman estudios previos que concluyen que la geometría circular es capaz de absorber mayores cantidades de energía en comparación con las geometrías cuadradas [28].

Abdewi *et al.* [39] analizaron tres formas geométricas de tubos con materiales compuestos: tubo compuesto corrugado radial (RCCT), tubo corrugado rodeado por un tubo circular (RCSCT) y tubo compuesto circular (CCT). Concluyeron que la forma cilíndrica mantiene una valiosa comparación para todos los parámetros probados en diferentes direcciones de carga. Por otro lado, Palanivelu *et al.* [20] realizaron una investigación experimental en tubos cuadrados y cilíndricos para evaluar la absorción de energía, obteniendo que las estructuras circulares absorben más energía que los tubos cuadrados. Además, produjeron aproximadamente un 59%, 45% y 28% de aumento de la SEA en comparación con el tubo.

Según los resultados reportados por Jishi *et al.* [40], se encontró que las estructuras tubulares circulares presentan características de absorción de energía superiores en un 52% en comparación con las estructuras cuadradas. En su estudio experimental, registraron valores de hasta 100 kJ/kg para las estructuras circulares de las muestras utilizadas.

En un estudio realizado por Sulaiman *et al.* [41], se compararon dos tipos de estructuras tubulares con el objetivo de analizar su capacidad de absorción de energía. Se utilizaron 30 muestras y se encontró que la energía específica máxima para el tubo circular fue de 21.23 kJ/kg, mientras que para el tubo cuadrado fue de 5.2 kJ/kg. Como resultado, se concluyó que la estructura circular absorbe más energía que la estructura cuadrada.

### **1.1.3 Mecanismos y modos de falla**

Las estructuras hechas de materiales compuestos tienen diferentes mecanismos de falla que afectan la absorción de energía. Se han realizado diversos estudios para describir los fenómenos micro mecánicos que ocurren durante la falla y aumentan la disipación de la energía absorbida.

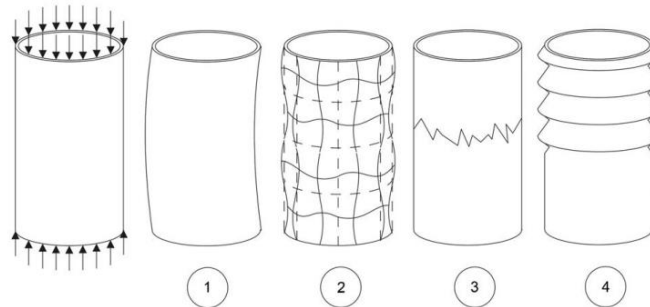
Un enfoque centrado en los materiales para analizar la eficiencia de varios modos de fallo fue introducido por Weaver *et al.* [42]. Concluyeron como base para su análisis, tres mecanismos de fallo: pandeo local, pandeo global y fluencia.

Según Mamalis *et al.* [43] existen tres mecanismos de colapso principales:

- Modo I: Colapso progresivo con micro fragmentación del material compuesto asociado con grandes cantidades de energía.
- Modo II: Fractura frágil del componente resultando en un colapso catastrófico asociado con bajas cantidades de energía.
- Modo III: Plegado progresivo del material de manera similar a las estructuras metálicas asociadas con cantidades de energía intermedias.

Los mecanismos de rotura que se observan en el colapso axial de estructuras de materiales compuestos están relacionados con los modos de fractura interlaminar, de manera que los diferentes mecanismos dan lugar a los modos de fallo Modo I (propagación de la grieta por apertura) y Modo II (crecimientos de grieta por cortadura) [43], [44]. Los diferentes mecanismos son denominados como: 1) cortadura transversal, 2) flexión de la lámina, 3) fractura frágil y el 4) pandeo local.

Posteriormente, Meidell A. [45] realizó propuestas sobre la selección de columnas tubulares resistentes a colapso axial. Planteó que las columnas tubulares presentan cuatro modos de falla como se muestra en la Figura 1.11, las cuales son: 1) pandeo global, 2) pandeo local, 3) fractura y 4) colapso axial progresiva.



**Figura 1.11** Modos de falla para la compresión axial de un tubo circular: 1) pandeo global, 2) pandeo local, 3) fluencia (o fractura), 4) aplastamiento axial [45]

De acuerdo con Mallick [46], la arquitectura de la fibra, mecanismos de detonantes y otros parámetros, tuvieron los siguientes modos de fallo bajo carga de compresión cuasi-estática:

- Modo de fragmentación: Se caracteriza por múltiples grietas interlaminar y longitudinalmente cortas, menores que el espesor del laminado.
- Modo de separación de la pared: Este modo de falla comienza con la aparición de grietas paralelas a las fibras, las cuales pueden ser interlaminares en la pared del tubo. Conforme la carga continúa, los paquetes de fibras se flexionan y forman, pero no se fracturan.



- Modo de plegado: Este modo ocurre con la formación de pequeños pliegues debido a pandeos locales.
- Modo de fractura frágil: Al igual que los modos de fragmentación y separación, el modo de fractura frágil también comienza con la formación de grietas interlaminares.
- Las longitudes de las grietas interlaminares en este caso son de entre una y diez veces el grosor del laminado, llegando a fracturarse por corte transversal o pandeo.

En el trabajo de Dong *et al.* [47], se llevó a cabo un análisis de estructuras de tubo híbrido Al/CFRP con el objetivo de estudiar el mecanismo de fallo en ensayos de compresión axial bajo diferentes niveles de carga. Se encontró que el nivel de daño del tubo juega un papel determinante en la magnitud de la disipación de energía (Ver Figura 1.12). Además, se observó que la ubicación del daño local tiene poco efecto en la curva de fuerza-desplazamiento del tubo, pero se observó una disminución del 29,03% en la absorción de energía en comparación con un tubo completamente dañado. Por lo tanto, se concluye que es importante evitar la aparición de daños locales en las estructuras tubulares.

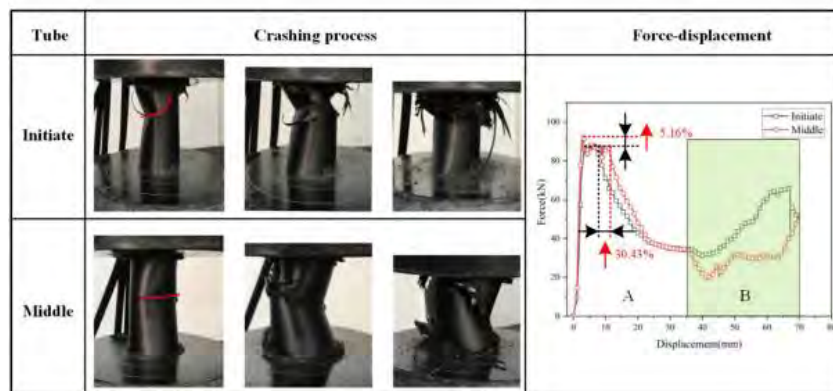


Figura 1.12 Modos de fallo locales [47]

### 1.1.4 Variables de laminado

Otras de las variables que modifican la capacidad de absorción de energía son las variables sobre el diseño y fabricación de los materiales compuestos, tales como el orden de apilado de las capas y la orientación de las fibras. Wang *et al.* [48] estudiaron las características de colapso y la capacidad de absorción de energía de los tubos de material compuesto con diferentes orientaciones de fibra y espesores de pared, bajo condiciones de aplastamiento axial cuasi-estático y de impacto. Por otro lado, Mirzaei *et al.* [49] concluyen que se consiguen mayores valores de absorción de energía cuando el valor de  $\theta$  es más cercano a  $+90^\circ$  que a  $0^\circ$ , es decir cuando el apilamiento es de  $[90/0/0/90]$  se tiene una mejor absorción de energía en comparación con  $[90/90/90/90]$ .

Hu *et al.* [4] analizaron el efecto de la orientación de las fibras en los valores de SEA utilizando fibras de carbono unidireccionales. Las orientaciones ensayadas fueron  $0^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$  y  $\pm 25^\circ$  y determinaron que la orientación más eficiente es la  $\pm 15^\circ$ , debido a que en esta configuración las fibras se rompen durante el colapso.

En esta clasificación de investigaciones encontradas en la literatura se puede encontrar el trabajo de Bambach [50], quien estudió experimentalmente el aplastamiento axial cuasi-estático de 40 tubos cuadrados híbridos con una variedad de metales (acero, aluminio y acero), y una variedad de ángulos de enrollamiento del filamento ( $45^\circ$ ,  $67^\circ$  y  $90^\circ$ ). A partir de las observaciones se demostró que las diferencias entre las cargas medias de aplastamiento y los valores de energía específica para las distintas orientaciones de las fibras consideradas (de  $45^\circ$  a  $90^\circ$ ) fueron pequeñas en menos del 10%, concluyendo que las orientaciones con sólo  $90^\circ$  sufren una gran fractura.

En el trabajo de Hosseini *et al.* [51], se investigaron varias variables relacionadas con la capacidad de absorción de energía en el aplastamiento axial de materiales compuestos. Se demostró que los mecanismos de falla están influenciados por factores como la secuencia de apilamiento, las características geométricas, el tipo de refuerzo de fibra y el proceso de fabricación. De los seis casos analizados, cuatro experimentaron modos de aplastamiento inestables cuando se utilizó una secuencia de apilamiento de  $(0^\circ)$  y

( $\pm 45^\circ$ ). Esto indica que estas secuencias de apilamiento tienen una alta probabilidad de generar modos de aplastamiento inestables y, por lo tanto, una capacidad de absorción de energía inferior a los 10 J/g.

Por otro lado, en las estructuras con secuencias de apilamiento de ( $90^\circ/0^\circ$ ) y ( $45^\circ/0^\circ/-45^\circ$ ), se observaron modos de aplastamiento estables caracterizados por la separación de las fibras. En algunos casos, se logró una SEA (Absorción de energía específica, por sus siglas en inglés) de 50.25 J/g, lo cual es cuatro veces superior a los apilamientos de ( $0^\circ$ ) y ( $\pm 45^\circ$ ).

Actualmente se han llevado a cabo estudios utilizando diferentes materiales con el objetivo de determinar y lograr una mayor absorción de energía. En un estudio realizado por Yang *et al.* (2020) [52], se analizaron materiales compuestos como CFRP, GFRP y aluminio. En dicho análisis, se realizaron pruebas con tres diámetros diferentes: 40 mm, 60 mm y 80 mm.

Los resultados obtenidos mostraron que los materiales compuestos de CF/Al colapsaron en un modo de fallo progresivo similar a los tubos de CFRP y GFRP. Asimismo, se encontró que las muestras con diámetro de 40 mm alcanzaron el mayor SEA con una cantidad de 58,11 kJ/kg. Por otro lado, los materiales híbridos de CF/Al-D40 tuvieron un SEA un 5,6% inferior al de 58,11 kJ/kg.

En su estudio, Zhu *et al.* [53] exploraron el comportamiento de aplastamiento de dos grupos de tubos híbridos de aluminio/CFRP bajo condiciones de carga cuasi estáticas y dinámicas utilizando técnicas experimentales y numéricas. Se fabricaron muestras de aluminio, CFRP y aluminio/CFRP. Los resultados mostraron que, las probetas de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) exhibieron una mayor capacidad de absorción de energía por unidad de masa, con 82.36 J/g, en comparación con el aluminio puro con 32.41 J/g y la hibridación de aluminio/CFRP con 52.88 J/g, considerando un laminado de cuatro capas de CFRP. Por lo tanto, se concluye que los materiales de CFRP puro tienden a absorber más energía que otros materiales en estructuras tubulares circulares.

En su trabajo reciente, Jesús-Ramírez *et al.* [54] llevaron a cabo un estudio comparativo donde determinaron que variables de diseño como la secuencia de apilado, la orientación de la fibra y la longitud de las probetas tienen un impacto significativo en el cálculo de la absorción de energía específica. Además, sugieren la necesidad de establecer normativas para la realización de pruebas en estructuras tubulares fabricadas con materiales compuestos.

### **1.1.5 Conclusiones del estado del arte**

Luego de revisar el estado del arte, se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

- Existe un creciente interés en el estudio de materiales compuestos y estructuras tubulares en relación con la absorción de energía. Esto se debe a su potencial para mejorar la resistencia y la capacidad de absorción de impactos en diversas aplicaciones.
- Se han realizado estudios sobre diferentes materiales, como CFRP, GFRP y aluminio, con el objetivo de determinar su capacidad de absorción de energía. Estos estudios han demostrado que los materiales compuestos, especialmente los de CFRP, tienden a mostrar una mayor capacidad de absorción de energía en comparación con los materiales metálicos.
- De acuerdo con la información obtenida de diferentes autores y de sus diversos estudios experimentales, estos factores se pueden agrupar en cuatro variables principales: mecanismos detonantes de la falla, geometría y forma de la estructura, mecanismos y modos de falla y variables del laminado, que son las que más intervienen en la capacidad de absorción de energía.
- La distinción entre fallo catastrófico y fallo progresivo es importante, y reconocer que el fallo progresivo es el ideal para estudiar la capacidad de absorción de energía es correcto. Un fallo progresivo con múltiples fracturas

indica una mayor capacidad de absorción de energía en comparación con un fallo catastrófico repentino.

- Es válido mencionar que se han llevado a cabo modificaciones en la estructura de los tubos de material compuesto para mejorar su capacidad de aplastamiento progresivo. El efecto de disparo es una técnica utilizada para lograr esto y es relevante para el estudio de la absorción de energía.
- Es útil clasificar los detonantes de fallo según las modificaciones en la estructura de los tubos. Los diferentes tipos de detonantes de fallo, como el bisel (chaflán), tulipán, recortes en las esquinas y cortes en las caras del material, ofrecen opciones para mejorar la capacidad de absorción de energía.
- El mecanismo de activación tipo chaflán demostró ser el más eficaz para reducir la carga máxima inicial y proporcionar una mayor capacidad de absorción de energía.
- El diseño y la fabricación de las estructuras tubulares son aspectos importantes a considerar. Se han realizado investigaciones para determinar la influencia de variables como la geometría, el proceso de fabricación y el tipo de refuerzo de fibra en la capacidad de absorción de energía. Estos estudios destacan la importancia de optimizar los parámetros de diseño para mejorar las propiedades de absorción de energía de las estructuras.
- Se han realizado investigaciones que comparan diferentes dimensiones y geometrías de estructuras tubulares, centrándose principalmente en las secciones circular y cuadrada. También es relevante mencionar que algunos estudios han explorado geometrías más complejas, como hexagonales, cónicas, cónicas invertidas, geometrías cónicas compuestas y geometrías corrugadas longitudinalmente. Esto amplía la comprensión de cómo la geometría puede influir en la capacidad de absorción de energía.
- Las estructuras con geometría circular son capaces de absorber más energía que otras geometrías es consistente con los resultados obtenidos en varios estudios.

La geometría circular puede distribuir los esfuerzos de manera más uniforme, lo que permite una mejor absorción de energía en comparación con otras geometrías.

- La orientación de la fibra y el tipo de apilamiento en las estructuras tubulares también influyen en la capacidad de absorción de energía. Se ha observado que ciertas secuencias de apilamiento, como (90/0) y (45/0/-45), pueden mejorar la absorción de energía en comparación con otras secuencias.

## **1.2 Justificación**

El uso de materiales compuestos en la industria continúa aumentando debido a su bajo peso, a su alta resistencia y sobre todo en términos de seguridad, considerando que se requiere que los componentes estructurales mantengan una capacidad de absorción de energía suficiente para resistir cargas entre la falla de la primera capa hasta el colapso.

Con base en la información del estado del arte, la capacidad de absorción de energía en estructuras tubulares fabricadas de materiales compuestos depende de muchas variables, las cuales se pueden clasificar en cuatro grupos: 1) detonantes de la falla, 2) modos de falla, 3) las variables del laminado con el que se construye y 4) la geometría de la pieza. De estos trabajos, se puede deducir que la mayoría de los resultados se obtienen de estudios experimentales que ofrecen evaluaciones de diseño estructural, pero con variables específicas y sus efectos sobre la capacidad de absorción de energía, pero solo unos pocos ofrecen relaciones empíricas para tratar de determinar algún comportamiento.

Además, no se ha propuesto ningún modelo analítico para evaluar la respuesta de una estructura sometida a cargas por compresión. En especial, no se han propuesto modelos empíricos para relacionar las variables de diseño de las columnas con su capacidad de absorción de carga post falla.

El estudio de la capacidad de absorción de energía de las estructuras tubulares compuestas es un tema de interés para la comunidad científica a nivel mundial, tanto

para generar conocimiento sobre los fenómenos asociados a la falla progresiva de los compuestos laminados como para beneficiar la integridad física de las personas. Algunas de las aplicaciones de este estudio se pueden encontrar en elementos automotrices y aeronáuticos, los cuales reciben el choque y estas deben tener la función de deformarse, comprimirse o romperse para absorber la energía liberada en la colisión y lograr que la detención no sea repentina, sino progresiva.

### **1.3 Definición del problema**

Es ampliamente conocido que la capacidad de absorción de energía de los materiales compuestos laminados depende de varias variables de diseño, como la secuencia de apilado del laminado, la orientación de la fibra, la geometría y forma de la estructura, y la relación diámetro-espesor. Estas variables también están relacionadas con los mecanismos de falla y su secuencia de aparición. Sin embargo, todavía no se ha establecido la relación precisa entre las variables de diseño del laminado, los mecanismos de falla y su secuencia.

Por lo tanto, se requiere de análisis y estudios adicionales para determinar criterios y establecer combinaciones entre las variables mediante relaciones empíricas, con el fin de mejorar la capacidad de absorción de energía. Se reconoce actualmente que ciertas combinaciones de variables de diseño pueden lograr un colapso uniforme y progresivo de las estructuras tubulares, lo que a su vez incrementa su capacidad de absorción de energía.

En este contexto, el objetivo de este estudio es desarrollar una relación empírica que vincule las variables de diseño del laminado con los mecanismos de falla específicos y la secuencia en la que se presentan. Esta relación empírica permitirá evaluar hasta qué punto es posible controlar la capacidad de disipación de energía de un compuesto laminado de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) cuando se somete a cargas cuasi estáticas.

## **1.4 Hipótesis**

De acuerdo con la literatura especializada, existe evidencia suficiente que respalda que la capacidad de absorción de energía en las estructuras tubulares de materiales compuestos está influenciada por las variables de diseño, los mecanismos de falla y la secuencia en la que aparecen. Además, se ha informado que mediante la modificación de las variables de diseño es posible afectar esta capacidad. Por lo tanto, se plantea la hipótesis de que es factible aumentar la capacidad de absorción de energía a través de una combinación adecuada de las variables de diseño.

## **1.5 Objetivo general**

Desarrollar un modelo empírico para regular la capacidad de disipación de energía a través del control de los mecanismos de falla y la secuencia en que se desarrollan al someter compuestos laminados a cargas cuasi-estáticas.

### **1.5.1 Objetivos específicos**

- Analizar las diferentes variables que afectan directamente la absorción de energía de tubos de CFRP cuando son sometidos a cargas por compresión, en sus diferentes modos de falla.
- Definir la variable con la que se estudiarán los efectos relacionados con la capacidad de disipación de energía en materiales compuestos laminados.
- Analizar los modelos existentes sobre la estimación de disipación de energía en compuestos laminados para considerar aquéllos que muestran resultados favorables.
- Desarrollar un modelo analítico que permita una estimación de la capacidad de disipación de energía cuando el compuesto es sometido a cargas cuasi-estáticas.
- Comprobar por medio de la experimentación, la validación del modelo analítico desarrollado.



## **1.6 Alcances y limitaciones**

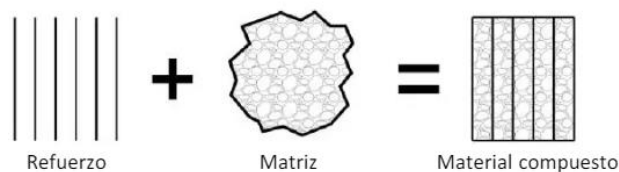
- Se establecerá un modelo empírico que permita ajustar la capacidad de absorción de energía de la estructura a través de la variable en función de los mecanismos de falla.
- Se trabajará con columnas tubulares de material compuesto.
- Se analizará el efecto de alguna de las variables del material compuesto sobre la capacidad de absorción de energía de las estructuras tubulares.

## Marco Teórico

En esta sección, se exponen los conceptos clave extraídos de la literatura revisada, los cuales resultan fundamentales para comprender a fondo el tema de estudio. Además, se incluyen aquellos conceptos relevantes que serán necesarios para llevar a cabo la investigación.

### 2.1 Definición de materiales compuestos

Un material compuesto es básicamente un sistema de materiales formado por dos o más fases distintas, cuya combinación proporciona propiedades que son diferentes y mejores a las de sus constituyentes [15]. En la Figura 2.1 se ilustra la configuración básica de un material compuesto reforzado con fibras. El compuesto resultante presenta propiedades mejoradas respecto a los materiales constituyentes por separado.



**Figura 2.1** Composición básica de un material compuesto [15]

Para ser más específicos, un material compuesto se define como un material constituido por dos o más componentes distintos que no reaccionan químicamente entre sí. Una característica común de todos los compuestos de matriz con refuerzo de fibra es la presencia de elementos fibrosos que aportan rigidez, resistencia y tenacidad, así como una matriz cuya función es definir la geometría del compuesto y transferir los esfuerzos de una fibra a otra.

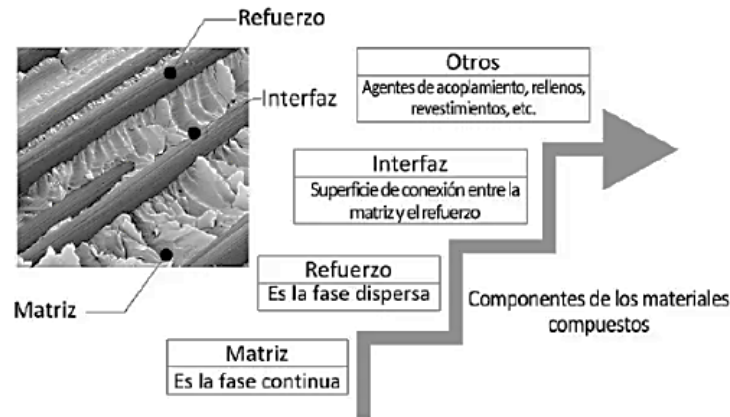
Actualmente los materiales compuestos ofrecen ventajas sobre los materiales convencionales y se caracterizan por algunas de las siguientes propiedades [55].

- Por su alta resistencia mecánica, tanto a tracción como a compresión, corte, flexión y resistencia al impacto.
- Por su ligereza, lo cual significa una contribución económica en transporte, montaje y puesta en obra de las piezas, incluyendo la reducción de cargas muertas en la edificación.
- Por su comportamiento ante la corrosión, y ataque de agentes medioambientales, lo cual genera un menor mantenimiento.
- Por su flexibilidad, lo que permite adoptar formas y diseños creativos junto con el moldeo de grandes piezas y una variedad de acabados, colores y ciertos grados de luminosidad. A través de la selección adecuada de resinas y aditivos.
- Con las configuraciones adecuadas, los materiales consiguen altos índices de aislamiento acústico y térmico.

## **2.2 Componentes en materiales compuestos**

De acuerdo con Besadnjak [56], en los materiales compuestos se pueden identificar dos fases, una continua, constituida por la matriz y otra fase discontinua denominada refuerzo. Los componentes de un material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente unos con otros, la identificación del material y la de su interfase debe ser posible de distinguir por medios físicos.

Las propiedades del nuevo material dependen entonces del nuevo tipo de interfaz y de las características de los componentes. En la Figura 2.2 se muestran los componentes de un material compuesto [15]. El refuerzo proporciona la mayor parte de la dureza y la fuerza, mientras que la matriz une las fibras entre sí proporcionando así transferencia de carga entre el refuerzo (fibras) y entre el material compuesto, las cargas y los soportes externos [57].



**Figura 2.2** Componentes de los materiales compuestos [15]

Las propiedades de los materiales compuestos dependen de una serie de factores:

- Propiedades de la matriz y del refuerzo
- Contenido del refuerzo
- Orientación del refuerzo
- Método de producción del material compuesto [58].

### 2.2.1 Matriz

En un material compuesto la matriz desempeña varias funciones. Fundamentalmente, es la fase continua, la cual engloba y sostiene los elementos de refuerzo, otorgando consistencia y continuidad al material. Entre las funciones básicas se tienen las siguientes [15]:

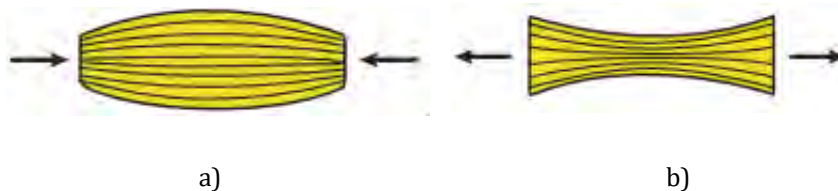
- Aglutinar los refuerzos
- Transferir las cargas aplicadas sobre la matriz hacia los refuerzos
- Proteger la superficie de los refuerzos de la abrasión mecánica
- En los materiales reforzados con fibras, la matriz debe proveer soporte lateral contra la posibilidad de pandeo bajo cargas de compresión

La matriz también permitirá determinar algunas características del material compuesto como la conformabilidad y el acabado superficial. Es decir, de las propiedades de la matriz dependerá la capacidad que posea el material compuesto para

ser conformado con geometrías complejas en procesos que, generalmente, no involucran posteriores etapas de acabado [59].

Al someter al material compuesto a diferentes tipos de cargas mecánicas, la matriz juega diferentes roles:

- *Bajo cargas compresivas:* es la matriz la que soporta el esfuerzo, ya que se trata de la fase continua (ver Figura 2.3 (a)).
- *En tracción:* la matriz transfiere la carga aplicada sobre la pieza a cada una de las fibras o partículas, de manera que éstas sean las que soporten el esfuerzo. Para ello es necesaria una excelente adhesión entre la matriz y el refuerzo (ver Figura 2.3 (b)). Además, muchas veces es la matriz la que determina la resistencia al impacto y la encargada de detener la propagación de fisuras.



**Figura 2.3** Efecto de las cargas sobre los materiales compuestos: (a) Compresión, (b) Tracción [59]

En pruebas experimentales se emplean principalmente matrices poliméricas: termoplásticos y termoestables. De manera general, las resinas termoestables permiten obtener una estructura con forma fija permanente, no se pueden reciclar, no se funden y cuando son sometidas a altas temperaturas se descomponen y degradan. Algunos ejemplos de este tipo de resinas son: el poliéster, viniléster y epoxi, sus características se muestran en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Características de las resinas más utilizadas [60]

Resina	Ventajas	Inconvenientes	Curado
<b>Resina epoxi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La resistencia a la rotura más alta</li> <li>• El peso más ligero</li> <li>• La vida útil más larga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La más costosa.</li> <li>• Sensible a las proporciones de la mezcla y a las variaciones de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usa un endurecedor específico (sistema de dos partes)</li> <li>• Algunos requieren calor</li> </ul>
<b>Poliéster</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de usar (la más popular) resistente a los rayos UV</li> <li>• El coste más bajo</li> <li>• Combina el rendimiento del epoxi con el coste del poliéster</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja tenacidad y resistencia a la corrosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se cura con un catalizador (MEKP)</li> </ul>
<b>Vinilo éster</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La mejor resistencia a la corrosión, la temperatura y el alargamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor tenacidad que la epoxi y coste más alto que el poliéster</li> <li>• Vida útil limitada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se cura con un catalizador (MEKP)</li> </ul>

### Resina epoxi

Epoxi es una resina de tipo termoestable, entre las principales características de este tipo de resinas se encuentran [61]:

- Alta resistencia mecánica, superior a la de la resina poliéster.
- Mayores temperaturas de trabajo que las de la resina poliéster.
- Buena adherencia de la resina a la fibra de refuerzo.
- Bajo coeficiente de dilatación térmica, lo cual es muy útil durante la polimerización.
- Estabilidad química.
- Permite obtener productos de alta calidad y una buena tolerancia dimensional.

#### 2.2.2 Refuerzo

Es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para otorgar al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el principal papel del refuerzo es mejorar las características de la matriz. Es el componente del material que soporta la carga y que también puede aportar propiedades al material compuesto. Los refuerzos pueden ser partículas, fibras o elementos estructurales; de acuerdo con el tipo de

refuerzo, los materiales compuestos se pueden clasificar como se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4** Clasificación de los materiales compuestos, según el tipo de refuerzo [15]

Los materiales de refuerzo pueden presentarse en forma de partículas en un amplio grupo de materiales compuestos, los más numerosos y ampliamente utilizados son aquellos reforzados con fibras (Ver Tabla 2.2). En la mayoría de los compuestos reforzados con fibras, éstas son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el compuesto debe ser utilizado a temperaturas elevadas, también la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. Por lo que se debe tener en cuenta la resistencia específica y el módulo específico de la fibra [59].

**Tabla 2.2** Características principales de las fibras más utilizadas [60]

Fibra de vidrio	Fibra de carbono	Fibra de aramida (kevlar)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La fibra más popular</li> <li>• Ligera, con resistencia moderada a la tracción y a la compresión</li> <li>• De costo bajo y fácil de trabajar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La relación de resistencia y rigidez por peso más alta de la industria (resistencia a la rotura por tracción, compresión y flexión)</li> <li>• Más cara que otras fibras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia más alta a los impactos y a la abrasión que la fibra de carbono</li> <li>• Baja resistencia a la compresión</li> <li>• Difícil de cortar o mecanizar</li> </ul>

**a) Fibra de carbono**

La fibra de carbono es muy utilizada en aplicaciones estructurales donde se requieren altas resistencia a la fatiga o en aquellas situaciones en la que es necesario un buen comportamiento mecánico bajo condiciones estáticas.

La utilización de la fibra de carbono es menor que la de la fibra de vidrio, debido a que su coste de fabricación es más elevado, aunque actualmente sus costos se han reducido debido al aumento de la demanda por parte de las industrias: aeronáutica, aeroespacial, transporte terrestre, deporte, marina, etc. Entre las principales características que presenta la fibra de carbono se encuentran:

- Baja densidad, lo que implica que sus propiedades mecánicas específicas por unidad de peso sean muy elevadas.
- Estabilidad dimensional, pues presenta un bajo coeficiente de dilatación térmica y alta resistencia a la abrasión.
- Estabilidad química y biológica.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Elevada resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica [61].

Sin embargo, las características de los materiales compuestos resultantes de la combinación de refuerzos y matriz dependen de las proporciones de refuerzos y matriz, la forma del refuerzo y el proceso de fabricación [62].

### **b) Fibra de vidrio**

La fibra de vidrio es uno de los refuerzos más utilizados en la fabricación de materiales compuestos en aplicaciones industriales, debido a su alta disponibilidad, bajo costo y sus buenas propiedades mecánicas. Estos materiales presentan una serie de características que se presentan a continuación y que les permite ser ampliamente utilizadas:

- La resistencia mecánica específica es alta, incluso mayor que la del acero.
- Es un buen aislante eléctrico incluso en espesores delgados, pues posee una buena permeabilidad eléctrica y magnética.
- Es un material cuyos componentes son minerales y es incombustible por naturaleza, por lo que no propaga la llama y no produce calor, humos y/o toxicidad.



- Presenta un bajo coeficiente de dilatación térmica, por consiguiente, tiene una alta estabilidad dimensional y es poco sensible a los cambios térmicos e higrométricos.
- Presenta una buena disposición a recibir diversos ensimajes, creando un puente de unión entre las fibras y la matriz, que les permite asociarse a un alto número de resinas sintéticas y matrices minerales.
- Es inerte a la acción biológica, por lo tanto, no sufre alteraciones y no se pudre.
- Presenta una baja conductividad térmica, lo que le permite ser muy utilizada en la construcción, pues posibilita prescindir de los puentes térmicos y por consiguiente un ahorro considerable de calefacción.

De los diversos tipos de fibra de vidrio que se encuentran en el mercado (E, A, C, R o S y D), la fibra de vidrio “E” es la más utilizada en la fabricación de materiales compuestos, abarcando un 90% [60], [63] de mercado, pues ofrece la suficiente resistencia mecánica a un bajo precio.

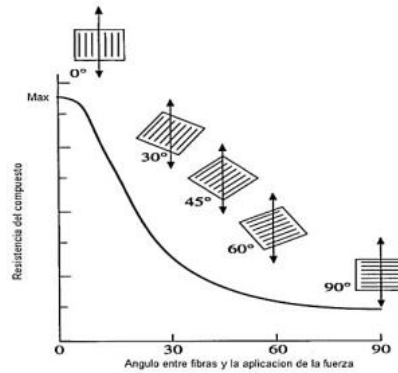
## **2.3 Materiales compuestos laminados**

Los materiales compuestos laminados son uno de los tipos que se derivan de las diferentes configuraciones que hay para el diseño de materiales compuestos. Un compuesto laminado se conforma de láminas apiladas en capas con diferentes orientaciones, de tal manera que al final se obtiene un material con propiedades específicas, las cuales, no solo dependen de las propiedades de sus fases, sino que también dependen de la geometría de los elementos estructurales y su configuración [15], [57].

### **2.3.1 Apilado de laminados**

En los materiales compuestos laminados la orientación de las fibras del refuerzo juega un papel muy importante, ya que las propiedades mecánicas dependen principalmente del ángulo formado entre la dirección de aplicación de la carga y la dirección de la fibra

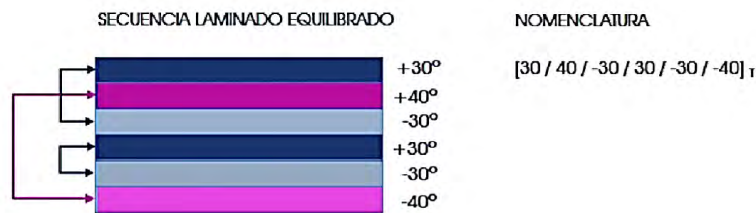
como se muestra en la Figura 2.5. Por ello, las configuraciones de capas en laminados usualmente se colocan a diferentes ángulos una con respecto a otra para obtener un material estructuralmente fuerte [59].



**Figura 2.5** Efecto de la orientación de las fibras sobre la resistencia del compuesto [59]

Balart Gimeno *et al.* [64] clasifican los tipos de laminados de la siguiente manera:

- **Laminado en equilibrio:** Se considera que un laminado está en equilibrio si para cada lámina con orientación  $+\theta$ , existe una con orientación  $-\theta$ , con el mismo espesor y composición. Un ejemplo de este tipo se puede ver en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** Laminado en equilibrio [64]

- **Laminado simétrico:** Para cada lámina con orientación  $\theta$  localizada a una distancia  $h_i$  del plano medio, existe otra lámina (mismo espesor y composición) con la misma orientación  $\theta$  situada a una distancia  $-h_i$  del plano medio (ver Figura 2.7).

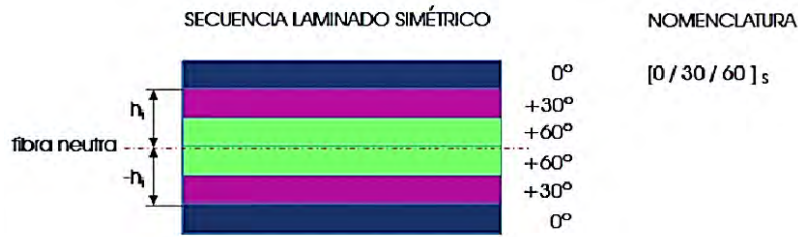


Figura 2.7 Laminado simétrico [64]

- Laminado asimétrico:** En la Figura 2.8 se muestra que para cada lámina a con orientación  $\theta$  localizada a una distancia  $h_i$  del plano medio, existe una lámina (mismo espesor y composición) con la orientación  $-\theta$  situada a una distancia  $-h_i$  del plano medio.

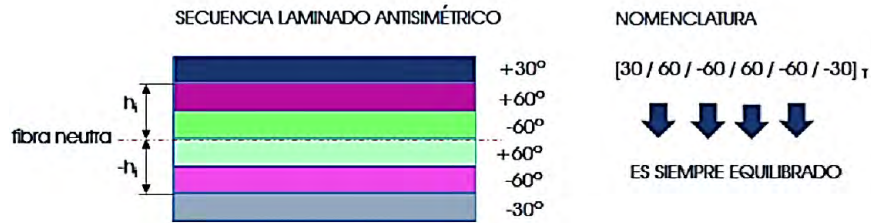


Figura 2.8 Laminado asimétrico [64]

- Laminado unidireccional:** Todas las capas que componen el laminado presentan el mismo ángulo  $\theta$  (ver Figura 2.9).

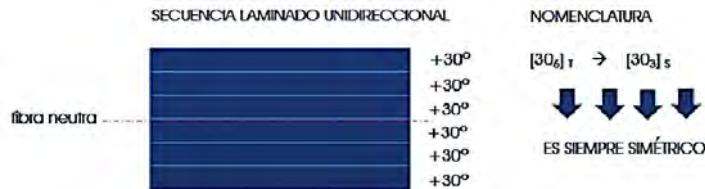


Figura 2.9 Laminado unidireccional [64]

- Laminado angular:** En la Figura 2.10 se muestra que la dirección de las láminas (mismos composición y espesor) no coincide con las direcciones principales (X-Y o  $0^\circ$ - $90^\circ$ ) y se encuentran orientadas solo en los ángulos  $+\theta$  y  $-\theta$ .

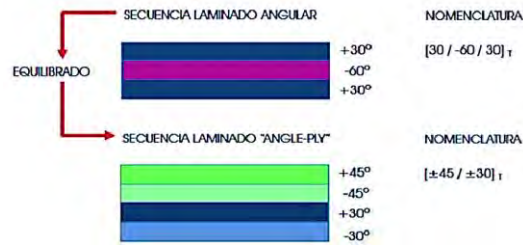


Figura 2.10 Laminado angular [64]

Las orientaciones más utilizadas se muestran en la Figura 2.11. La llamada dirección 0° corresponde a la dirección de carga principal, a una dirección preferencial de la parte correspondiente o a un eje del sistema de coordenadas elegido [62].

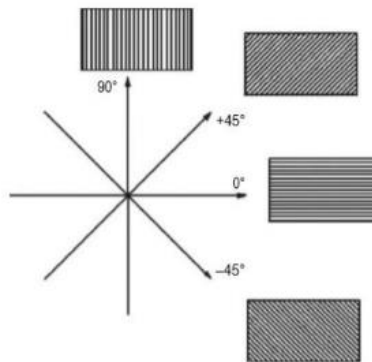


Figura 2.11 Orientación estándar de las fibras [62]

### 2.4 Mecanismos de falla

El daño microestructural del compuesto puede obedecer a alguno de los siguientes fenómenos activos dentro de la lámina: rotura de fibras, formación de grietas en la matriz, rotura de la interfase entre fibra-matriz y pandeo de la fibra bajo esfuerzos de compresión. Además, se debe considerar el daño entre láminas sobre todo el despegue entre láminas adyacentes conocido como delaminación [65] (ver Figura 2.12).

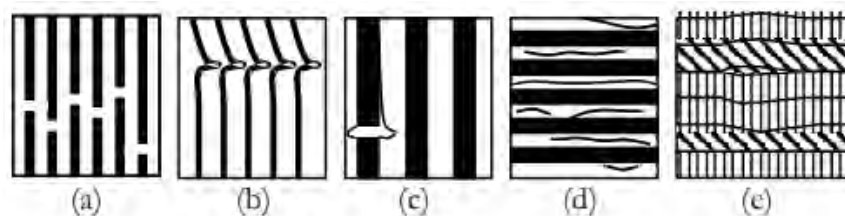


Figura 2.12 Mecanismos de daño en compuestos: (a) rotura de fibras, (b) pandeo de fibra por esfuerzos de compresión, c) debonding d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación [65]

**a) Falla progresiva**

Una falla progresiva en materiales compuestos tubulares se refiere a un proceso gradual de deterioro o debilitamiento en un tubo o estructura compuesta debido a factores como fatiga, daño por impacto, daño por corrosión, delaminación o desgaste. Estos materiales compuestos están compuestos generalmente por una matriz polimérica reforzada con fibras, como fibra de carbono o fibra de vidrio.

La falla progresiva en un tubo compuesto puede comenzar con la aparición de pequeñas grietas o daños en la estructura debido a cargas repetitivas, fuerzas cíclicas o exposición a condiciones ambientales adversas. Estas grietas pueden propagarse lentamente a través del material, debilitando gradualmente la integridad estructural del tubo [66].

**2.5 Características de la absorción de energía**

La absorción de energía se refiere a la capacidad de un material para absorber la energía durante un evento de carga, como un impacto o una deformación. Cuando un material es sometido a una carga, parte de la energía se almacena en el material y puede ser liberada de diferentes formas. La capacidad del material para absorber energía se relaciona con su capacidad para deformarse plásticamente sin romperse, y por lo tanto, para absorber la energía que se libera durante el proceso [67].

La absorción de energía puede ser medida en diferentes unidades, como la energía absorbida por unidad de masa, la energía absorbida por unidad de volumen, o la energía absorbida por unidad de longitud.

**a) Energía total absorbida (EA)**

El área bajo la curva carga/desplazamiento conocido como energía total absorbida (EA), que es función de la densidad del material y del área de la sección transversal de la probeta, y puede obtenerse obtenida matemáticamente mediante la integración de la curva carga-desplazamiento (Ecuación 2.1):

$$EA = \int_0^d F(x) dx \quad \text{Ec. 2.1}$$

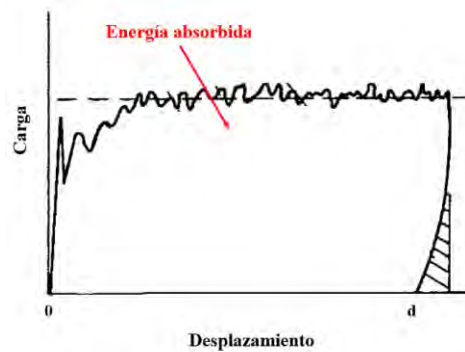
donde,  $d$  es la distancia de compresión,  $F(x)$  es la carga instantánea. Las unidades de  $EA$  son en  $J$  o  $kJ$  [68].

### b) Absorción específica de energía (SEA)

La absorción de energía específica ( $SAE$ , absorción de energía por unidad de masa del material), es calculada con la curva de carga-desplazamiento típica, obtenida del aplastamiento progresivo de un espécimen de tubo compuesto la cual se muestra en la Figura 2.13. Se puede encontrar matemáticamente como en la siguiente ecuación:

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde,  $m$  es la masa de la estructura en  $kg$  o  $g$  y  $kJ/kg$  son las unidades de  $SEA$  [68].



**Figura 2.13** Curva de carga-desplazamiento de material compuesto (Modificado de [24])

## 2.6 Métodos de fabricación de estructuras tubulares

La selección de una técnica de fabricación de estructuras tubulares depende de las necesidades de aplicación, en las que también influyen criterios como el coste de producción, la resistencia del material, el ritmo de producción y la geometría de la pieza a fabricar. Además, la resistencia de cada pieza fabricada con materiales compuestos es una función de la longitud, la orientación y el contenido de la fibra.

De acuerdo a Hull [25], los materiales compuestos, se fabrican por procesos en molde abierto y en procesos en molde cerrado, y se clasifican como se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Procedimientos de fabricación de materiales compuestos [69]

<b>Procesos en molde abierto</b>	
<b>Procedimiento</b>	<b>Descripción</b>
<b>Método de contacto manual (Hand lay-up)</b>	Se colocan sobre un molde fieltros de fibra enrollada, mechas trenzadas y otros tejidos hechos de fibras y se impregnan con resina con un abrocha, posteriormente se pasa un rodillo, se ponen capas hasta que se llegue al espesor del diseño. El moldeado cura sin calor ni presión.
<b>Proyección</b>	Se proyectan simultáneamente hilos cortados y resina a un molde preparado y se pasa el rodillo antes de que la resina endurezca, el curado de este método se hace de igual manera que el método anterior.
<b>Saco de vacío y de presión autoclave</b>	Se impregnan capas de fibras, normalmente hojas unidireccionales con resina y se curan parcialmente para formar un preimpregnado. Las hojas de preimpregnado se colocan en la superficie del molde en orientaciones determinadas, se cubren con un saco flexible, y se consolidan usando otro de presión en autoclave a la temperatura de curado requerida.
<b>Bobinado de filamentos</b>	Hilos continuos de fibra se pasan sobre rodillos y guías y pasan por un baño de resina y se enrollan después, usando una maquina controlada por un programa sobre un mandril con ángulos preestablecidos. La resina cura parcial o totalmente antes de sacar el componente, normalmente un tubo, del mandril
<b>Procesos en molde cerrado</b>	
<b>Procesos</b>	<b>Descripción</b>
<b>Moldeo por compresión en caliente</b>	Las matrices o útiles, calientes y acoplados, se cargan con materia prima y se comprimen para que se adapten a la cavidad y curen.
<b>Pultrusión</b>	Una alimentación continua de fibras en una orientación preseleccionada se impregna con resina y se comprime a través de un calentado para darle la forma de la sección final. Durante el paso por la matriz se produce un curado parcial o total.
<b>Moldeo por inyección</b>	Se inyectan polímeros fundidos o en estado plástico mezclados con fibras cortas, normalmente a alta presión, en la cavidad de un molde rasurado y se deja solidificar o curar.
<b>Moldeo por prensado en frío</b>	Es un proceso a baja presión y baja temperatura en el que las fibras se impregnan con resina y se comprimen entre ambas caras del molde. El calor se genera durante el curado.
<b>Inyección de resina</b>	Se ponen fibras de forma de tejido en el molde, el cual se cierra después. Entonces se inyecta la resina a baja presión en la cavidad y fluye entre las fibras hasta llenar el espacio del molde.
<b>Moldeo por inyección con relación forzada</b>	Un sistema de resina de curado rápido que consta de dos componentes que se mezclan inmediatamente antes de la inyección. Las fibras, o se ponen en el molde cerrado antes de inyectar la resina o se añaden cortadas a trozos y desordenadas a uno de los componentes de la resina para formar una mezcla antes de la inyección.

### 2.6 1 Proceso de laminación manual (Hand lay-up)

La laminación manual o *hand lay up* es la técnica de moldeo la más sencilla adoptado para la producción de artículos de material compuesto; muy extendida en el medio ambiente, así como para la fácil ejecución, también para la reducción del costo de los dispositivos necesarios para el uso. Este sistema consiste en la aplicación de capas de resina y tejidos, intercalados por la eliminación de las burbujas de aire, hasta alcanzar el espesor deseado.

El proceso requiere que las superficies estén limpias, ya que si no estos, podría afectar a la apariencia final y el comportamiento estructural del producto [70]. En las Figura 2.14 y Figura 2.15 se observa el proceso de manera esquemática.

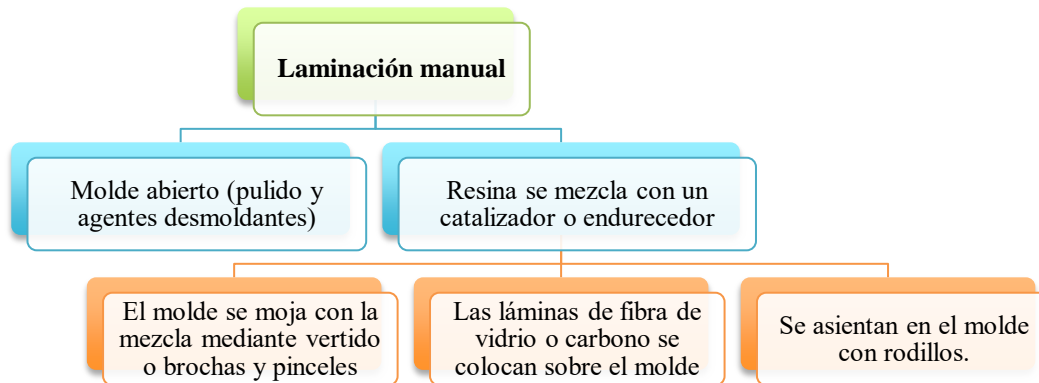


Figura 2.14 Esquema proceso laminación manual (Adaptación) [70]

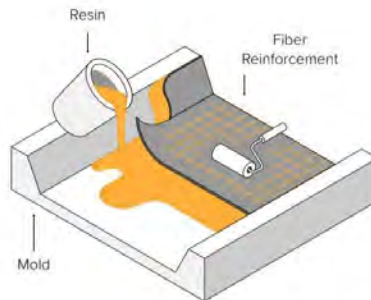


Figura 2.15 Elementos del proceso de laminación manual (Adaptado de [71])

### 2.6.2 Proceso de bobinado de filamentos (Filament Winding)

El bobinado de filamentos es un proceso automatizado de fabricación de componentes estructurales. El proceso crea el bobinado de fibras impregnadas de resina alrededor



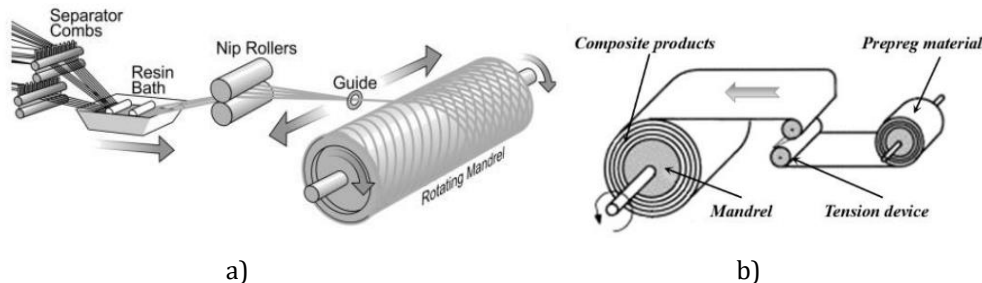
de un mandril y luego para que la fibra enrollada adopte la forma del mandril. Las fibras se colocan en el mandril giratorio mediante un soporte horizontal [72].

La posición de la fibra se controla mediante la velocidad horizontal. Posteriormente se realiza el endurecimiento durante un tiempo y una temperatura adecuados. Tras el endurecimiento el material compuesto enrollado se retira del mandril si mandril no es sacrificable; pero, a veces el mandril puede formar parte del diseño.

Este método de fabricación es el más adecuado para la fabricación de estructuras cilíndricas/circulares. El material comúnmente utilizado para la síntesis de este proceso son las fibras continuas como el hilo y el líquido. Este proceso de fabricación puede dar lugar a una distribución uniforme tanto de la fibra como de la resina.

### a) Métodos y patrones de bobinado del filamento

De acuerdo a Quanjin *et al.* [73] dos métodos diferentes de fabricación: el bobinado en húmedo y el preimpregnado. En húmedo bobinado en húmedo, en el que las fibras deben pasar por un baño de resina y enrollarse en el mandril giratorio. Bobinado en preimpregnado, en el que las hileras de fibras preimpregnadas son colocadas en el mandril giratorio, debe proporcionar un excelente control de calidad, reproducibilidad del contenido de resina, ancho de banda y uniformidad. Estos parámetros pueden satisfacerse bien el proceso de bobinado del filamento, en la Figura 2.16 se muestra los dos patrones básicos de bobinado.



**Figura 2.16** Diagrama básico del patrón de bobinado; (a) método de bobinado en húmedo; (b) método de bobinado con preimpregnado [73]

### 2.6.3 Proceso de Preimpregnado

El método de material preimpregnado (*Prepreg*) puede ser visto como una extensión del método de moldeo en húmedo. En el material preimpregnado las fibras están colocadas unidireccionalmente o bidireccionalmente, impregnadas inicialmente con resina. El método de material preimpregnado es mucho más preciso que otros métodos, sin embargo, otro aspecto a considerar es el proceso de curado posterior. Después de que las fibras impregnadas se moldean en la forma deseada, es necesario someter el material compuesto a un proceso de curado en horno o autoclave. Esto asegura que la resina se endurezca completamente y que el material adquiera sus propiedades finales. El uso de un horno o autoclave es esencial para obtener la resistencia y la durabilidad requeridas en muchas aplicaciones, pero también añade una etapa adicional al proceso que debe ser cuidadosamente controlada.

El material preimpregnado utilizado para moldeo requiere de una ligera adherencia con la finalidad de que las capas no resbalen sobre otras capas durante el moldeo y para mantener su posición en el molde, también debe ser flexible al molde de esta manera las formas complejas pueden ser trabajadas como se muestra en la Figura 2.17, estas dos propiedades son dependientes de la matriz del material (resina).

El material preimpregnado suele estar disponible en rollos o láminas, lo que facilita su manejo y uso en la fabricación de componentes. Esto lo hace especialmente adecuado para la producción en masa de piezas compuestas de alta calidad, como componentes aeroespaciales y automotrices, donde la precisión y el rendimiento son fundamentales [74].

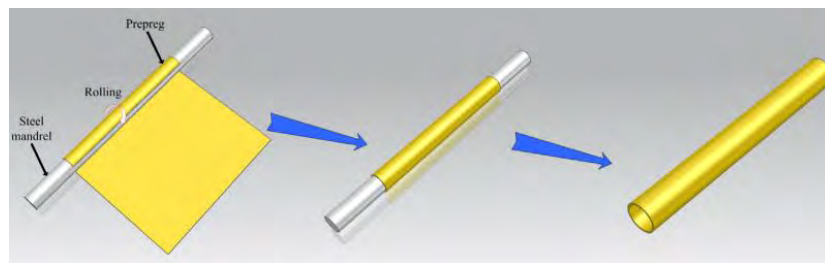


Figura 2.17 Método preimpregnado [4]

### 2.6.4 Comparación de procesos de manufactura de estructuras de material compuesto

La Tabla 2.4 muestra una comparativa de tres procesos comunes en la fabricación de materiales compuestos: laminación manual, *filament winding* (enrollado de filamento) y preimpregnado. Estos procesos difieren en términos de su enfoque, aplicaciones y características principales.

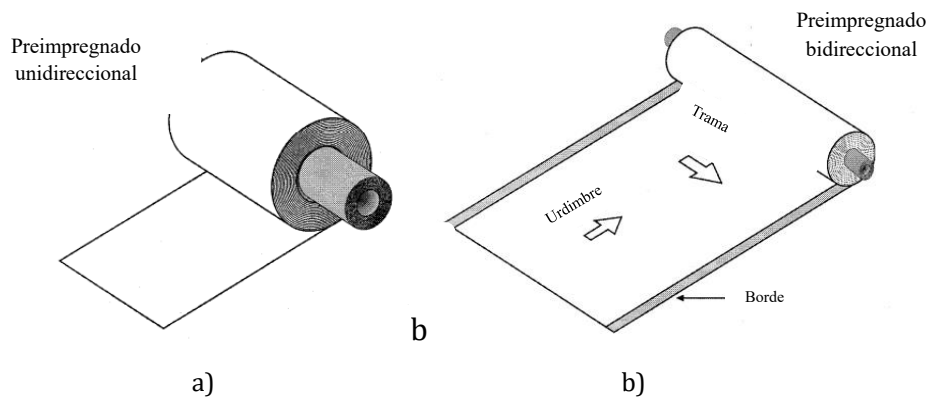
**Tabla 2.4** Comparación de procesos de manufactura en estructuras de material compuesto

Características	Laminación Manual	<i>Filament Winding</i>	Preimpregnado
<b>Método de Fabricación</b>	Proceso manual en el que se aplica resina y tejido o refuerzo de fibra de forma individual, seguido de la consolidación manual o con rodillo.	Proceso automatizado que involucra la deposición de filamentos de refuerzo, como fibra de vidrio o carbono, impregnados con resina en una forma específica.	Materiales de refuerzo, como tejidos de fibra de carbono o vidrio, se impregnan previamente con resina y se suministran en forma de láminas o rollos.
<b>Automatización</b>	Mínima	Alta	Alta
<b>Control de Calidad</b>	Depende en gran medida de la habilidad del operador. Puede tener variabilidad.	Mayor consistencia y precisión en la deposición de refuerzo y resina.	Mayor control de calidad debido a la uniformidad de la impregnación de resina.
<b>Productividad</b>	Menos eficiente en términos de tiempo y costos debido a la labor manual.	Más eficiente en términos de tiempo y costos, especialmente para piezas cilíndricas.	Eficiente en términos de tiempo y costos debido a la preparación previa de los materiales.
<b>Aplicaciones Comunes</b>	Piezas pequeñas y prototipos, a menudo en la fabricación artesanal.	Piezas cilíndricas, como tuberías, recipientes a presión y mangueras.	Amplia gama de aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, deportes y más, especialmente para piezas de alto rendimiento.
<b>Resistencia y Peso</b>	Varía según la calidad de la laminación y la consolidación. Puede ser más pesado debido al exceso de resina.	Alta relación resistencia-peso, ya que los filamentos se orientan de manera precisa.	Buena relación resistencia-peso debido a la impregnación controlada de la resina.
<b>Complejidad de Diseño</b>	Limitada para piezas con formas complejas debido a la labor manual.	Puede producir piezas más complejas, pero con limitaciones en formas no cilíndricas.	Permite una mayor flexibilidad en la forma de las piezas debido a la preimpregnación de tejidos.
<b>Tiempo de Curado</b>	Depende de la resina y las condiciones ambientales. Puede ser más largo.	Menor tiempo de curado, ya que la resina suele estar preimpregnada y curada.	Generalmente más rápido debido a la impregnación controlada de la resina.

Es importante tener en cuenta que la elección entre estos procesos de fabricación de materiales compuestos depende de la aplicación específica, el nivel de automatización requerido, el diseño de la pieza y los costos asociados. Cada uno de estos procesos tiene sus ventajas y desventajas, y la selección adecuada se basa en las necesidades del proyecto.

**a) Fibras unidireccionales y bidireccionales**

El prepreg unidireccional, como su nombre indica, está compuesto por material que contiene filamentos orientados en una sola dirección. Por otro lado, el prepreg bidireccional contiene fibras dispuestas en las direcciones de 0 grados (dirección de urdimbre) y 90 grados (dirección de trama), (Ver Figura 2.18).



**Figura 2.18** Tejidos de preimpregnado: a) Unidireccional, b) Bidireccional (Modificado de [74])

La elección entre fibras unidireccionales y bidireccionales depende de las necesidades de diseño y las cargas esperadas en la aplicación específica. Si se requiere una alta resistencia en una dirección particular, las fibras unidireccionales pueden ser la elección adecuada. Si se necesita una mayor versatilidad y resistencia en múltiples direcciones, las fibras bidireccionales son preferibles. En muchos casos, se utilizan combinaciones de ambos tipos de fibras para lograr propiedades óptimas en aplicaciones de materiales compuestos (Ver Tabla 2.5).

**Tabla 2.5** Comparación de fibras unidireccionales y bidireccionales

	<b>Fibras unidireccionales</b>	<b>Fibras bidireccionales</b>
<b>Orientación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todas las fibras están alineadas en una única dirección.</li> <li>• Las fibras se extienden en paralelo a lo largo de una dirección principal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las fibras se distribuyen en dos direcciones principales, por lo general en un patrón de <math>0^\circ/90^\circ</math>.</li> <li>• Las fibras se extienden en dos direcciones perpendiculares entre sí.</li> <li>• Proporciona propiedades equilibradas en dos direcciones principales (<math>0^\circ</math> y <math>90^\circ</math>).</li> </ul>
<b>Propiedades</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistencia y rigidez en la dirección de la fibra.</li> <li>• Se utiliza para aplicaciones donde se requiere una carga unidireccional, como vigas o postes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora su capacidad para resistir cargas tanto en dirección longitudinal como transversal.</li> <li>• Se utiliza para aplicaciones donde las fuerzas pueden actuar en múltiples direcciones.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene propiedades limitadas en las direcciones perpendiculares a la orientación de la fibra, lo que significa que es menos eficaz para resistir fuerzas en otras direcciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene propiedades intermedias en comparación con las fibras unidireccionales.</li> </ul>

### **Metodología para la Regulación de la Capacidad de Absorción de Energía de Estructuras Tubulares**

En esta sección, se encuentra el proceso para la elaboración de la investigación de tesis, dividiéndose en dos secciones principales. En la primera parte, se realiza un análisis de la revisión del estado del arte con el objetivo de determinar las variables que afectan al cálculo de la disipación de energía en materiales compuestos. Utilizando los datos recopilados en esta revisión, se desarrollará un modelo empírico que permita determinar la capacidad de absorción de materiales compuestos laminados.

En la segunda parte, se describe el proceso experimental cuya función principal es validar el modelo desarrollado. En la Figura 3.1 se presenta el esquema de la metodología que se llevará a cabo durante la investigación. Esta figura proporciona un resumen visual de los pasos y procesos que se seguirán para realizar el estudio.

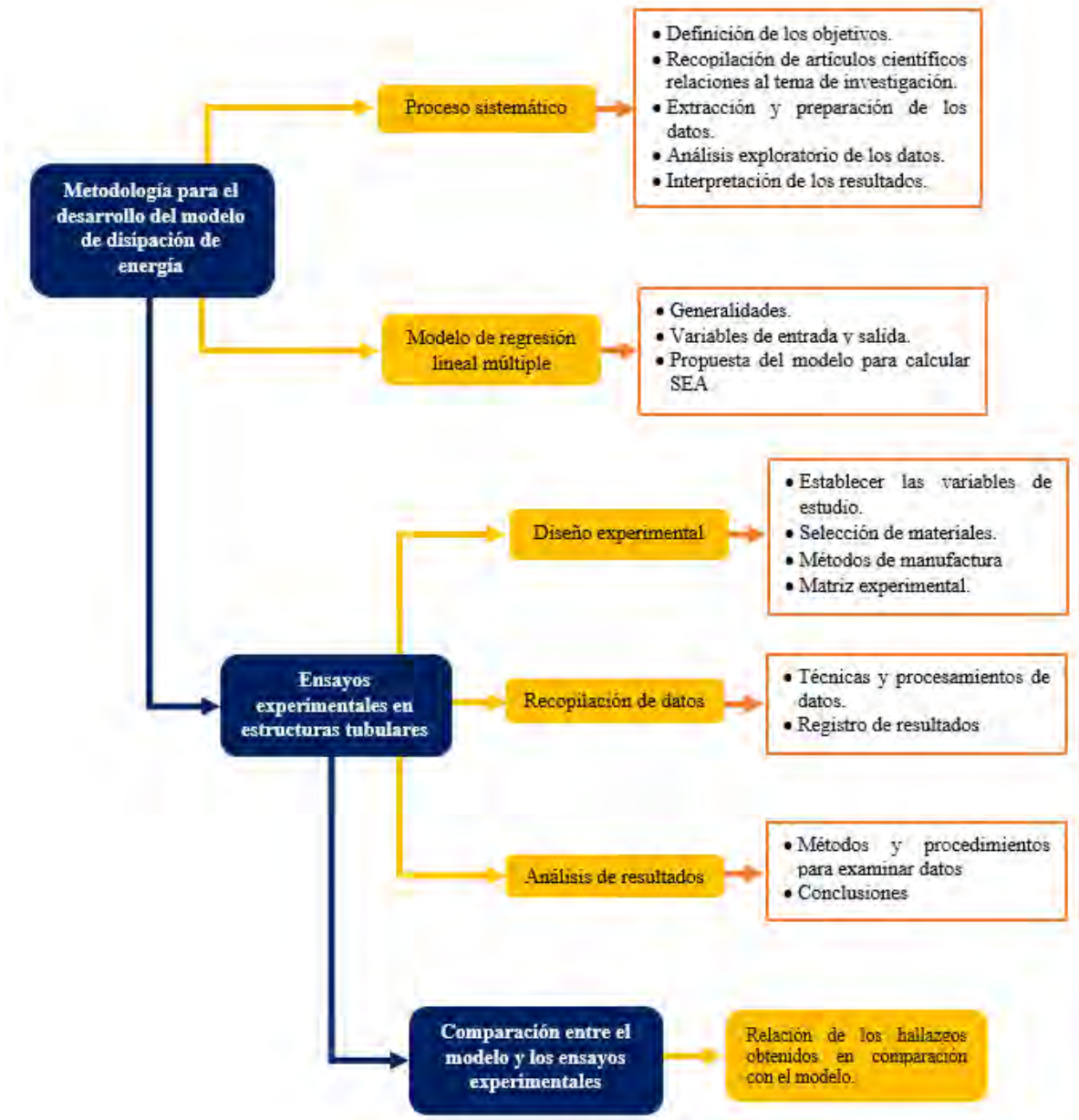


Figura 3.1 Metodología para obtener las recomendaciones para el diseño de estructuras tubulares de materiales compuestos

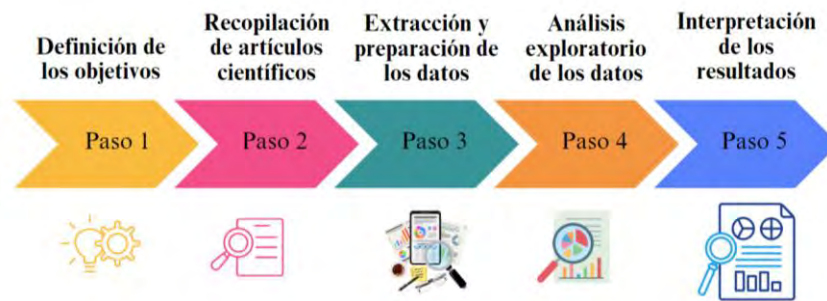
### 3.1 Metodología para el desarrollo del modelo de absorción de energía específica

En esta sección, se presenta el análisis de los datos obtenidos durante la revisión de la literatura. El propósito de este análisis es identificar las variables relevantes que deben estudiarse en relación con la disipación de energía en materiales compuestos

laminados. Una vez que se hayan determinado estas variables, se propondrá un modelo que permita estimar la cantidad de energía disipada en estos materiales.

### 3.1.2 Proceso sistemático para obtener las variables del modelo de disipación de energía

El análisis de datos para esta investigación se realiza a través de la revisión del estado del arte, donde se definen las variables a analizar basándose en los datos recopilados de la literatura. El análisis de datos de artículos científicos es un proceso sistemático que implica varias etapas las cuales se muestran en la Figura 3.2 se describen a continuación:



**Figura 3.2** Proceso sistemático para analizar las variables del modelo de estimación de la SEA

Los dos primeros pasos mencionados, definición de los objetivos y recopilación de artículos científicos, son elementos esenciales del análisis de la literatura que se discuten en las secciones 1.1.2, 1.1.3 y 1.1.4. Estos pasos permiten establecer metas claras y obtener la información necesaria para llevar a cabo la investigación sobre la disipación de energía en materiales compuestos laminados.

### 3.1.3 Extracción y procesamiento de resultados experimentales reportados en la literatura

Se revisaron los artículos seleccionados para extraer los datos relevantes que se adaptaran a la investigación. Específicamente, se buscaron datos relacionados con el análisis de la absorción de energía y la energía específica por unidad de masa de



estructuras tubulares cilíndricas hechas de material compuesto reforzado con fibra de carbono y vidrio.

Una vez extraídos los datos, se procedió a ingresarlos en bases de datos. En dichas bases, se registraron los datos más relevantes de cada ensayo, como se muestra en la Tabla 3.1 para el análisis de la secuencia de apilado del laminado y la

Tabla 3.2 que describe la orientación de la fibra en estructuras tubulares. Los datos más importantes para el análisis de la información son la absorción de energía (EA) y la energía específica por unidad de masa (SEA), ya que son indicadores clave de la capacidad de absorción de energía del material.

Durante la revisión y análisis del estado del arte (secciones 1.1.4, 3.1.4 y 3.1.5), se han identificado diversas variables que ejercen influencia en el cálculo de la capacidad de absorción de energía en el diseño de estructuras fabricadas con materiales compuestos. Entre estas variables, destacan especialmente la *orientación de las fibras y la secuencia de apilado*.

#### **a) Orientación de la fibra**

La orientación de las fibras juega un papel fundamental en la respuesta mecánica de los materiales compuestos. Las fibras pueden estar alineadas en diferentes direcciones en relación con la carga aplicada, lo que afecta significativamente su capacidad para absorber y disipar energía durante la deformación. La selección adecuada de la orientación de las fibras puede mejorar considerablemente la resistencia del material compuesto, lo que resulta esencial en aplicaciones donde se requiere una alta absorción de energía, como en la industria automotriz o aeroespacial.

#### **b) Secuencia de apilado**

La secuencia de apilado de los diferentes materiales en la estructura compuesta también desempeña un papel esencial en su capacidad de absorción de energía. Al

variar el orden en que se colocan los diferentes laminados o capas de material, se puede modificar la forma en que la estructura responde a las cargas aplicadas, en este caso a cargas estáticas. La secuencia de apilado puede influir en la distribución del esfuerzo y en la capacidad de deformación del material compuesto, lo que afecta directamente su capacidad para absorber energía.

Por lo tanto, se consideró que las *la configuración de apilamiento y orientación de las fibras*, ya que estas variables tienen un impacto significativo en la disipación de energía en cada muestra reportada en la literatura. Para obtener una visión más detallada de los datos, se pueden consultar las tablas completas en el Apéndice A y B.

**Tabla 3.1** Base de datos de laminados [0°/90°] reportados en la literatura

Autor (es)	Dimensiones			Orientación de fibra		EA	SEA
	Diámetro mm	Longitud mm	Espesor mm	Orientación	Apilado	kJ	kJ/kg
Zhu <i>et al.</i> [53]	52.12	200	1.09	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	2.13	64.76
	53.49	200	1.63	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	3.05	59.69
	54.48	200	2.31	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	4.63	66.82
	47.7	200	0.98	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	2.20	82.67
	47.72	200	1.37	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	3.38	86.32
	47.71	200	1.85	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	4.3	83.03
	52.45	200	2.56	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	3.27	30.56
	53.72	200	3.26	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	4.47	36.16
	54.86	200	3.65	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	5.00	35.74
	49.86	200	2.38	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	5.25	52.88
	49.9	200	2.68	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	7.14	63.41
	49.94	200	3.29	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	9.35	75.42
	Mahdi <i>et al.</i> [75]		120.11	8.032	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	5.32
		120.129	8.064	15/-75	[15°/-75°] <sub>8</sub>	7.92	16.41
		119.857	8.103	30/-60	[30°/-60°] <sub>8</sub>	6.58	13.41
		120.142	8.003	45/-45	[45°/-45°] <sub>8</sub>	5.79	11.95
		120.033	8.094	60/-30	[60°/-30°] <sub>8</sub>	6.58	13.23
		120.211	7.998	75/-15	[75°/-15°] <sub>8</sub>	7.92	15.84002

**Tabla 3.2** Orientación de la fibra con diferentes  $\theta$  en estructuras tubulares, datos obtenidos de la literatura

Autor (es)	Dimensiones		ID	Orientación de fibra	EA	SEA
	Diámetro mm	Longitud mm		(°)	J	J/g
<i>Hu et al.</i> [4]	50	125	A	15	7308.8	72.5
	50	125	B	30	6725.4	72.2
	50	125	C	45	5052.9	56.3
	50	125	D	60	6155.8	68.8
	50	125	E	75	6365.7	66.8
<i>Yang et al.</i> [52]	40	80	F	0	1620	58.11
	60	80	G	0	2310	55.85
	80	80	H	0	2920	54.11
	40	80	I	0	2010	50.72
	60	80	J	0	3010	50.45
	80	80	K	0	3720	46.73

### 3.1.4 Análisis exploratorio de los datos

En este estudio, se analizó cómo la configuración de apilamiento de las fibras afecta la capacidad de disipación de energía en materiales compuestos. Para lograr esto, se analizó el apilamiento del laminado en cada muestra con el objetivo de identificar un parámetro común. Para ello, se extendió el laminado de cada muestra, teniendo en cuenta el tipo de apilamiento utilizado. Este proceso permitió tomar en consideración la orientación de las fibras en el centro de cada apilamiento.

En la Figura 3.3 se muestra un esquema del procedimiento utilizado para investigar la influencia de la secuencia de apilado de las fibras. Primero se determinó el tipo de apilado que se estaba analizando, es decir, cómo se organizaban las fibras en la estructura. Luego se llevó a cabo un análisis de la orientación de las fibras en cada capa para comprender cómo estaban dispuestas. Por último, se seleccionaron las capas céntricas, es decir, las capas ubicadas en el centro de la estructura, como punto de comparación entre ellas. Este enfoque permitió establecer un medio de comparación coherente para evaluar la influencia de la secuencia de apilado de las fibras con la capacidad de disipación de energía en los materiales compuestos.

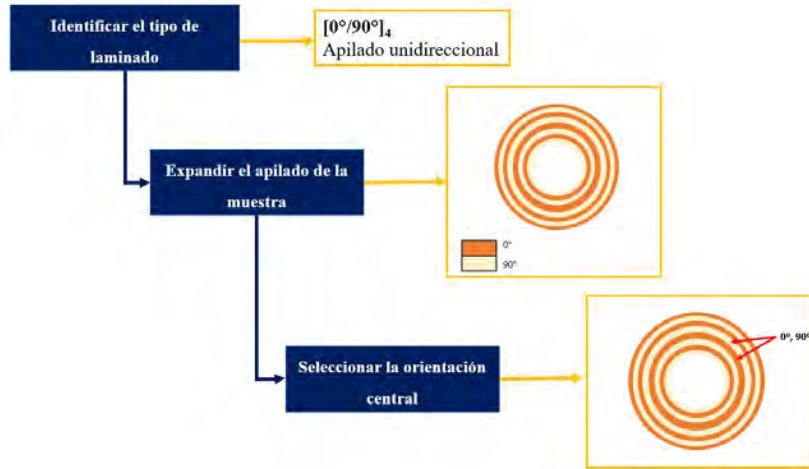


Figura 3.3 Metodología de análisis para clasificar los laminados reportados de la literatura

El procedimiento descrito anteriormente se llevó a cabo con cada laminado seleccionado de la literatura. Algunos ejemplos de estos laminados se muestran en la Tabla 3.3, mientras que la información completa se encuentra disponible en el Apéndice C.

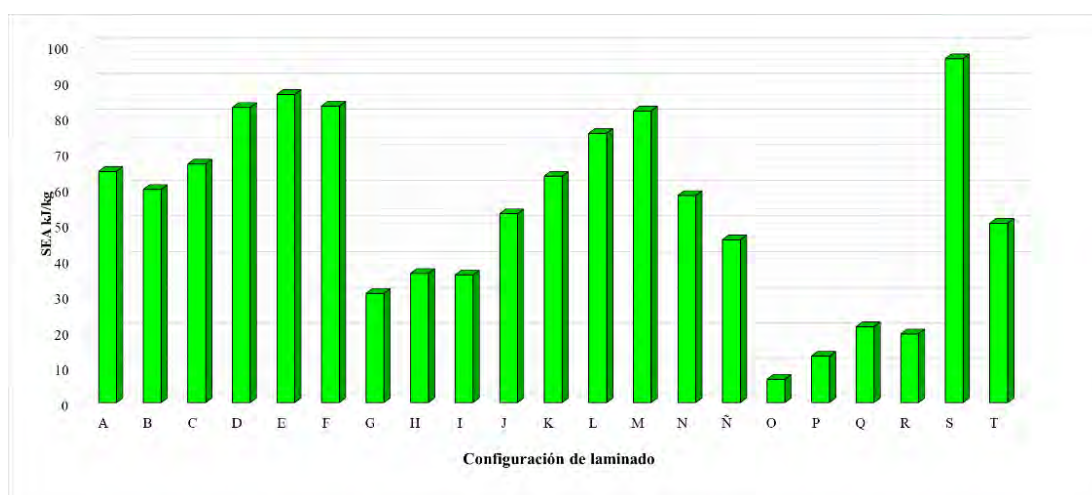
Tabla 3.3 Clasificación de la secuencia de apilado de laminados reportados en la literatura

Autores	Nomenclatura	ID	Configuración de apilado	SEA kJ/kg
Zhu et al. [53]	$[0^\circ/90^\circ]_4$	A	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	64.76
	$[0^\circ/90^\circ]_6$	B	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	59.69
	$[0^\circ/90^\circ]_8$	C	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	66.82
	$[0^\circ/90^\circ]_4$	D	0 90 0 90 0 90 0 90	82.67
	$[0^\circ/90^\circ]_6$	E	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	86.32
	$[0^\circ/90^\circ]_8$	F	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	83.03
	$[0^\circ/90^\circ]_4$	G	0 90 0 90 0 90 0 90	30.56
	$[0^\circ/90^\circ]_6$	H	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	36.16
	$[0^\circ/90^\circ]_8$	I	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	35.74
	$[0^\circ/90^\circ]_4$	J	0 90 0 90 0 90 0 90	52.88
	$[0^\circ/90^\circ]_6$	K	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	63.41
	$[0^\circ/90^\circ]_8$	L	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	75.42
Kim et al. [75]	$[90^\circ/0^\circ]_4$	M	0 90 0 90 0 90 0 90	81.7
	$[90^\circ/0^\circ]_6$	N	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	58
	$[90^\circ/0^\circ]_6$	Ñ	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	45.6

En la Tabla 3.3 se presenta la configuración de apilado  $[0^\circ/90^\circ]$  utilizada para cada laminado seleccionado del análisis de la literatura. La tabla incluye la nomenclatura del

apilado, un ID para identificar cada muestra, la orientación de la fibra seleccionada (una característica común entre los laminados) y la energía específica por unidad de masa (SEA), que es el objetivo principal de investigación en este estudio. El apilado se refiere a la disposición de las capas de material compuesto en la estructura. En la tabla se detalla la configuración  $[0^\circ/90^\circ]$  de apilado utilizadas para cada muestra analizada, lo cual es crucial para entender la influencia del arreglo del número de las capas en la capacidad de absorción de energía del material compuesto.

Utilizando los datos identificados en la Tabla 3.3, se procedió a graficar la energía específica por unidad de masa (SEA) con el fin de analizar la tendencia existente entre la energía y el apilado de la fibra. Estas representaciones gráficas proporcionan una visualización clara de cómo varía la capacidad de absorción de energía en función de la configuración de apilado. Los resultados de esta representación se muestran en la Figura 3.4, en esta figura, se pueden observar las relaciones entre la SEA y el apilado utilizado en el estudio. El análisis de la figura permite identificar tendencias y patrones en la capacidad de absorción de energía en relación con la configuración de apilado. Estos resultados son de importantes para comprender cómo el apilado de las capas de material compuesto afecta la capacidad de absorción de energía en las estructuras tubulares.



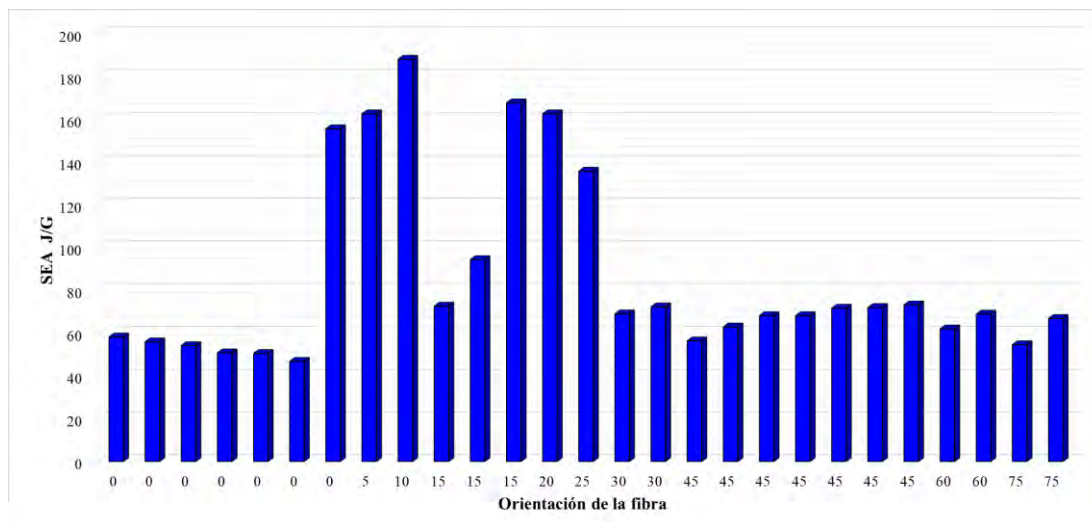
**Figura 3.4** Influencia de la secuencia de apilado de laminados  $[0,90]$

En la Figura 3.5 se representan gráficamente los datos obtenidos de la

Tabla 3.2, con el objetivo de comparar la influencia que tiene la orientación de la fibra con la capacidad de energía por unidad de masa (J/g). Para este análisis, se consideraron diferentes ángulos de orientación de la fibra, que van desde  $\theta = 0^\circ$  hasta  $75^\circ$ , con incrementos de  $5^\circ$ .

La orientación de la fibra es un parámetro crítico en las estructuras de material compuesto, ya que influye directamente en sus propiedades mecánicas y en su capacidad para absorber y disipar energía en situaciones de carga estática. Al variar el ángulo de orientación de la fibra, se pueden obtener diferentes configuraciones estructurales y, por lo tanto, diferentes niveles de capacidad de absorción de energía. En la Figura 3.5, se representan las SEA obtenidas para cada ángulo de orientación de la fibra. Se observa que a medida que el ángulo de orientación se incrementa, la capacidad de energía por unidad de masa puede verse afectada de manera significativa. Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar cuidadosamente la orientación de la fibra en el diseño de estructuras de material compuesto para maximizar su rendimiento en términos de absorción de energía.

El análisis de esta variable proporciona información para el desarrollo del modelo empírico que permitirá predecir la capacidad de energía en estructuras tubulares de material compuesto en función de su orientación de fibra y la secuencia de apilado. Estos datos servirán como base para establecer relaciones matemáticas y desarrollar un modelo predictivo confiable, lo que facilitará la optimización del diseño de dichas estructuras en función de la absorción de energía.



**Figura 3.5** Influencia de la orientación de la fibra en estructuras tubular

### 3.1.5 Interpretación de los resultados

Con la información proporcionada en las Figura 3.4 y Figura 3.5, se puede inferir que la orientación de la fibra y el apilamiento del laminado son variables que afectan el comportamiento de la capacidad de absorción de energía en materiales compuestos cuando se someten a cargas de compresión cuasi estáticas. Se observan diferencias en los resultados, que pueden estar influenciadas por diversas variantes experimentales.

Entre las variantes experimentales que pueden influir se encuentran la velocidad de carga durante el ensayo, la relación diámetro-espesor del tubo, las dimensiones geométricas del material compuesto, así como el nivel de carga aplicado en los ensayos. Además, la secuencia el número de capas en el laminado pueden tener un impacto significativo en la capacidad de absorción de energía del tubo.

Por lo tanto, se ha determinado que tanto la orientación de la fibra como el apilado del laminado serán las variables que se utilizarán para el desarrollo del modelo empírico que determinará la capacidad de energía obtenida en las estructuras tubulares de material compuesto.

La orientación de la fibra se refiere a la dirección en la que se alinean las fibras del material compuesto. Se ha observado que esta orientación puede tener un impacto significativo en la capacidad de absorción de energía de la estructura. Por lo tanto, se analizaron los ensayos reportados en la literatura, tomando ángulos desde  $\theta = 0^\circ$  hasta  $75^\circ$ . Estos

ángulos representan la desviación de las fibras respecto a una dirección de referencia. Además de la orientación de la fibra, el apilado del laminado también es una variable importante a considerar. El apilado se refiere a la secuencia en la que se colocan las capas de material compuesto en la estructura tubular. La disposición de las capas puede variar, y se ha observado que diferentes configuraciones de apilado pueden tener efectos significativos en la capacidad de absorción de energía de la estructura.

Con el fin de desarrollar el modelo empírico que permita predecir la capacidad de energía obtenida en las estructuras tubulares de material compuesto, se recopilaron datos de pruebas experimentales para diferentes combinaciones de orientación de la fibra y apilado del laminado. Estos datos se utilizarán para establecer relaciones entre estas variables y la capacidad de energía resultante.

### 3.1.6 Generalidades del modelo regresión lineal múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple permite establecer una relación entre una variable de respuesta ( $Y$ ) y múltiples variables de diseño ( $X_1, X_2, \dots, X_K$ ), incluyendo sus interacciones. Esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación [76]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 \dots \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

- $Y$  representa la variable de respuesta que queremos predecir o explicar.
- $X_1, X_2, \dots, X_K$  son las variables de diseño o predictores que influyen en la variable de respuesta.
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K$  son los coeficientes de regresión, que indican la relación entre cada variable de diseño y la variable de respuesta.

Pero además si definimos  $X_3 = X_1 X_2$ ,  $X_4 = X_1^2$  y  $X_5 = X_2^2$ ; entonces, la Ecuación 3.1 puede escribirse así:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \dots + \beta_K X_K \quad \text{Ec. 3.2}$$



La cual representa la forma general del modelo de regresión lineal múltiple y permite simplificar el proceso de análisis de regresión múltiple. La forma general del modelo de regresión lineal múltiple es ampliamente utilizada y su análisis permite estimar los parámetros del modelo y realizar inferencias sobre la relación entre las variables de diseño y la variable de respuesta.

Para estimar los parámetros de la regresión lineal múltiple se necesita contar con  $n$  datos ( $n > k$ ), que tienen la estructura descrita en la Tabla 3.4. En ésta se aprecia que para cada combinación de valores de las variables de diseño ( $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}$ ) se observa un valor de la variable respuesta ( $Y_n$ ). Además, se asume que en el modelo de regresión lineal múltiple el error aleatorio ( $\varepsilon$ ) tiene  $E(\varepsilon) = 0, Var(\varepsilon) = \sigma^2$ , y que los errores no están correlacionados.

**Tabla 3.4** Estructura de los datos para la regresión lineal múltiple. Modificado de [76]

Observación $i$	Respuesta	Variables de Diseño			
	$Y$	$X_1$	$X_2$	...	$X_K$
<b>1</b>	$Y_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1k}$
<b>2</b>	$Y_2$		$X_{22}$	...	$X_{2k}$
<b>3</b>	$Y_3$	$X_{31}$	$X_{32}$	...	$X_{3k}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
<b><math>n</math></b>	$Y_n$	$X_{n1}$	$X_{n2}$	...	$X_{nk}$

Ilustrar el procedimiento de estimación por mínimos cuadrados se simplifica utilizando notación matricial. Además, se asume en el modelo de regresión lineal múltiple que el error aleatorio ( $\varepsilon$ ) tiene  $E(\varepsilon) = 0$ . En términos de los datos y la ecuación (3.2), el modelo puede expresarse de la siguiente manera:

$$Y = X\beta \tag{Ec. 3.3}$$

donde,

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \tag{Ec. 3.4}$$

Por lo tanto, es posible determinar los parámetros  $\beta$  de la regresión lineal múltiple a través del método de mínimos cuadrados, el cual tiene como propósito minimizar la suma de los cuadrados de los residuos. La función de mínimos cuadrados se define como:

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon^t \varepsilon = (y - X\beta)^t (y - X\beta) \quad \text{Ec. 3.5}$$

donde,

- $\Sigma$  representa la suma sobre todos los puntos de datos en el conjunto de entrenamiento.
- $y$  es el valor observado de la variable de respuesta correspondiente al punto de datos  $i$ .
- $\beta$  es el valor predicho de la variable de respuesta para el punto de datos  $i$ , calculado utilizando los coeficientes de regresión y los valores de diseño.

Por lo tanto,  $S(\beta)$  puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S(\beta) &= y^t y - \beta^t X^t y - y^t X \beta + \beta^t X^t X \beta \\ S(\beta) &= y^t y - 2\beta^t X^t y + \beta^t X^t X \beta \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.6}$$

La última igualdad se debe a que  $\beta^t X^t y$  es una matriz (1x1) o un escalar, y por lo tanto su transpuesta  $(\beta^t X^t y)^t = y^t X \beta$  es el mismo escalar. El procedimiento para encontrar los mínimos de la Ecuación 4.5 consiste en derivar  $S$  con respecto a  $\beta$  e igualar a cero, es decir:

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta} \right|_{\beta} = -2X^t y + 2X^t X \beta = 0 \quad \text{Ec. 3.7}$$

Por lo tanto:

$$X^t X \beta = X^t y \quad \text{Ec. 3.8}$$

Al despejar  $\beta$  de la Ecuación 4.7 se obtiene el estimador de mínimos cuadrados de  $\beta$ , por lo tanto, los parámetros  $\beta$  de la regresión lineal múltiple se determinan a través de la

siguiente ecuación:

$$\beta = (X^y X)^{-1} X^t y = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.9}$$

A continuación, se realiza un análisis de varianza para determinar la significancia del modelo propuesto. Además, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto que cada variable de diseño tiene sobre la variable de salida. Una forma de realizar este análisis de sensibilidad es mediante la normalización de cada coeficiente de regresión. Estos coeficientes normalizados se conocen como coeficientes estandarizados ( $\beta'$ ):

$$\beta'_k = \beta_k \frac{\sigma_{x_k}}{\sigma_y} \quad \text{Ec. 3.10}$$

donde:

- $\beta_k$  es el coeficiente de regresión del modelo a normalizar.
- $\sigma_{x_k}$  es la desviación estándar media del coeficiente de regresión a normalizar.
- $\sigma_y$  es la desviación estándar media del término constante dentro del modelo.

Un alto valor del coeficiente estandarizado indica un alto impacto de la variable de entrada en la explicación del fenómeno estudiado a través del modelo.

### 3.1.6.1 Variables de entrada y salida para el modelo de la absorción de energía específica

De acuerdo con el objetivo de la investigación, la variable de salida analizada es la capacidad de absorción de energía por unidad de masa en materiales compuestos laminados (SEA). Dado que la capacidad de absorción de energía es un factor crítico en el diseño de estructuras de materiales compuestos, es esencial comprender la orientación de las fibras ( $\theta$ ) y la secuencia de apilado ( $S_a$ ), (Tabla 3.5). Esta investigación se centrará específicamente en estas dos variables, con el objetivo de determinar la combinación óptima que maximice la capacidad de absorción de energía en la estructura compuesta.

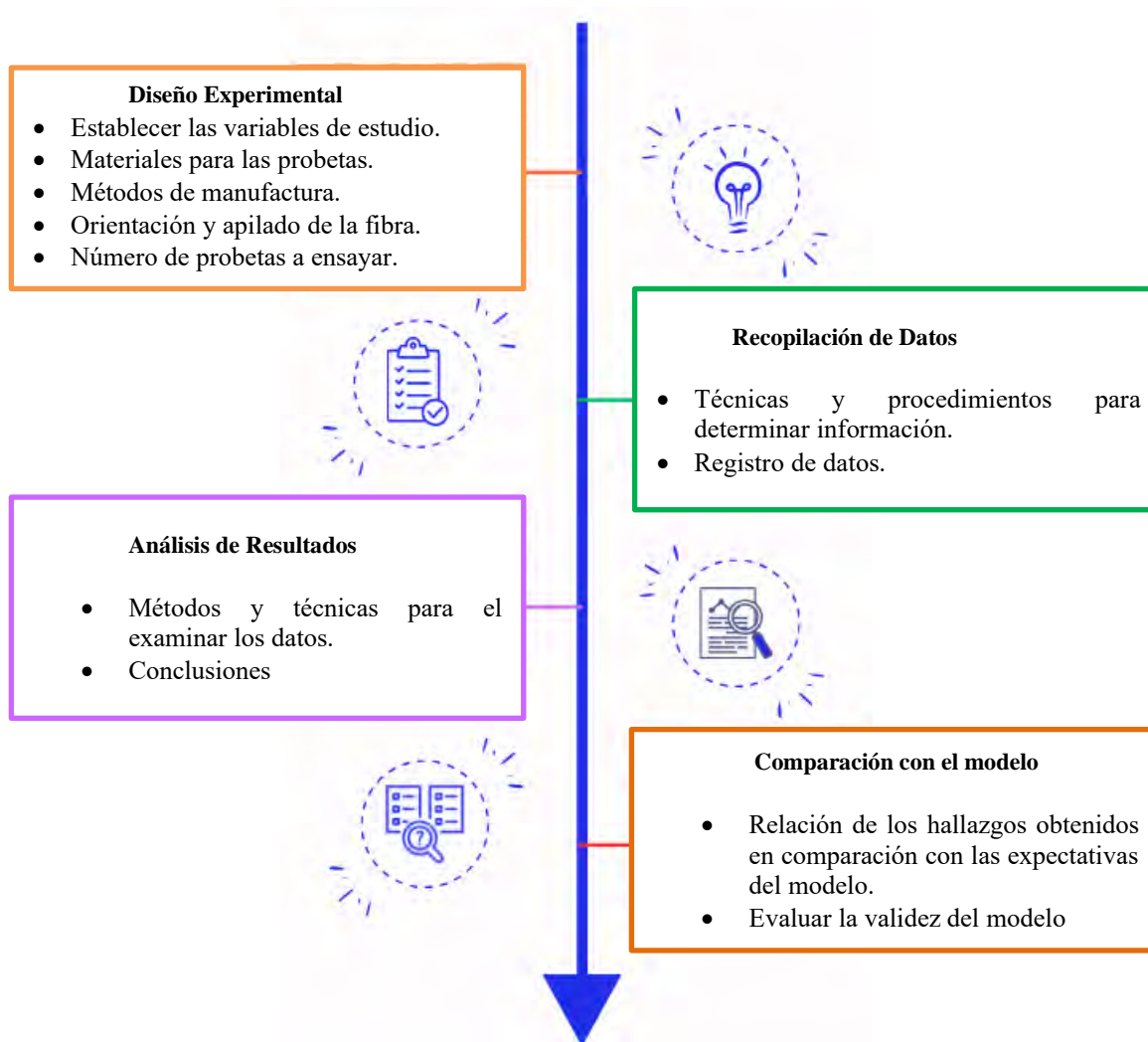
Se emplearán técnicas de modelado, así como pruebas experimentales, para evaluar y validar los resultados obtenidos.

**Tabla 3.5** Variables de entrada y salida para modelo de disipación de energía

<b>Variable</b>		<b>Descripción</b>
<b>Diseño</b>	$\theta$	Orientación de la fibra
	$S_a$	Secuencia de apilado
<b>Respuesta</b>	SEA	Absorción de energía específica

### **3.2 Ensayos experimentales en estructuras tubulares**

El proceso experimental de la investigación se basa en las siguientes fases: diseño experimental, recopilación de datos, análisis de resultados y comparación con el modelo propuesto, presentadas en la Figura 3.6.



**Figura 3.6** Proceso experimental para la elaboración y análisis de datos de los tubos de material compuesto reforzados con fibras

El proceso experimental de la investigación implica el diseño, la recopilación de datos, el análisis de resultados y la comparación con el modelo propuesto. Cada una de estas fases es crucial para obtener conclusiones sólidas y respaldar el avance del conocimiento en el área de estudio.

### 3.2.1 Diseño experimental

En esta sección se establecen las variables que conforman el procedimiento experimental. Este procedimiento implica la selección de parámetros para el estudio de la absorción de energía en relación a las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Además,

se consideran las características para elaboración de las probetas tubulares sus los métodos de fabricación, el número de ensayos y la metodología de ensayo.

### a) Propiedades de los materiales

Para este estudio, se seleccionaron materiales para fabricar componentes estructurales tubulares que operan bajo condiciones de cargas cuasi-estáticas. Los materiales elegidos para el desarrollo de la investigación son los siguientes:

- Fibra de vidrio prepreg CYCOM 919 (Figura 3.7)

Las características físicas de este material se muestran en la Tabla 3.6

**Tabla 3.6** Propiedades físicas de fibra de vidrio prepreg [77]

<b>Fibra de vidrio</b>			
<b>Forma</b>	Resina impregnada en fibra		
<b>Contenido de resina %</b>	40±2		ASTM D3529
<b>Propiedades mecánicas</b>	Condición de prueba		Método de prueba
<b>Resistencia a la tensión (MPa)</b>	75°F	339 MPa	ASTM D638
	160°F	278 MPa	
	200°F	249 MPa	
<b>Fuerza de compresión (MPa)</b>	75°F	330 MPa	ASTM D695
	160°F	229 MPa	
	200°F	189 MPa	



**Figura 3.7** Fibra de vidrio prepreg [77]

### b) Diseño geométrico y número de ensayos

Para determinar las dimensiones y el número de ensayos a compresión de estructuras tubulares en materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de vidrio, se deben seguir ciertas consideraciones. Aunque no existen normas específicas para este propósito, a continuación, se presentan algunas recomendaciones generales:

- Geometría de la muestra: La geometría de la muestra tubular debe seleccionarse para representar de manera precisa la estructura real que se está evaluando.
  - Longitud de la muestra: La longitud de la muestra debe ser lo suficientemente larga para evitar que el pandeo afecte los resultados del ensayo
- Número de muestras: Se debe realizar un número adecuado de ensayos para obtener resultados confiables y representativos.

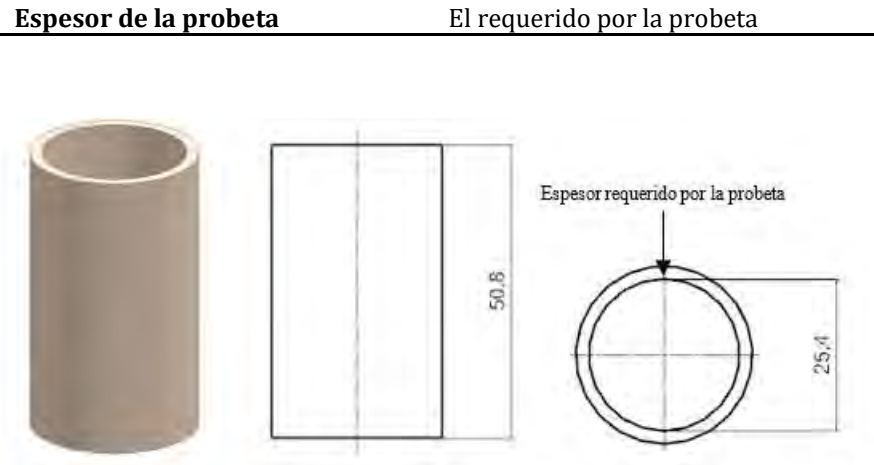
En este estudio, se tiene el objetivo de llevar a cabo pruebas mecánicas mediante la aplicación de cargas compresión cuasi-estáticas. Por consiguiente, es necesario realizar una investigación en la literatura con el propósito de identificar los métodos de ensayo disponibles.

La norma ASTM D6641, titulada *Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture* [78], es proporcionada por ASTM y puede emplearse para llevar a cabo pruebas a compresión en materiales compuestos al igual que la norma ASTM 695, titulada *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics* [79].

Por lo tanto, las dimensiones de las probetas están conformadas de acuerdo al análisis realizado en la literatura [4], [48], [75], [80] y a la norma ASTM A500 la cual nos indica que las probetas deben tener una relación de 2 a 1, es decir, que la longitud debe ser dos veces el diámetro, ya que no se encontraron normas en donde se estandarice dimensiones y geometría de estructuras tubulares en materiales compuestos. Para el caso de las pruebas a compresión, las dimensiones de las probetas serán: 25.4 mm de diámetro y 50.8 mm de largo por conveniencia. En la Tabla 3.7 se muestran los requisitos geométricos de la probeta de material compuesto para ensayos a compresión cuasi estática y en la Figura 3.8 se observan las dimensiones.

**Tabla 3.7** Requisitos geométricos para las probetas sometidas a ensayos por compresión

<b>Requisitos geométricos de la probeta</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Requisito</b>
<b>Forma</b>	Tubular cilíndrica
<b>Longitud</b>	50.8 mm
<b>Diámetro</b>	25.4 mm



**Figura 3.8** Dimensiones de probetas para ensayos a compresión

De acuerdo a la norma ASTM A370 que establece métodos estándar para ensayos mecánicos de materiales metálicos, incluyendo ensayos de tracción y compresión recomienda utilizar al menos tres muestras para obtener resultados representativos.

### c) Matriz experimental

De acuerdo con las secciones 3.1.3, 3.1.4 y 3.1.5, se ha determinado que las variables de diseño a analizar serán la orientación de la fibra ( $\theta$ ) y la secuencia de apilado ( $S_a$ ). Hasta ahora, la mayoría de las investigaciones sobre el apilado y la orientación de la fibra se han centrado en comprender las fibras orientadas a  $0^\circ$  con respecto a la carga aplicada. Sin embargo, en el caso de estructuras tubulares, esta teoría no ha sido investigada. Por lo tanto, en este estudio se pretende analizar la orientación de la fibra a  $0^\circ$  en diferentes posiciones. Para lograr esto, se requiere que el material compuesto sea multidireccional, es decir, que las capas estén orientadas en diferentes ángulos, con el fin de ser utilizado en estructuras o elementos mecánicos.

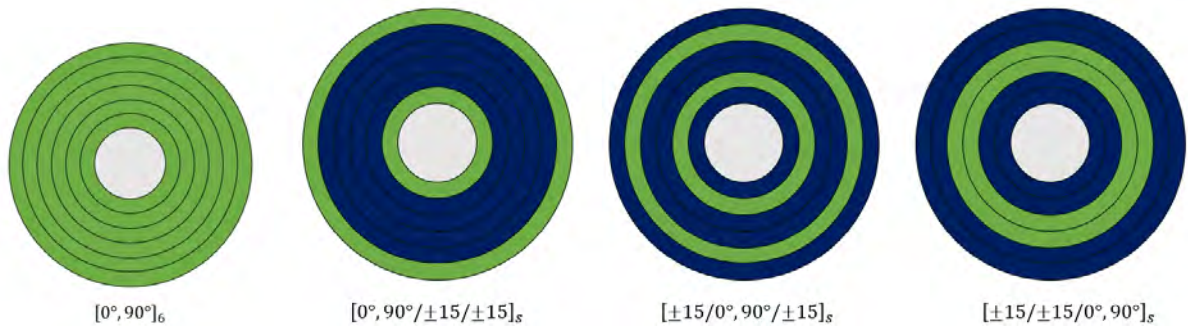
Por tales motivos, la elección de la secuencia de apilado y la orientación de las fibras en los laminados de estudio se realiza a través de las siguientes condiciones:

- a) Mínima cantidad de láminas para crear un laminado balanceado y simétrico.



- b) Láminas a  $[0^\circ, 90^\circ]$ , con el propósito de estudiar la interacción entre capas de fibras de diferentes ángulos con respecto a la lámina de referencia.
- c) Incrementos de  $\pm 15^\circ$  en las orientaciones de las fibras para cubrir un caso de diseño práctico.

En el presente trabajo, se tiene un gran interés en investigar la influencia de la interacción entre las láminas de fibras en diferentes ángulos, con el objetivo de estudiar la capacidad de disipación de energía. Este enfoque permitirá comprender cómo las diversas orientaciones de las fibras en las capas afectan la capacidad del material compuesto para absorber energía en respuesta a cargas aplicadas. Además, se presenta en la Figura 3.9 la representación de los valores de la secuencia de apilado ( $S_a$ ) para un laminado simétrico de seis láminas en cada estructura, los cuales se utilizarán en la elaboración de la matriz experimental de esta investigación, en donde el color azul representa la capa a  $[\pm 15]$  y el color verde la orientación a  $[0, 90]$ .



**Figura 3.9** Representación de los valores de  $S_a$  para un laminado simétrico de seis láminas (Vista superior)

En esta investigación se tomaron en cuenta cuatro tipos de orientación de fibra:  $[0, 90]$ ,  $[\pm 15]$ ,  $[\pm 30]$  y  $[\pm 60]$ . Cada orientación constará de un apilado de seis capas. Se considerarán diferentes orientaciones simétricas de la fibra, la matriz experimental se muestra en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8** Diseño experimental para evaluar la capacidad de absorción de energía de materiales compuestos de resina epoxi con reforzados de fibras de vidrio

Diseño experimental							
Orientación de la fibra ( $\theta$ )	Secuencia de apilado ( $S_a$ )						Nomenclatura
$0,90^\circ$	$0^\circ,90^\circ$						$[0,90]_6$
	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$0^\circ,90^\circ$	$[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$
$\pm 15^\circ$	$\pm 15$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 15$	$\pm 15$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 15$	$[\pm 15/0,90/\pm 15]_s$
	$\pm 15$	$\pm 15$	$0^\circ,90^\circ$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 15$	$\pm 15$	$[\pm 15/\pm 15/0,90]_s$
	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 30$	$\pm 30$	$\pm 30$	$\pm 30$	$0^\circ,90^\circ$	$[0,90/\pm 30/\pm 30]_s$
$\pm 30^\circ$	$\pm 30$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 30$	$\pm 30$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 30$	$[\pm 30/0,90/\pm 30]_s$
	$\pm 30$	$\pm 30$	$0^\circ,90^\circ$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 30$	$\pm 30$	$[\pm 30/\pm 30/0,90]_s$
	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 45$	$\pm 45$	$\pm 45$	$\pm 45$	$0^\circ,90^\circ$	$[0,90/\pm 45/\pm 45]_s$
$\pm 45^\circ$	$\pm 45$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 45$	$\pm 45$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 45$	$[\pm 45/0,90/\pm 45]_s$
	$\pm 45$	$\pm 45$	$0^\circ,90^\circ$	$0^\circ,90^\circ$	$\pm 45$	$\pm 45$	$[\pm 45/\pm 45/0,90]_s$

De acuerdo con Alcudia Zacarias [81], la secuencia de apilado es una variable cualitativa que requiere ser convertida en una variable cuantitativa, dentro del modelo de regresión múltiple, para ser utilizada como una variable de diseño. Por lo tanto, en el presente trabajo se propone un sistema de clasificación de los laminados en función de la secuencia de apilado. La secuencia de apilado ( $S_a$ ) se puede cuantificar a través de los siguientes criterios:

- a) Posición de la capa a  $0^\circ$ : ya que es la lámina de mayor resistencia dentro de un laminado.
- b) Número de capas a  $0^\circ$ : a través de una normalización se asigna el valor de cero cuando el laminado no presenta capas a  $0^\circ$  y el valor de uno cuando el laminado se encuentra conformado totalmente de capas a  $0^\circ$ .
- c) Laminado simétrico y balanceado: esta configuración permite que los materiales y orientaciones de las capas sean las mismas en ambos lados respecto al plano medio de simetría.

Por lo tanto, estos criterios permiten obtener el valor cuantitativo de  $S_a$  a través de la siguiente expresión:

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^m |\theta z_i c_i|}{\sum_{i=1}^m |c_i|}, \quad c_i = \left( \frac{i-1}{m-a} - \frac{1}{2} \right) \quad \text{Ec. 3.11}$$

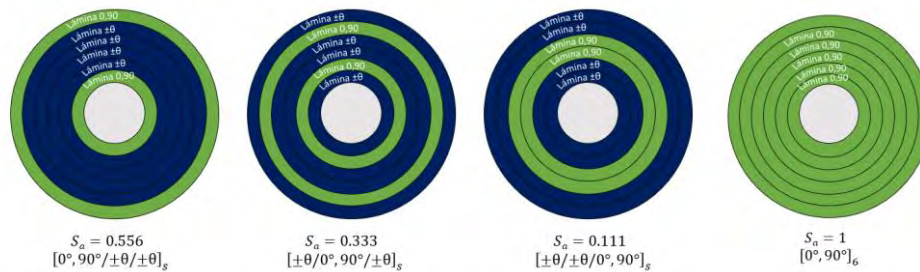
donde:

- $m$  es el número total de capas en un laminado simétrico y balanceado.
- $\alpha = 1$  para un laminado con número par de capas y  $\alpha = 2$  para un laminado con número impar de capas.
- $c_i$  es un clasificador que permite asignar valores a cada capa  $i$  en función de su posición con respecto al plano de simetría del laminado.
- $\theta_{zi}$  permite asignar un valor cuantitativo de uno o cero en cada capa  $i$  en función de la presencia de la orientación a  $0^\circ$ , es decir,  $\theta_{zi} = 0$  cuando la capa  $i$  no contiene una orientación a  $0^\circ$  y  $\theta_{zi} = 1$  cuando la capa  $i$  contiene una orientación a  $0^\circ$ .

En la Tabla 3.9 y en la Figura 3.10 se presentan los valores de  $S_\alpha$  para un laminado simétrico de seis láminas. Se puede observar que al mover la posición de las capas 0,90 dentro del laminado los valores de  $S_\alpha$  se encuentran dentro de un intervalo de cero a uno, ya que se tiene como referencia las condiciones máximas y mínimas de cantidad de capas a 0,90, es decir,  $S_\alpha = 1$  cuando todas las capas dentro del laminado tienen una orientación de 0,90 y  $S_\alpha = 0$  cuando ninguna capa dentro del laminado tiene una orientación de  $0^\circ, 90^\circ$ .

**Tabla 3.9** Valores de  $S_\alpha$  para un tubo laminado simétrico de seis láminas

Laminado	$S_\alpha$
$[0,90]_6$	1
$[0,90 / \pm\theta / \pm\theta]_s$	0.556
$[\pm\theta / 0,90 / \pm\theta]_s$	0.333
$[\pm\theta / \pm\theta / 0,90]_s$	0.111
$\pm\theta = \text{Lámina diferente de } 0^\circ, 90^\circ$	



**Figura 3.10** Representación de los valores de  $S_\alpha$  para un tubo laminado balanceado y simétrico de seis láminas







### 3.2.2 Preparación de los tubos

La manufactura de las probetas se realizó por medio de preimpregnado, para ello se utilizaron los materiales mostrados en la Tabla 3.10.

#### a) Materiales

Para la elaboración de los tubos se utilizaron los siguientes materiales.

**Tabla 3.10** Materiales y moldes para la manufactura de las probetas

Material	Ilustración
Fibra de vidrio prepreg	
Tubos de aluminio (moldes)	
Cera TR-104	
Líquido desmoldante de resina 700-NC	
Cinta de poliéster termo contraíble	
Lijas	

#### b) Manufactura

En la preparación de las probetas en la fase experimental se llevó a cabo con fibra preimpregnada, el proceso de preimpregnado, en la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras, implica la impregnación previa de las fibras de refuerzo, como fibras de vidrio o carbono, con una resina específica que se selecciona en función de las propiedades requeridas para el estudio. Este proceso garantiza que las fibras estén

completamente saturadas con la resina, lo que mejora la adhesión entre las fibras y la matriz de resina, y asegura la uniformidad de las propiedades en el material compuesto resultante. Además, el exceso de resina se elimina cuidadosamente para evitar una saturación excesiva y se logra la relación adecuada entre las fibras y la matriz [82], [83].

A continuación, se detalla el procedimiento empleado para la fabricación de las probetas, se describen y se pueden visualizar en el esquema de la Figura 3.11:

- **Preparación de los moldes:**

Para la fabricación de los tubos de material compuesto, se emplean tubos como moldes. Estos tubos pasan por un proceso de preparación que incluye el lijado y la limpieza para eliminar impurezas y garantizar una superficie adecuada. Posteriormente, se aplican capas de cera y se pulen entre cada encerado para facilitar la liberación del componente final.

- **Enrollamiento de la fibra:**

Cada una de las láminas de fibra preimpregnada se enrolla sobre el molde, asegurando que adquiera la forma deseada. Este proceso se realiza para lograr la disposición correcta de las fibras y garantizar la integridad estructural del tubo compuesto.

- **Secuencia de apilado:**

Durante esta fase, se disponen todas las láminas de fibra preimpregnada siguiendo una secuencia específica de apilado. Esto implica respetar tanto la orientación de las fibras como la secuencia determinada previamente en la matriz experimental.

- **Curado de la fibra:**

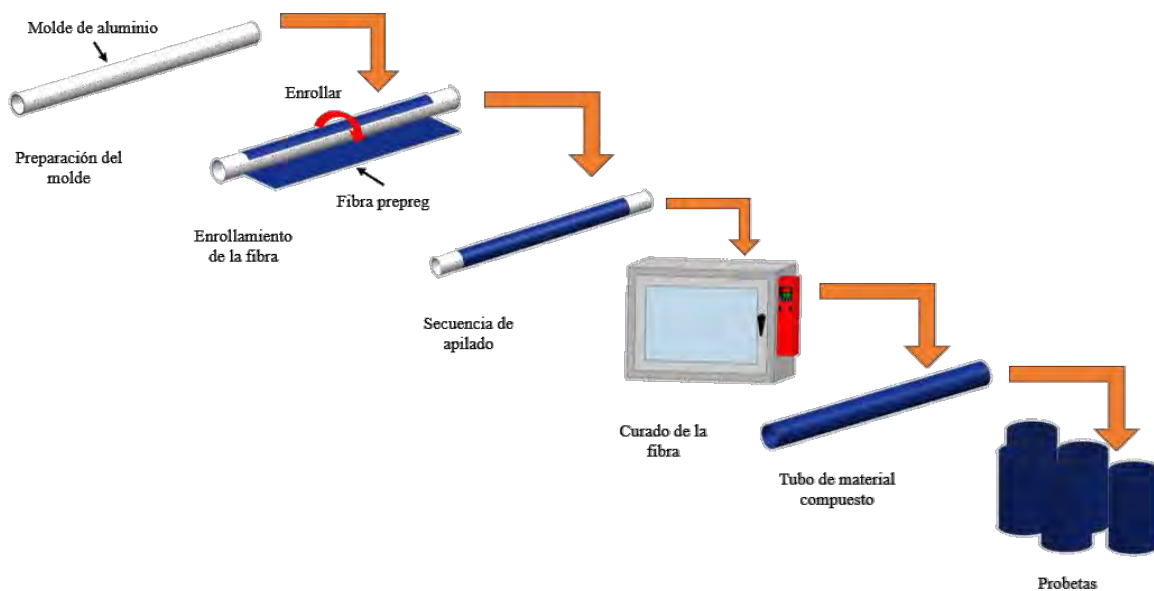
Una vez que se ha logrado la secuencia de apilado deseada, el tubo se coloca en un horno a una temperatura de 140°, por 60 minutos. La finalidad de este paso es llevar a cabo el proceso de curado de la resina, que implica el endurecimiento de la matriz de resina a través del control de temperatura y tiempo, lo que otorga al material compuesto su resistencia y rigidez.

- **Tubo de material compuesto:**

El tubo se retira del horno y se permite enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente, el molde se retira, dejando como resultado un tubo de material compuesto reforzado con de fibra (FRP).

- **Probetas:**

Finalmente, el tubo de material compuesto se corta según las dimensiones propuestas para obtener las probetas necesarias para realizar ensayos y pruebas requeridas, lo que permite evaluar las propiedades mecánicas y el rendimiento del material compuesto.



**Figura 3.11** Proceso de manufactura "Preimpregnado"

Esta secuencia de pasos es esencial en la fabricación de componentes compuestos, la fabricación de las probetas para esta investigación se visualiza y describe en el Anexo D.

### 3.2.3 Preparación de ensayos y equipo

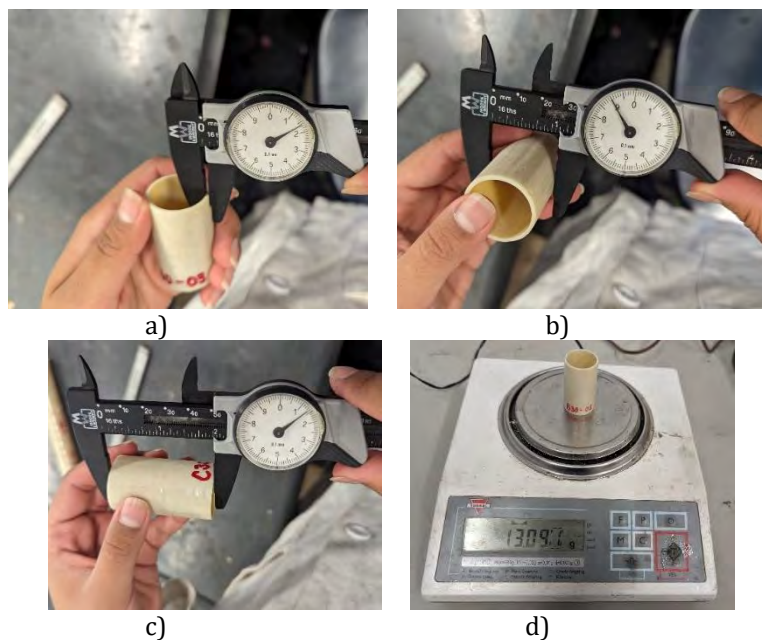
Las pruebas de compresión se realizaron en la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-IC 100 kN (Figura 3.12).



**Figura 3.12** Máquina Shimadzu AG-IC 100kN

**a) Preparación de las probetas**

Antes de llevar a cabo los ensayos de compresión, se realiza una preparación de las probetas, esto implica la medición de varias características, incluyendo: espesor, diámetro exterior, la longitud y el peso de cada probeta (Ver Figura 3.13), los datos recopilados se muestran en la Tabla 3.11.



**Figura 3.13** Medición de las probetas: a) Espesor, b) Diámetro, c) Longitud, d) Masa

**Tabla 3.11** Parámetros geométricos de los tubos de material compuesto

Configuración	Probeta	Diámetro exterior (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Masa (g)	
[0, 90] <sub>6</sub>	A	A0-01	28.74	50.03	1.54	11.45
		A0-02	28.96	49.35	1.60	12.05
		A0-03	28.78	50.88	1.57	12.04
		A0-04	29.16	50	1.59	12.52
		A0-05	28.67	51.12	1.61	12.46
[0, 90/±15/±15] <sub>s</sub>	A	A15-01	28.9	51.02	1.74	12.66
		A15-02	29.2	50.79	1.66	12.41
		A15-03	28.92	51.34	1.70	13.00
		A15-04	29.29	50.21	1.89	13.24
		A15-05	28.88	51.75	1.75	13.11
[±15/0, 90/±15] <sub>s</sub>	B	B15-01	28.86	51.21	1.80	12.72
		B15-02	29.41	51.21	1.86	13.65
		B15-03	29.05	51.07	1.93	13.05
		B15-04	28.84	49.21	1.50	11.99
		B15-05	29.31	51.16	1.82	13.26
[±15/±15/0, 90] <sub>s</sub>	C	C15-01	28.75	50.44	1.77	12.08
		C15-02	29.28	50.27	1.86	13.32
		C15-03	29.7	50.69	1.86	13.38
		C15-04	28.67	50.91	1.65	12.74
		C15-05	29.14	51.25	1.66	12.74
[0, 90/±30/±30] <sub>s</sub>	A	A30-01	28.53	50.65	1.57	11.87
		A30-02	28.91	50.7	1.51	12.60
		A30-03	28.75	51.41	1.75	12.84
		A30-04	29.19	51.1	1.81	13.25
		A30-05	28.61	51.96	1.67	12.00
[±30/0, 90/±30] <sub>s</sub>	B	B30-01	28.78	50.99	1.75	12.73
		B30-02	29.96	50.9	1.68	13.09
		B30-03	29.48	51.52	1.58	11.92
		B30-04	28.63	50.82	1.61	12.32
		B30-05	28.63	53.87	1.62	12.92
[±30/±30/0, 90] <sub>s</sub>	C	C30-01	28.5	49.81	1.59	12.15
		C30-02	28.81	51.41	1.64	12.89
		C30-03	28.98	50.77	1.79	13.36
		C30-04	28.88	51.06	1.61	12.39
		C30-05	28.05	50	1.58	11.81
[0, 90/±45/±45] <sub>s</sub>	A	A45-01	28.76	50.65	1.61	11.63
		A45-02	28.49	50.12	1.65	11.37
		A45-03	28.86	50.29	1.71	12.56
		A45-04	29.05	50.87	1.67	12.46



		A45-05	28.96	48.52	1.62	11.4
		B45-01	28.5	50.43	1.47	11.86
		B45-02	28.61	48.37	1.46	11.43
$[\pm 45/0, 90/\pm 45]_s$	B	B45-03	29.14	50.77	1.53	12.12
		B45-04	28.71	50.17	1.46	11.39
		B45-05	29.05	51.2	1.66	12.51
		C45-01	28.78	50.32	1.69	12.2
		C45-02	28.7	50.73	1.63	12.08
$[\pm 45/\pm 45/0, 90]_s$	C	C45-03	29.4	47.97	1.72	10.76
		C45-04	28.42	49.68	1.58	10.78
		C45-05	28.74	49.85	1.60	12.37

### b) Pruebas de compresión

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo utilizando una máquina SHIMADZU AG-IC 100kN, se utilizó para pruebas cuasi-estáticas de compresión, estos ensayos conllevan un procedimiento utilizado para evaluar la resistencia del material a la compresión, es decir, su capacidad para soportar cargas que tienden a reducir su longitud.

- **Montaje de la muestra:**

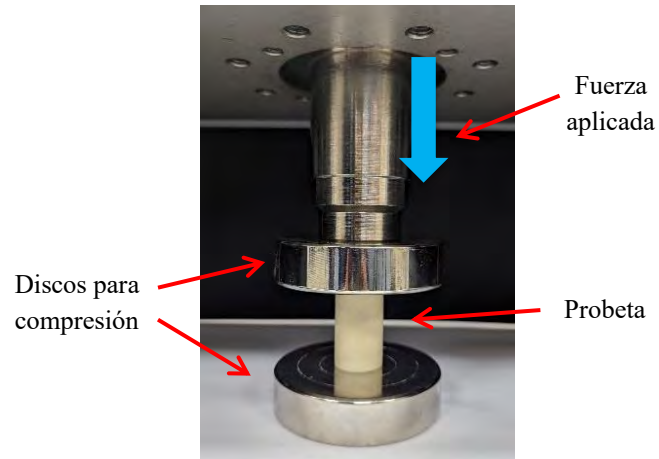
La muestra se coloca entre los discos superior e inferior de la máquina para la prueba de compresión (Figura 3.14). Es importante asegurarse de que la muestra esté centrada y alineada correctamente.

- **Aplicación de la carga:**

La máquina de prueba aplica una carga axial de manera gradual y constante a la muestra. La velocidad de carga a la que se sometieron las probetas fue de 10 mm/min, y se aplicó un 85% de aplastamiento total de la longitud de cada probeta.

- **Registro de datos:**

Durante la prueba, se registran los datos de carga aplicada y la deformación de la muestra. La muestra alcanza la carga máxima, luego comienza la falla progresiva y se detiene la prueba al alcanzar 85% desplazamiento final.



**Figura 3.14** Configuración de la máquina-accesorios para realizar los ensayos de compresión en la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-IC 100 kN

## Análisis y Discusión de Resultados

### 4.1 Obtención de probetas y ensayos de compresión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la manufactura de las probetas y de los ensayos realizados en la parte experimental de la investigación.

#### 4.1.1 Obtención de la manufactura de las probetas

Se obtuvieron un total de 50 probetas, cada una con las configuraciones correspondientes en la matriz experimental, utilizando ángulos de  $[0/90]$ ,  $[\pm 15]$ ,  $[\pm 30]$  y  $[\pm 45]$ , mediante el método de preimpregnado descrito en la sección 4.2.2.2 y Apéndice D, estas muestras se pueden observar por lotes de la Figura 4.1 hasta la Figura 4.4.

#### a) Lote 1: Ángulos de $[0/90]$

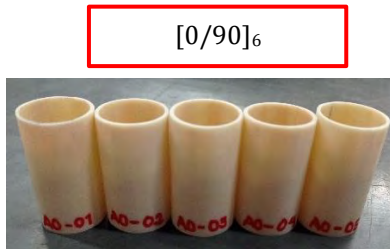


Figura 4.1 Lote 1: Probetas con ángulos de  $[0^\circ/90^\circ]$ .

#### b) Lote 2: Ángulos de $[0/90]$ y $[\pm 15]$

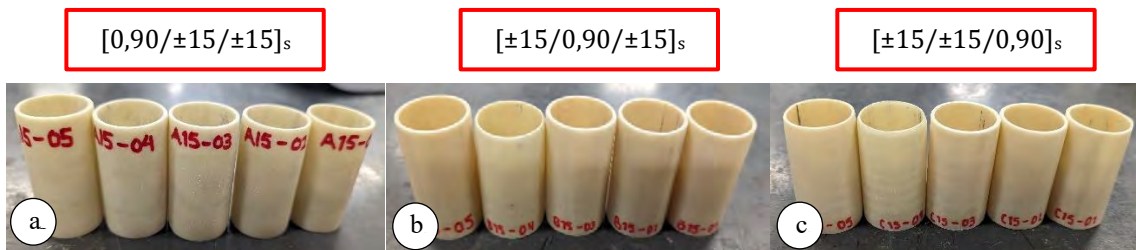
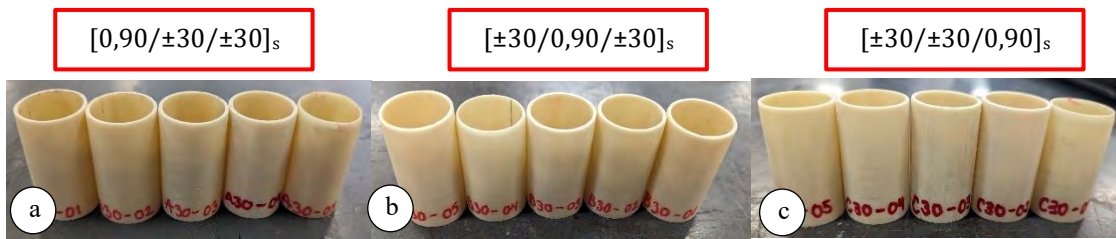


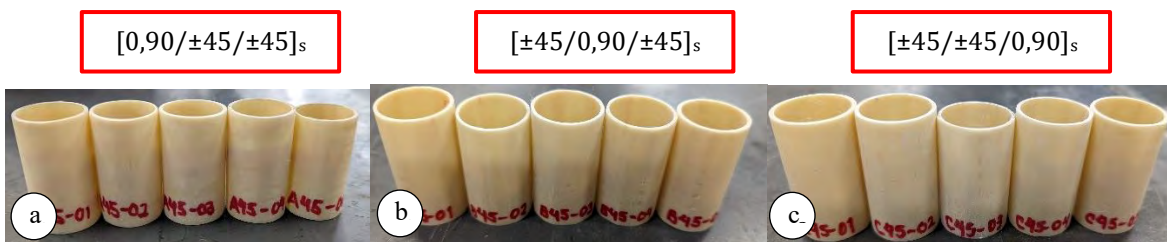
Figura 4.2 Lote 2: Probetas con ángulos de  $[0/90]$  y  $[\pm 15]$  en sus tres configuraciones.

**c) Lote 3: Ángulos de [0/90] y [±30]**



**Figura 4.3** Lote 3: Probetas con ángulos de [0/90] y [±30] en sus tres configuraciones

**d) Lote 4: Ángulos de [0/90] y [±45]**



**Figura 4.4** Lote 4: Probetas con ángulos de [0/90] y [±45] en sus tres configuraciones

**4.1.2 Preparación de ensayos de compresión**

Se realizaron las pruebas de compresión a las 50 probetas, y se obtuvieron resultados diversos de acuerdo a las diferentes configuraciones propuestas en la matriz experimental, de la Figura 4.5 a la 4.9 se puede apreciar el estado de las probetas de la configuración A15 ([0/±15/±15]<sub>s</sub>) después de completar los ensayos.

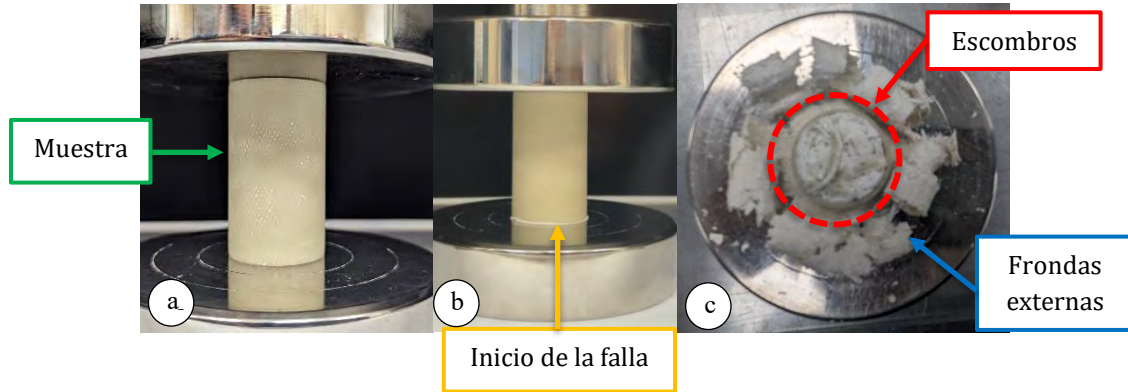
**Lote 2: Caso A15 secuencia de laminado [0/±15/±15]<sub>s</sub>**

**a) Probeta 1: A15-01**

En la

Figura 4.5 a se muestra la probeta A15-01, se puede apreciar que el fallo ocurrió en la parte inferior de la probeta, como se muestra detalladamente en la Figura 4.5 b. Los escombros resultantes de esta fractura quedaron confinados en el interior del tubo de material compuesto. Además, es evidente que la deformación se manifestó en la parte exterior del tubo, generando una peculiar forma de frondas alrededor de la probeta, tal como se ilustra en la

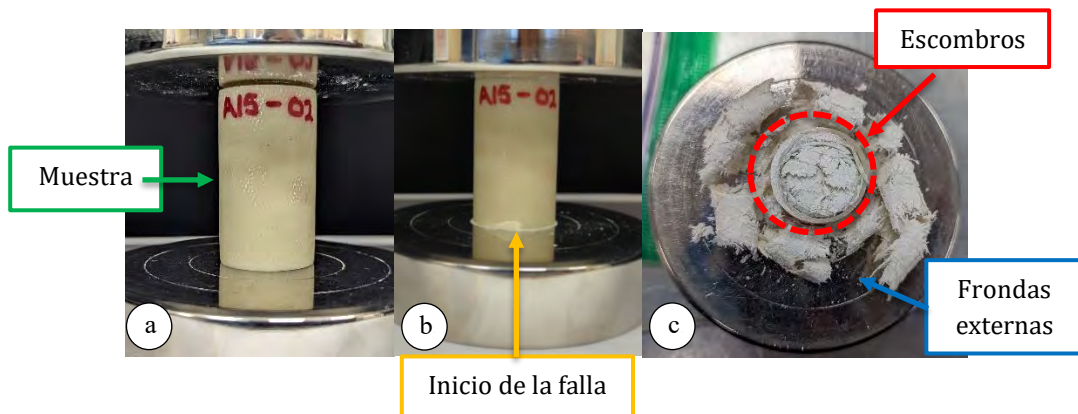
Figura 4.5c.



**Figura 4.5** Deformación de la probeta A15-01: a) Probeta A15-01, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.

**b) Probeta 2: A15-02**

La Figura 4.6a muestra la probeta A15-02, y es evidente que el fallo ocurrió en la parte inferior de la misma, como se detalla en la Figura 4.6b. En esta última figura, se puede observar una pequeña fractura que se formó como resultado del fallo. Los fragmentos resultantes del fallo quedaron confinados en el interior del tubo de material compuesto. Además, es notable que la deformación se manifestó en la parte exterior del tubo, similar a lo observado en la probeta A15-01, generando una característica forma de frondas alrededor de la probeta, como se ilustra en la Figura 4.6c.

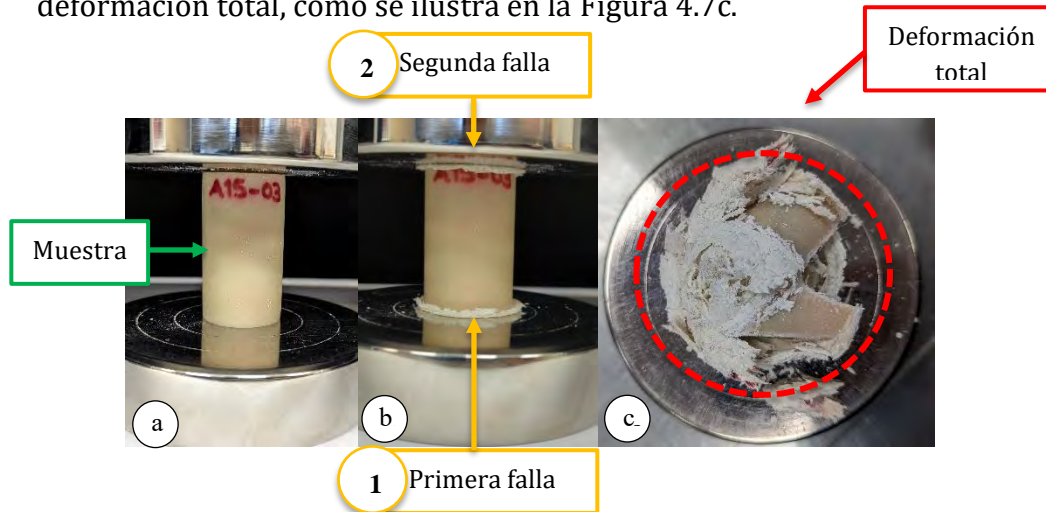


**Figura 4.6** Deformación de la probeta A15-02: a) Probeta A15-02, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.

**c) Probeta 3: A15-03**

En la Figura 4.7a se presenta la probeta A15-03, y se observa claramente que el primer fallo tuvo lugar en la parte inferior de la misma. Este evento se observa detalladamente en la Figura 4.7b1, donde se muestra la zona de fractura en la parte inferior. Sin embargo, es importante notar que posteriormente (7 segundos después) se produjo un segundo fallo en la parte superior de la probeta, lo cual resultó en una deformación total de la muestra. Este segundo fallo se muestra en la Figura 4.7b2.

Es importante destacar que, como consecuencia de esta fractura, se generaron escombros que quedaron tanto en el interior como en el exterior del tubo de material compuesto, lo cual proporciona información sobre la naturaleza de la fractura y sus implicaciones. Además, es evidente que la deformación afectó ambas partes del tubo, generando una forma peculiar en la probeta con deformación total, como se ilustra en la Figura 4.7c.

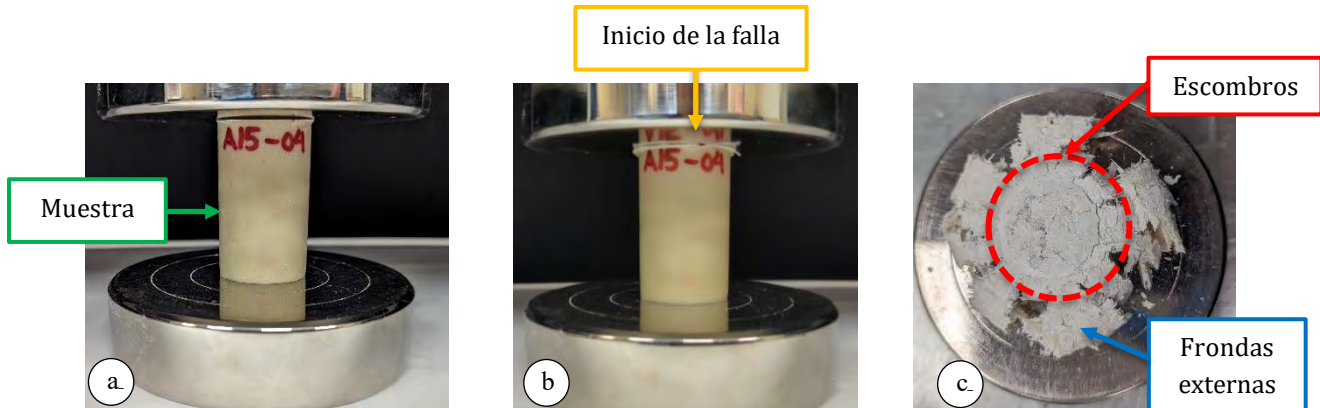


**Figura 4.7** Deformación de la probeta A15-03: a) Probeta A15-03, b) Momentos de la falla, c) Deformación total.

**d) Probeta 4: A15-04**

En la Figura 4.8a, se presenta la probeta A15-04, se observa que la falla tuvo lugar en la región superior de la probeta, en contraste con lo que ocurrió en las probetas A15-01 y A15-02, como se ilustra en la Figura 4.8b. Como resultado de

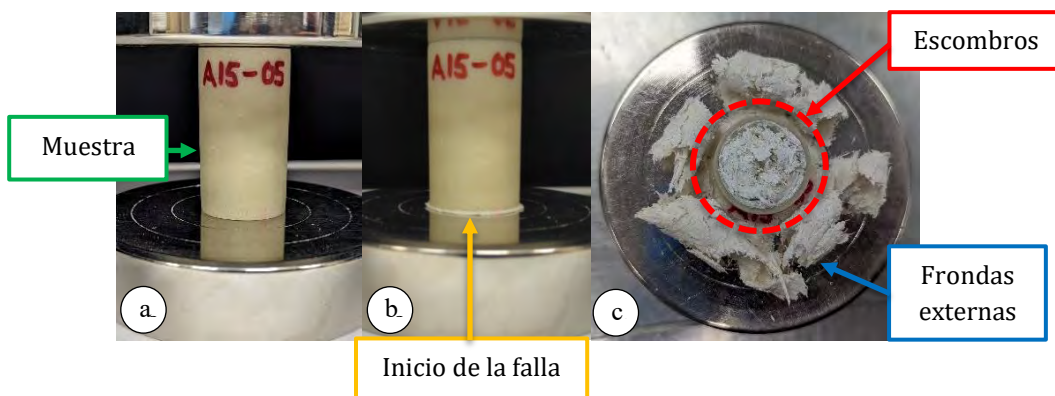
esta deformación, se produjeron escombros que quedaron en el interior del tubo de material compuesto. Además, se observa claramente que la deformación se manifestó en la superficie externa del tubo, generando una apariencia similar a frondas alrededor de la probeta, de manera análoga a las observadas en los casos anteriores (Figura 4.8c).



**Figura 4.8** Deformación de la probeta A15-04: a) Probeta A15-04, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.

**e) Probeta 5: A15-05**

En la Figura 4.9a se presenta la probeta A15-05, donde se puede apreciar que la iniciación de la falla se produjo en la parte inferior de la probeta, al igual que en las dos primeras probetas (ver Figura 4.9b). Tras la deformación, los desechos o escombros se acumularon en el interior del resto del tubo de material compuesto, generando una deformación en forma de frondas en el exterior, tal como se muestra en la Figura 4.9c.

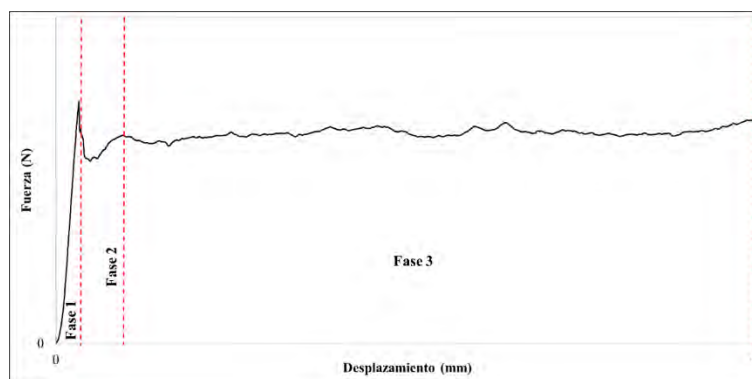


**Figura 4.9** Deformación de la probeta A15-05: a) Probeta A15-05, b) Inicio de la falla, c) Deformación final.

## 4.2 Modos de falla en estructuras tubulares de materiales compuestos

En la Figura 4.10 se observa la curva Fuerza-Desplazamiento típica de un tubo reforzado con fibra de vidrio, manufacturada por medio de preimpregnado. Para el análisis de la capacidad de disipación de energía específica (SEA) se tomaron en cuenta las dos primeras fases mostradas en la Figura 4.10:

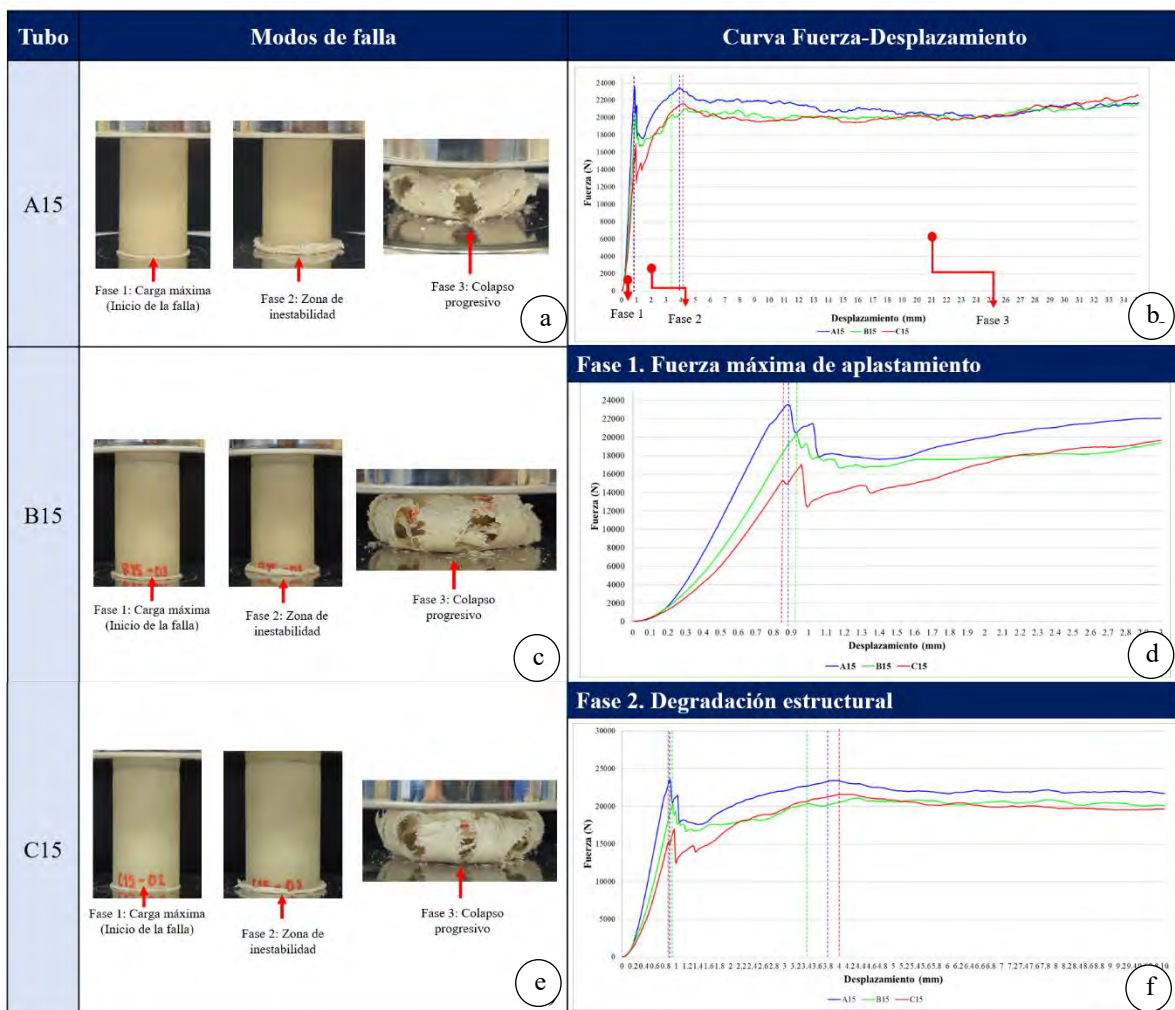
- **Fase 1 Carga máxima de aplastamiento:** Comienza la fractura de las láminas para determinar el modo de aplastamiento resultante, confirmando además que la región inicial de aplastamiento experimenta deformación plástica.
- **Fase 2 Región de inestabilidad:** Después de alcanzar la carga máxima de aplastamiento, el tubo de material compuesto generalmente experimenta deformaciones permanentes y posiblemente algunas grietas o fracturas locales. Sin embargo, aún no ha llegado al modo de colapso progresivo, lo que indica que la estructura se encuentra en un punto inestable. Durante esta etapa, el tubo puede mostrar signos visibles de daño, y su capacidad para soportar cargas adicionales puede verse comprometida.
- **Fase 3 Colapso progresivo:** Durante esta fase, el modo de fallo progresivo se caracteriza por el aplastamiento progresivo de los extremos, con desprendimiento del tubo laminado desde un extremo de la probeta. Esto provoca que el tubo forme frondas continuas que se extienden hacia el exterior y hacia el interior.



**Figura 4.10** Curva típica Fuerza-Desplazamiento de un tubo de material compuesto

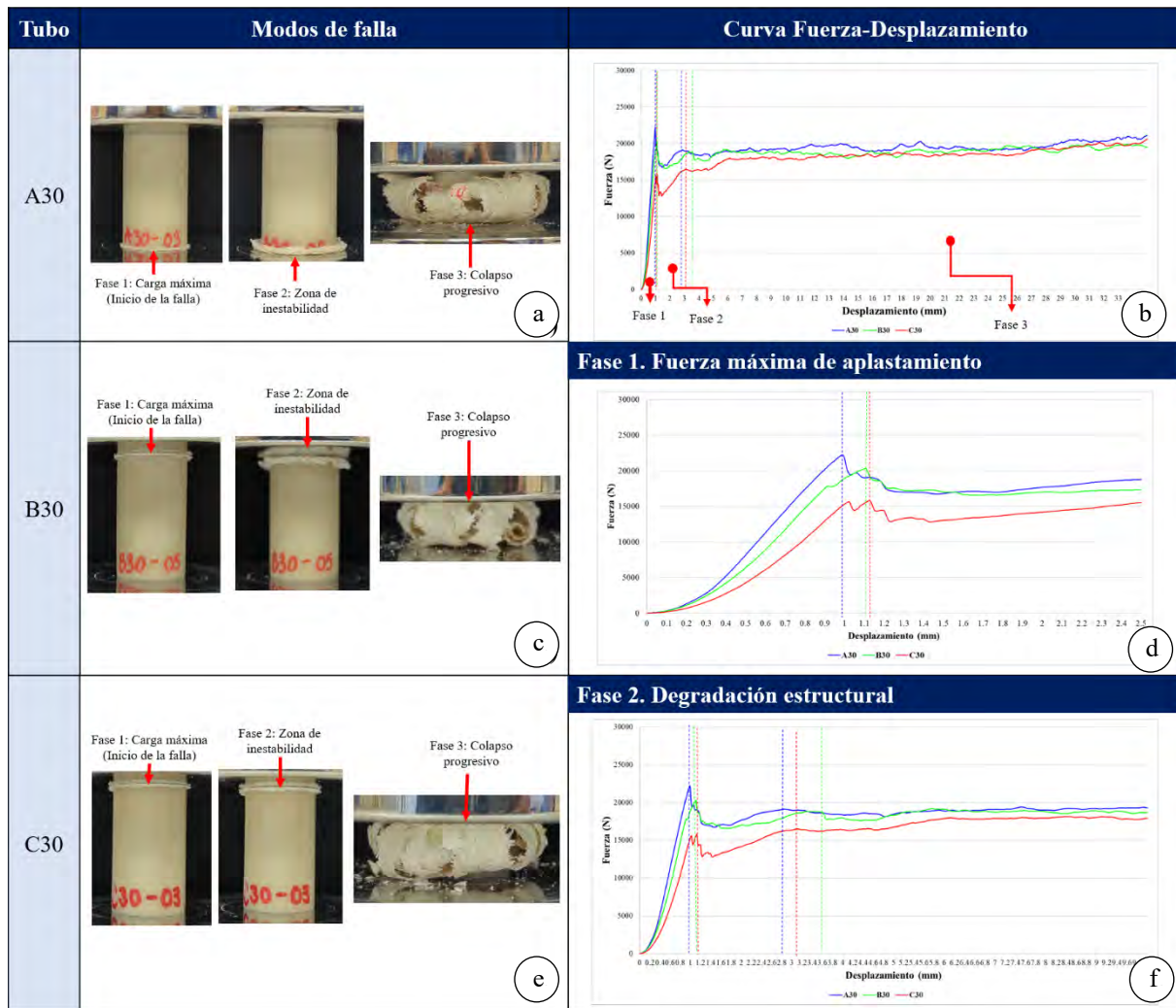


Se consideraron las fases 1 (carga máxima de aplastamiento) y 2 (región de inestabilidad) de las curvas Fuerza-Desplazamiento, obtenidas de los ensayos experimentales de compresión de estructuras tubulares de material compuesto, para llevar a cabo el análisis de la influencia de las variables de estudio sobre su capacidad de absorción de energía. La fase 3 (colapso progresivo) se descartó en este estudio debido a que la capacidad de absorción específica de energía en esta etapa es una función directa de longitud del tubo [22], [41], [53], [80], [84], [85], [86], por lo que la influencia de las variables de estudio es despreciable.



**Figura 4.11** Modos de falla con fibras de  $\pm 15^\circ$  a) A15  $[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$ , c) B15  $[\pm 15/0,90/\pm 15]_s$  y e) C15  $[\pm 15/\pm 15/0,90]_s$  b, d, f) Curvas Fuerza-Desplazamiento; de los incisos a,c,e.

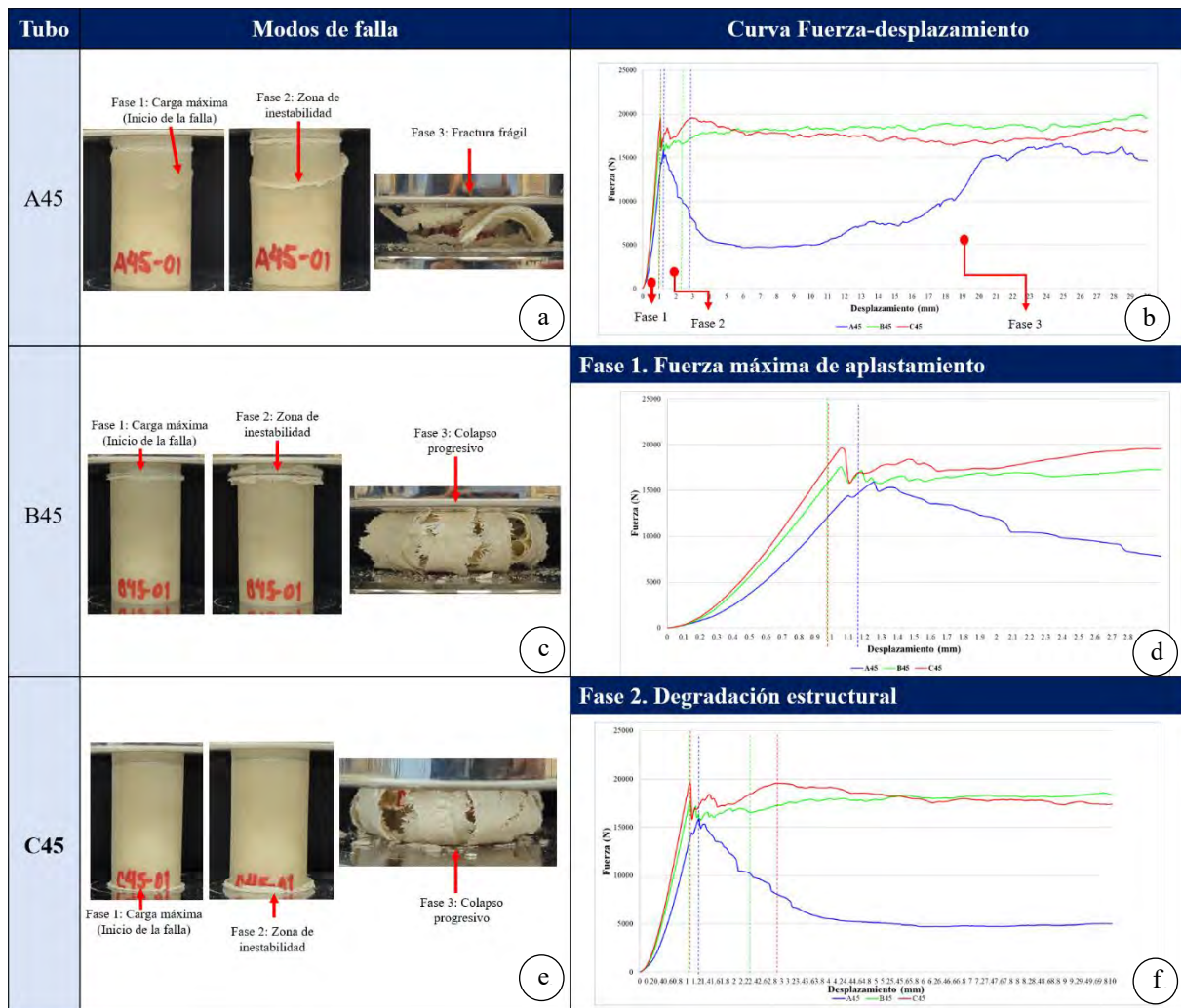
Se puede observar en la Figura 4.11 (a, c y e) que en la fase 1, se produce la fractura de las láminas y se inicia el modo de aplastamiento resultante. Posteriormente, en la fase 2, se observa una degradación estructural del tubo después de alcanzar la carga máxima de aplastamiento, aunque la estructura aún no ha alcanzado el modo de colapso progresivo, muestra signos de deterioro y da inicio al colapso progresivo.



**Figura 4.12** Modos de falla con fibras de  $\pm 30^\circ$  a) A30  $[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$ , c) B30  $[\pm 15/0,90/\pm 15]_s$  y e) C30  $[\pm 15/\pm 15/0,90]_s$  b, d, f) Curvas Fuerza-Desplazamiento; de los incisos a,c,e.

En la Figura 4.11 (a, c y e), Figura 4.12 (a, c y e), y Figura 4.13 (a, c y e), se observa los modos de falla de las muestras utilizadas para esta investigación, de cómo inicia la falla, posteriormente como comienza el despliegue de las fibras y por último el cómo se

forman las frondas hacia el exterior del tubo. En la Figura 4.11 (b, d y f), Figura 4.12 (b, d y f), y Figura 4.13 (b, d y f) se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento de los resultados obtenidos de cada ensayo a cargas por compresión, al igual que se encuentran las dos primeras fases para el análisis de la absorción de energía específica conforme a las variables de diseño: secuencia de apilado y orientación de la fibra.



**Figura 4.13** Modos de falla con fibras de  $\pm 15^\circ$  a) A45  $[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$ , c) B45  $[\pm 15/0,90/\pm 15]_s$  y e) C45  $[\pm 15/\pm 15/0,90]_s$  b, d, f) Curvas Fuerza-Desplazamiento; de los incisos a,c,e.

#### 4.2.1 Fase I. Fuerza máxima de aplastamiento (Peak crush load)

En los trabajos de Cui *et al.* [87] y Palanivelu *et al.* [38] se define la Fase I como el punto en el que se alcanza la carga máxima de aplastamiento. En esta etapa inicial, las

estructuras llegan a su máxima carga y comienza la propagación de grietas. Investigaciones realizadas por Mamalis *et al.* [43] han determinado, mediante análisis experimental, que las estructuras de materiales compuestos muestran inicialmente un comportamiento elástico. En este sentido, la carga aumenta de manera constante hasta alcanzar un valor máximo conocido como PCF (Fuerza Máxima de Aplastamiento, por sus siglas en inglés), que depende tanto de la geometría de la estructura como de las características del material. Durante esta etapa, se inicia una grieta de cierta longitud en el extremo de la estructura adyacente a la zona de carga. Por otro lado, según los hallazgos de Farley *et al.* [88] el inicio de la falla se caracteriza por un fallo local del material, lo que provoca la formación de pequeñas fisuras inter/intralaminares. La fractura de las láminas determina el modo de aplastamiento resultante, confirmando además que la región inicial de aplastamiento experimenta deformación plástica. Estos estudios proporcionan una comprensión más profunda de los mecanismos que operan durante la carga máxima de aplastamiento y el inicio de la propagación de grietas en estructuras compuestas.

En la fase I de este análisis, se investiga la carga máxima de aplastamiento, también conocida como carga máxima de compresión que puede soportar la estructura antes de que ocurran fallas significativas. Además, proporciona información para optimizar la configuración del laminado y seleccionar los materiales adecuados para maximizar la resistencia y minimizar el riesgo de falla por aplastamiento en estructuras de materiales compuestos reforzados con fibras.

#### **4.2.2 Fase 2. Región de inestabilidad**

La región de inestabilidad en los materiales compuestos, se encuentra después de la etapa de carga máxima y antes del colapso progresivo, en esta se observa una serie de fenómenos que indican una pérdida gradual de la integridad estructural. Durante esta fase, el material compuesto experimenta deformaciones permanentes significativas y es susceptible a la formación de grietas o fracturas locales. Estos signos de deterioro son evidencia de la degradación estructural que ocurre en el material.

Es importante destacar que, aunque la estructura aún no ha alcanzado el punto de colapso progresivo, se encuentra en un estado altamente inestable y su capacidad para soportar cargas adicionales se ve comprometida. Los daños visibles en la superficie del material, como grietas visibles o fracturas, son indicadores clave de esta inestabilidad.

### **4.3 Análisis por configuración de laminado en la Fase 1 y Fase 2**

La secuencia de apilado es una de las variables de diseño que puede influir en la transferencia de carga entre las capas de fibras de un tubo de material compuesto. Una secuencia adecuada puede facilitar una distribución uniforme de la carga entre las capas, lo que mejoraría la resistencia del tubo y su capacidad para absorber energía. Por el contrario, puede conducir a concentraciones de esfuerzos y a un comportamiento no deseado durante la aplicación de carga, también puede afectar en el modo de falla que experimenta el tubo compuesto. Por ejemplo, una secuencia de apilado que incluye capas orientadas axialmente puede favorecer la deformación pandeo o aplastamiento de las fibras en dirección longitudinal. En cambio, una secuencia de apilado que incluye capas orientadas perpendicularmente puede ocasionar deformación en forma de pandeo localizado o deslizamiento entre capas.

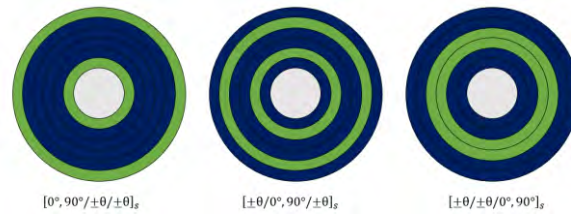
La capacidad de absorción de energía del tubo compuesto está relacionada con la secuencia de apilado de las fibras. Una secuencia de apilado que maximiza la interacción entre las capas y promueve la deformación plástica controlada tiende a mejorar la capacidad de absorción de energía del tubo. Por el contrario, una secuencia de apilado inadecuada puede limitar la capacidad del tubo para absorber energía y aumentar su propensión a la falla prematura.

En la Tabla 4.1 se presentan diferentes configuraciones de diseño para los tubos de material compuesto. En la configuración  $A\theta$ , se ha diseñado considerando laminados con capas de  $[0,90]$  tanto en el exterior como en el interior del tubo, entre estas capas, se colocaron láminas con ángulos  $[\pm\theta]$ . Por otro lado, para  $B\theta$  se diseñó con láminas de  $[0,90]$  intermedias en el tubo de material compuesto, mientras que en el exterior, en el interior y en el centro se colocaron láminas con ángulos  $[\pm\theta]$ . Finalmente, la

configuración de  $C\theta$  se diseñó considerando láminas de  $[0,90]$  en el centro del tubo, mientras que en el interior y exterior se colocaron dos láminas con ángulos  $[\pm\theta]$ , contemplando variaciones de  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ . La representación gráfica se puede observar en la Figura 4.14, donde los círculos en color verde representan las láminas de  $[0,90]$  y los de color azul láminas en  $[\pm\theta]$ .

**Tabla 4.1** Configuraciones  $A\theta, B\theta, C\theta$ .

Nomenclatura	Secuencia de apilado ( $S_a$ )						
$A\theta$	0,90	$\pm\theta$	$\pm\theta$	$\pm\theta$	$\pm\theta$	0,90	$[0,90/\pm\theta/\pm\theta]_s$
$B\theta$	$\pm\theta$	0,90	$\pm\theta$	$\pm\theta$	0,90	$\pm\theta$	$[\pm\theta/0,90/\pm\theta]_s$
$C\theta$	$\pm\theta$	$\pm\theta$	0,90	0,90	$\pm\theta$	$\pm\theta$	$[\pm\theta/\pm\theta/0,90]_s$



**Figura 4.14** Representación gráfica de las configuraciones  $A\theta, B\theta, C\theta$ .

### 4.3.1 Influencia de la secuencia de apilado ( $S_a$ ) sobre tubos con fibras orientadas a $[\pm 15]$

En la Figura 4.15 a) se puede observar la fase I (Fuerza máxima de aplastamiento) de la curva Fuerza-Desplazamiento de las secuencias con láminas de  $[0,90]$  y  $[\pm 15]$ , en sus diferentes configuraciones (véase Figura 4.14). En la Tabla 4.2 se resumen los datos obtenidos de la absorción de energía (EA, por sus siglas en inglés) y de la absorción de energía específica (SEA, por sus siglas en inglés), de los ensayos a compresión de las muestras en sus diferentes configuraciones.

Con la información de la Tabla 4.2 y la Figura 4.15 a) se puede observar que A15 exhibe la mayor absorción de energía específica, registrando un valor de 690.5 mJ/g. En este diseño, las láminas de  $[0,90]$  se sitúan en la parte inferior y exterior del tubo y entre

estos se encuentran cuatro láminas de  $[\pm 15^\circ]$ . Esta disposición de los laminados parece potenciar la capacidad de absorción de energía del material compuesto.

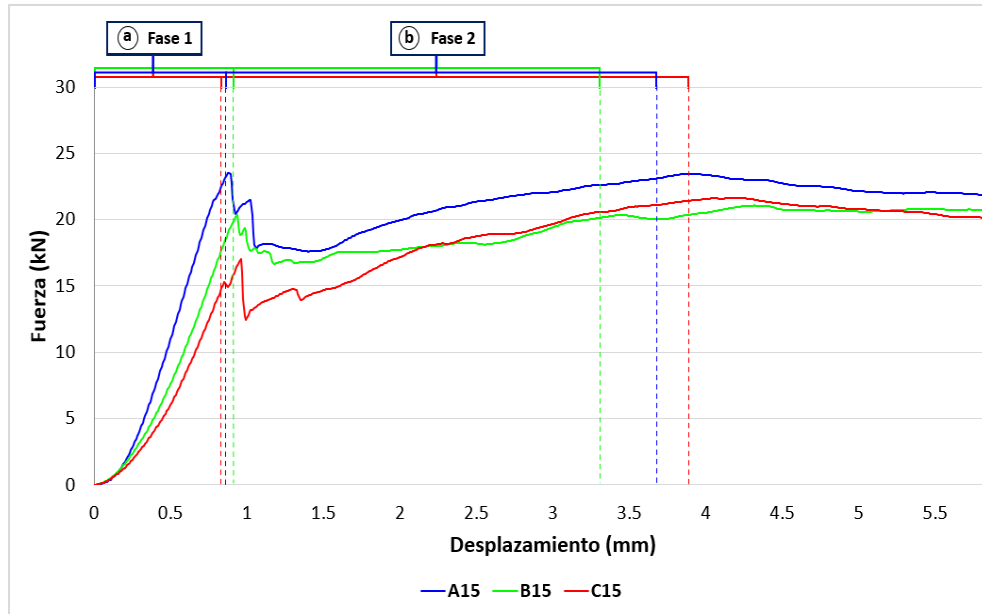
En contraste, la configuración B15 presenta una ligera variación en la secuencia de apilado, con las láminas de  $[0,90]$  colocados entre las capas de  $[\pm 15]$ . Esta alteración en la disposición de láminas de la fibra de vidrio conduce a una disminución del 15.57% en la SEA en comparación con A15, registrando un valor de 583.01 mJ/g.

Similarmente, la configuración C15 introduce otra modificación, colocando los laminados de  $[0,90]$  en el centro del tubo, rodeados por capas de  $[\pm 15]$ . Este ajuste resulta en una absorción de energía específica aún menor, registrando 387.9 mJ/g, lo que representa el 43.82% con respecto a la configuración de referencia A15. Estos porcentajes nos indican cómo las diferentes secuencias de laminado pueden afectar la capacidad de absorción de energía en relación con la configuración de referencia A15.

En la Figura 4.15 b) se observa la curva Fuerza-Desplazamiento correspondiente a la fase 2, que aborda la región inestable del comportamiento de los tubos de material compuesto, con láminas de  $[0,90]$  y  $[\pm 15]$  en diferentes configuraciones, como se pueden ver en la Figura 4.14. Los datos de absorción de energía y absorción de energía específica de los ensayos se muestran en la Tabla 4.2. Esta tabla proporciona los datos de cómo las diferentes secuencias de apilado pueden afectar la capacidad del material para absorber energía bajo cargas de compresión. B15, donde las láminas de  $[0,90]$  se sitúan entre las capas de  $\pm 15^\circ$ , muestra una menor absorción de energía específica en la fase de inestabilidad, con 3418.01 mJ/g, teniendo una diferencia de 24.75% respecto a A15.

Con los datos calculados en la Tabla 4.2, se observa que en la Figura 4.15 b) la configuración A15 es la que tiene mayor capacidad para absorber energía específica con un valor de 4542.68 mJ/g. Esta configuración, denotada como A15  $[0,90/\pm 15/\pm 15]_s$ , se caracteriza por tener las láminas de  $\pm 15^\circ$  ubicadas en el centro del tubo. Al comparar la absorción de energía específica (SEA) entre las configuraciones A15 y C15, se observa una diferencia del 1.76%. Esto resulta notable dado que la SEA para C15 se calcula en 4462.28 mJ/g, un valor muy cercano al de A15. Estas diferencias

pueden atribuirse a las variaciones en la secuencia de apilado. Para este análisis, se consideraron tres configuraciones de laminados distintas. Cuando se examinan materiales laminados, incluso pequeñas diferencias en la estructura pueden tener un impacto en las propiedades mecánicas. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta estas diferencias de secuencia de apilado al interpretar los resultados de la SEA.



**Figura 4.15** Curva Fuerza-Desplazamiento con láminas orientadas a  $[\pm 15]$ ; a) Fase 1, b) Fase 2

**Tabla 4.2** EA y SEA en las Fases 1 y 2, de las muestras con láminas orientadas a  $[\pm 15]$

Probeta	Masa (g)	EA (mJ)		SEA (mJ/g)	
		Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
A15	13.0030	8978.654	59068.535	690.506	4542.685
B15	13.1400	7660.822	44912.673	583.015	3418.012
C15	12.7133	4931.950	56730.451	387.935	4462.280

De los resultados obtenidos y mostradas tanto en la Figura 4.15 y la Tabla 4.2, se puede observar que en la Fase 1 hay una fuerte influencia en la secuencia de apilado ( $S_a$ ). La presencia de láminas de  $[0,90]$  en diferente secuencia en los tubos de materiales reforzados con fibras de vidrio, puede afectar la capacidad para absorber energía. Se puede observar en la Figura 4.15 que, aunque se empleen las mismas orientaciones de fibra, la distribución de las láminas en diferentes posiciones impacta en la absorción de



energía específica. Este fenómeno se refleja en la Fase 1 de la curva de Fuerza-Desplazamiento de las estructuras tubulares de material compuesto, donde se muestra que la configuración A15 destaca por su tener mayor resistencia para soportar fuerza aplicada y su capacidad para absorber energía.

#### **4.3.2 Influencia de la secuencia de apilado ( $S_a$ ) sobre tubos con fibras orientadas a $[\pm 30]$**

En la Figura 4.16 se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento de los resultados obtenidos en los ensayos realizados de los tubos reforzados con fibras de vidrio con láminas de  $[0,90]$  y  $[\pm 30]$ , en sus diferentes configuraciones (véase la Figura 4.14). En la Tabla 4.3 se resumen los datos calculados de la absorción de energía y la absorción de energía específica de las muestras sometidas a ensayos de compresión en sus diversas configuraciones, utilizando láminas de  $[0,90]$  y  $[\pm 30]$ .

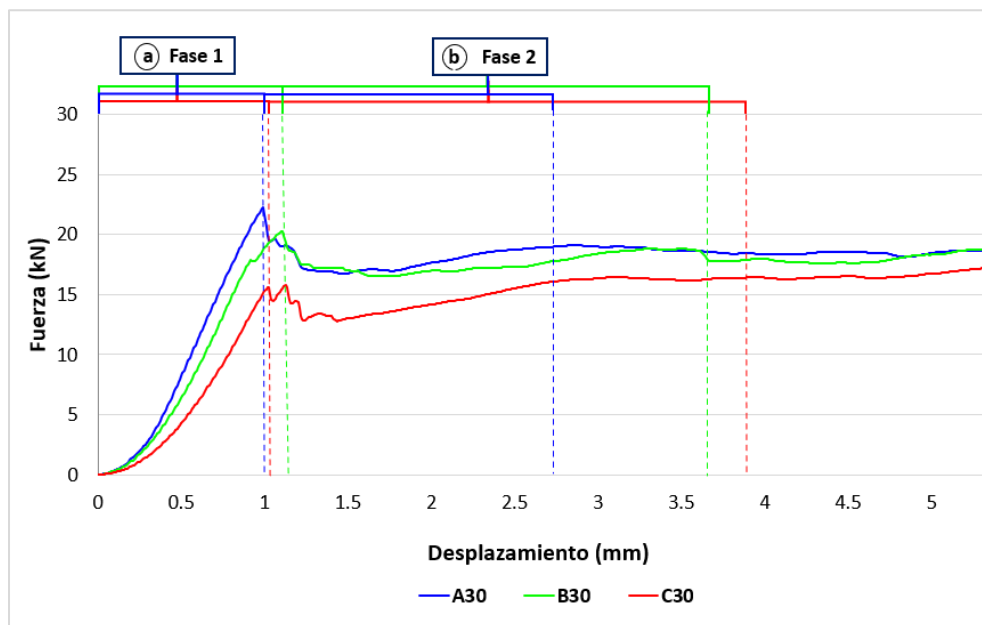
En la Figura 4.16 a) se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento de la Fase 1, en esta fase se puede observar que la configuración A30 muestra una resistencia alta a la fuerza máxima de aplastamiento (Fase 1). Sin embargo, en el cálculo de la absorción de energía específica su capacidad fue de 741.75 mJ/g. Es importante destacar que en A30 las láminas de  $[0^\circ, 90^\circ]$  se encuentran tanto en el interior como en el exterior del tubo.

Por otro lado, B30 donde existe una variación en el diseño (véase Figura 4.14), se calculó una SEA de 794.80 mJ/g, superando a A30 en un 6.68%, a pesar de tener una resistencia menor a la fuerza. En contraste, C30 posiciona los laminados de  $[0,90]$  en el centro del tubo, en esta configuración, la absorción de energía específica fue de 478.41 mJ/g, lo que representa un 39.81% menor que B30, la cual es tomada como referencia, ya que, esta configuración muestra una capacidad mayor para absorber energía.

En la Figura 4.16 b) se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento correspondiente a la fase 2 del análisis de la absorción de energía específica, que se enfoca en la zona de estabilidad de las estructuras tubulares de materiales reforzados con fibras de vidrio. Esta fase se sitúa entre la carga máxima de aplastamiento y el colapso progresivo, y es

crucial para comprender cómo se comporta el material antes de llegar al punto de falla completa. En este estudio, se utilizaron láminas de [0,90] y [ $\pm 30$ ] en diversas configuraciones, como se observa en la Figura 4.14.

Con los datos calculados en la Tabla 4.3 se mostró que la configuración B30 fue la demostró tener una mayor capacidad para absorber energía específica, con un valor de 3411.51 mJ/g. Esta configuración se caracteriza por tener las láminas de  $\pm 30$  en el exterior e interior del tubo de material compuesto. En contraste, para la configuración C30, donde las láminas de [0,90] se sitúan en el centro del tubo, se calculó una SEA de 2417.55 mJ/g en la fase 2, teniendo una diferencia con B30 del 29.14%. Por otro lado, A30 fue la que tuvo menor capacidad para absorber energía con 2306.12 mJ/g, siendo 32.40% menor que la configuración B30.



**Figura 4.16** Curva Fuerza-Desplazamiento con láminas orientadas a [ $\pm 30$ ]; a) Fase 1, b) Fase 2

**Tabla 4.3** EA y SEA en las Fases 1 y 2, de las muestras con láminas orientadas a [ $\pm 30$ ]

Probeta	Masa (g)	EA (mJ)		SEA (mJ/g)	
		Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
A30	12.4367	9224.940	28680.559	741.753	2306.129
B30	12.5230	9953.389	42722.397	794.809	3411.515
C30	12.4767	5968.964	30162.988	478.410	2417.552

Estos resultados sugieren que la capacidad de absorción de energía no solo está influenciada por la orientación de la fibra, sino también por la secuencia de apilado de las láminas. Ya que, en este análisis la configuración B30 fue la que presentó la mayor capacidad de absorción de energía, mientras que A30 destaca por su resistencia a la fuerza de aplastamiento. Por lo tanto, es importante considerar la secuencia de las láminas durante el diseño de las estructuras de materiales reforzados con fibras, ya que esto puede afectar directamente su resistencia bajo fuerza de compresión. La selección adecuada de la secuencia de apilado puede mejorar el rendimiento estructural, la capacidad del material para resistir deformaciones permanentes antes del colapso progresivo y poder aumentar su capacidad de absorber energía.

#### **4.3.3 Influencia de la secuencia de apilado ( $S_a$ ) sobre tubos con fibras orientadas a $[\pm 45]$**

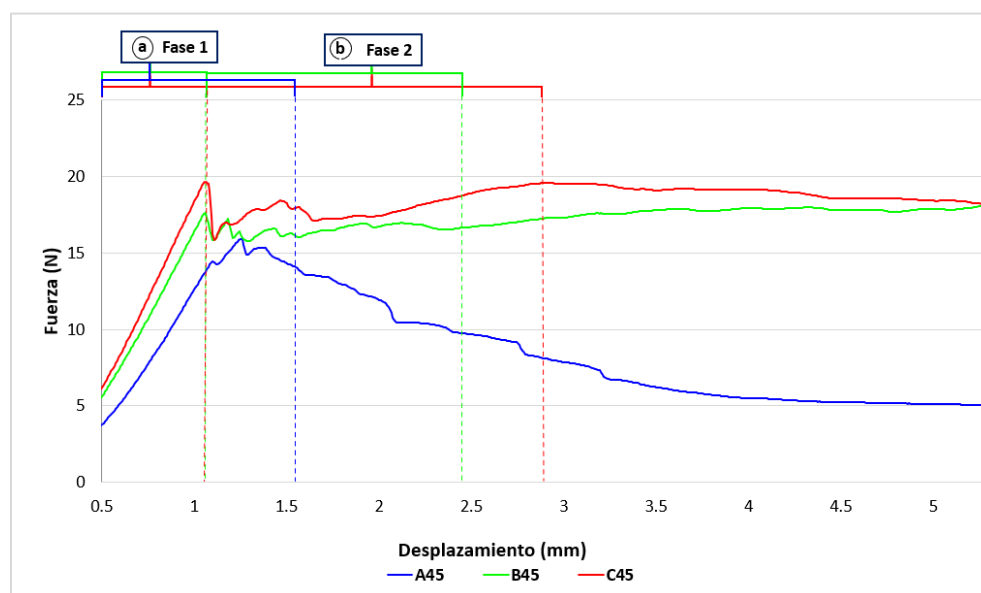
En la Figura 4.17 se presenta la curva de Fuerza-Desplazamiento de los tubos de material compuesto reforzado con fibras de vidrio sometidos a ensayos de compresión en diferentes configuraciones, utilizando láminas de  $[0,90]$  y  $[\pm 45]$ . Además, en la Tabla 4.4 se proporcionan los datos calculados de absorción total de energía y la absorción de energía específica de estos ensayos, en las configuraciones A45, B45 y C45.

Para analizar la influencia de la secuencia de apilado en relación con la absorción de energía específica (SEA), se consideraron tres configuraciones distintas (Véase Figura 4.14). En la Figura 4.17 a) se observa la fase 1 (fuerza máxima de aplastamiento) y, utilizando los datos de la Tabla 4.4, se puede demostrar que la configuración C45 exhibe la mayor resistencia a la aplicación de fuerza, lo que coincide con su capacidad para absorber energía, registrando 749.26 mJ/g. En una de sus variantes, A45, donde los laminados de  $[0,90]$  se ubican en el exterior e interior del tubo, se calculó una SEA de 708.08 mJ/g. Por lo tanto, A45 presenta una diferencia mínima del 5.5% en comparación con C45, lo que sugiere que la secuencia de apilado tuvo un impacto mínimo en este caso, ya que la orientación de las fibras fue determinante.

Por otro lado, B45 mostró una absorción de energía específica más baja, con un registro de 629.46 mJ/g, lo que representa una diferencia porcentual del 16% en comparación con C45 en la zona 1. Esto indica que la secuencia de apilado sí influye en la absorción de energía, ya que el orden y la orientación de los laminados pueden afectar los resultados.

En la curva Fuerza-Desplazamiento de la Figura 4.17 b) se observa la Fase 2 del análisis, que se enfoca en la región de inestabilidad. Se seleccionaron láminas de [0,90] y [ $\pm 45$ ] en tres configuraciones diferentes: A45, B45 y C45, como se ilustra en la Figura 4.14. Los datos calculados y registrados en la Tabla 4.4 muestran que la configuración C45 demostró tener la mayor capacidad de absorción de energía específica en la región de inestabilidad, con un valor de 2900.29 mJ/g. Por otro lado, la configuración B45 registró una SEA de 1707.58 mJ/g, lo que representa una diferencia del 41.13% con respecto a C45.

Es importante mencionar que, para las configuraciones B45 y C45, se observó un modo de colapso progresivo después de la Fase 2. En contraste, la configuración A45 exhibió un modo de falla de fractura frágil, con un fallo catastrófico que cortó el material a 45°, como se muestra en la Figura 4.13 e).



**Figura 4.17** Curva Fuerza-Desplazamiento con láminas orientadas [ $\pm 45$ ]; a) Fase 1, b) Fase 2

**Tabla 4.4** EA y SEA en las Fases 1 y 2, de las muestras con láminas orientadas [ $\pm 45$ ]

Probeta	Masa (g)	EA (mJ)		SEA (mJ/g)	
		Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
A45	11.8200	8369.5756	0.0000	708.0859	0.0000
B45	12.0067	7557.8051	20502.4618	629.4674	1707.5898
C45	11.3033	8469.1450	32784.1568	749.2608	2900.3972

Estos resultados destacan la influencia de la secuencia de laminado respecto a la SEA, incluso cuando se utiliza la misma orientación de las fibras y el mismo número de láminas. La disposición de las láminas juega un papel importante tanto en la SEA como en el modo de falla de las estructuras de material compuesto reforzados con fibras. Este análisis subraya la importancia de considerar estos factores en el diseño y la fabricación de componentes compuestos para garantizar un rendimiento óptimo en términos de absorción de energía y resistencia a la carga.

#### 4.4 Influencia de la orientación de la fibra sobre la absorción de energía en tubos compuestos

La orientación de las fibras en las estructuras de material compuesto determina en gran medida sus propiedades mecánicas, incluida la resistencia y la rigidez del tubo, así como su capacidad para absorber energía. La orientación de las fibras en relación con la dirección de carga axial puede variar significativamente en los tubos compuestos. En algunos casos, las fibras pueden estar alineadas axialmente (longitudinalmente), mientras que en otros casos pueden estar dispuestas en una orientación transversal.

En esta etapa, las fibras orientadas axialmente tienden a soportar la carga principal y pueden deformarse plásticamente en forma de pandeo o aplastamiento. En un tubo de material compuesto con fibras, las fibras pueden estar orientadas en diferentes direcciones, como paralelas al eje del tubo (axial) o en ángulo con respecto al eje del tubo (envolventes). La distribución y orientación de estas fibras determinan cómo el tubo manejará las cargas aplicadas.

- Fibras axiales: Si las fibras están orientadas principalmente a lo largo del eje del tubo, proporcionarán una alta resistencia a la tracción y la compresión a lo largo

de ese eje. Esto significa que el tubo será más resistente a las fuerzas que actúan a lo largo de su longitud.

- **Fibras envolventes:** Si las fibras están orientadas en ángulo con respecto al eje del tubo, pueden proporcionar resistencia a la flexión y al corte. Esto es útil para resistir cargas que actúan perpendicularmente al eje del tubo.

La orientación de las fibras en el laminado del tubo de material compuesto con fibra afectará cómo el tubo absorbe y distribuye la energía durante la etapa de carga máxima. Una combinación adecuada de orientaciones puede optimizar las propiedades mecánicas del tubo para cumplir con los requisitos de diseño específicos.

#### 4.4.1 Influencia de la orientación de la fibra sobre tubos con fibras en la configuración A

La configuración A fue diseñada teniendo en cuenta la disposición de láminas con capas de  $[0,90]$  tanto en el exterior como en el interior del tubo. Entre estas capas, se insertaron laminados con ángulos  $[\pm\theta]$ , para variaciones de  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ . En la Figura 4.18 se muestra una representación visual de esta configuración, donde el color verde indica las capas de  $[0,90]$ , mientras que el color azul representa las capas  $[\pm\theta]$ .

La configuración A, fue de importancia para investigar cómo diferentes ángulos de orientación impactan en las propiedades estructurales del tubo. La incorporación de variaciones angulares  $[\pm\theta]$  entre las capas, junto con las capas de  $[0,90]$ .



**Figura 4.18** Configuración A

En la Figura 4.19 a) se observa la curva de Fuerza-Desplazamiento de la Fase 1 de los ensayos con tubos de material compuesto reforzados con fibras, donde se analiza la

configuración A con diferentes ángulos  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ . Los datos calculados de la absorción de energía y absorción de energía específica se muestran en la Tabla 4.5. Con los datos de la Tabla 4.5 se puede observar que A30 es la que tiene mayor capacidad para absorber energía específica con 741.75 mJ/g, siendo este el valor más alto entre todos los ángulos analizados.

Por otro lado, al utilizar ángulos de  $\pm 15^\circ$ , se observa una menor SEA, con un cálculo de 690.5 mJ/g, lo que representa una disminución del 7% con respecto a la configuración con láminas de  $\pm 30^\circ$ . En cuanto a la configuración con láminas de  $\pm 45^\circ$  (A45), se calculó una SEA de 708.08 mJ/g. Estos resultados indican que la orientación de la fibra tiene influencia respecto a la absorción de energía específica.

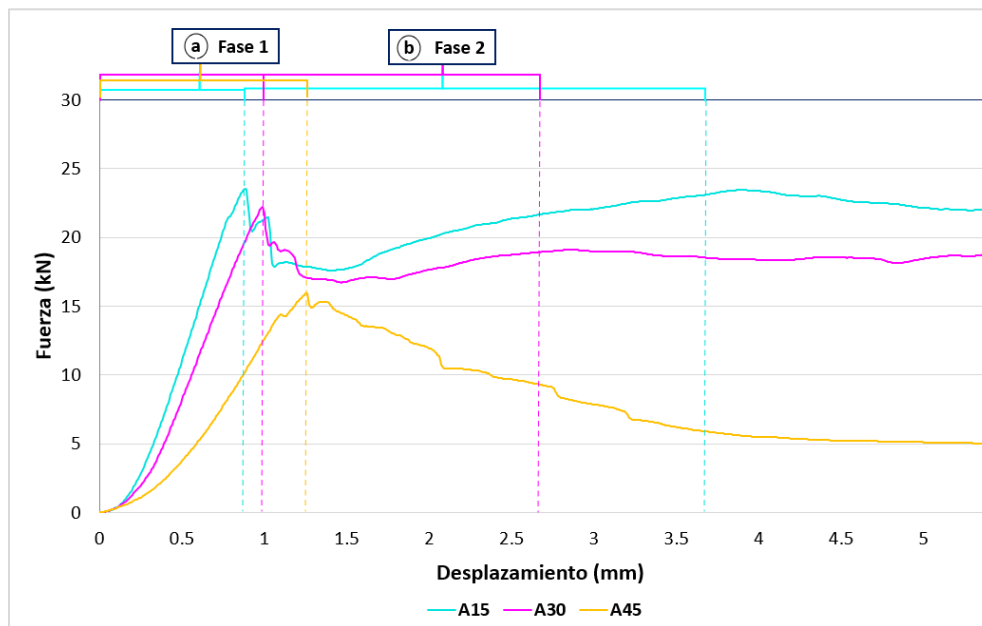


Figura 4.19 Curva Fuerza-Desplazamiento de la configuración A; a) Fase 1, b) Fase 2

Tabla 4.5 EA y SEA en las Fases 1 y 2, en la configuración A

Probeta	Masa (g)	EA (mJ)		SEA (mJ/g)	
		Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
A15	13.0030	8978.654	59068.535	690.506	4542.685
A30	12.4367	9224.940	28680.559	741.753	2306.129
A45	11.8200	8369.576	0.000	708.086	0.000

En la Figura 4.19 se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento de la configuración A con sus diferentes orientaciones en la fibra. Con los datos de la Tabla 4.5 y la Figura 4.13 b), se puede observar que para el caso de A45, la falla fue distinta de las demás configuraciones, ya que se deformó catastróficamente y se formaron grietas a 45°, lo que dificultó la identificación de la fase de inestabilidad. Sin embargo, para A15 y A30, la falla fue progresiva, lo que permitió obtener la fase de inestabilidad y calcular la SEA. Los datos calculados en la Tabla 4.5 indican que A15 tuvo mayor capacidad para absorber energía con un valor de 4542.68 mJ/g, en contraste con A30, donde se calculó 2306.12 mJ/g, mostrando una diferencia del 49.23% entre ellas.

Estos resultados indican la influencia de la orientación de la fibra en la absorción de energía específica y el modo de falla de las muestras. Este análisis sugiere que la orientación de la fibra juega un papel importante en las propiedades mecánicas y el comportamiento estructural de las estructuras de materiales compuestos. Los resultados obtenidos proporcionan información para el diseño de estructuras compuestas, permitiendo seleccionar la orientación de laminado más adecuada para cumplir con los requisitos específicos de la aplicación de los tubos.

Es importante destacar que, si bien la carga máxima alcanzada puede variar según la orientación de la fibra, como se observa en el caso de A15 que muestra una mayor resistencia, la configuración A30 demostró tener una mayor capacidad para absorber energía en la fase 1. Este hallazgo subraya la importancia de considerar no solo la resistencia máxima, sino también la capacidad de absorción de energía al diseñar laminados compuestos para aplicaciones específicas.

#### **4.4.2 Influencia de la orientación de la fibra sobre tubos con fibras en la configuración B**

La configuración B se diseñó considerando láminas de [0,90] intermedias en el tubo de material compuesto, mientras que, en el exterior, interior y en el centro se colocaron láminas con ángulos  $[\pm\theta]$ , contemplando  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ . La Figura 4.20 muestra



gráficamente la posición de estas láminas, en donde el color verde representa las capas de  $[0,90]$  y el color azul representa las capas  $[\pm\theta]$ .



**Figura 4.20** Configuración B

En la curva de Fuerza-Desplazamiento de la Figura 4.21, se observa cómo la absorción de energía específica se ve afectada por la orientación de la fibra y cómo varía el comportamiento de la carga máxima en relación con los diferentes ángulos  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ . Los datos calculados de la absorción de energía y la absorción de energía específica se muestran en la Tabla 4.6, donde se destacan las diferencias entre las orientaciones analizadas.

Con los datos de la Tabla 4.6 y la Figura 4.21 a), se puede observar que la configuración B30 muestra la mayor capacidad para absorber energía específica, con un valor de 794.8 mJ/g. En contraste, con la configuración B45 presenta una SEA menor, siendo un 20.8% inferior a la de la configuración B30, con 629.46 mJ/g. En el caso de B15, se calculó una SEA de 583.01 mJ/g, lo que representa una diferencia porcentual de 26.65% en comparación con B30, en la Fase 1 de la curva Fuerza-Deformación.

En la Figura 4.21 b), se muestra la curva Fuerza-Desplazamiento en la fase 2 de la configuración B con diferentes orientaciones de la fibra. A través de los datos calculados en la Tabla 4.6, se compararon las SEA obtenidas para cada orientación de fibra. Se observa que B15 tuvo la mayor capacidad de absorción de energía específica, con un valor de 3418.01 mJ/g, mientras que B45 registró una SEA de 1707.58 mJ/g, lo que representó una diferencia del 50% con respecto a B15. Por otro lado, B30 presentó una SEA de 3411.51 mJ/g, con una diferencia mínima respecto a B15. Este resultado sugiere que la orientación de la fibra más cercana a  $0^\circ$  tiene una mayor capacidad para absorber energía, ya que B45, que es la orientación más alejada de  $0^\circ$ , mostró una menor SEA, en

base a esto se puede deducir que la orientación de la fibra tiene influencia con la absorción de energía.

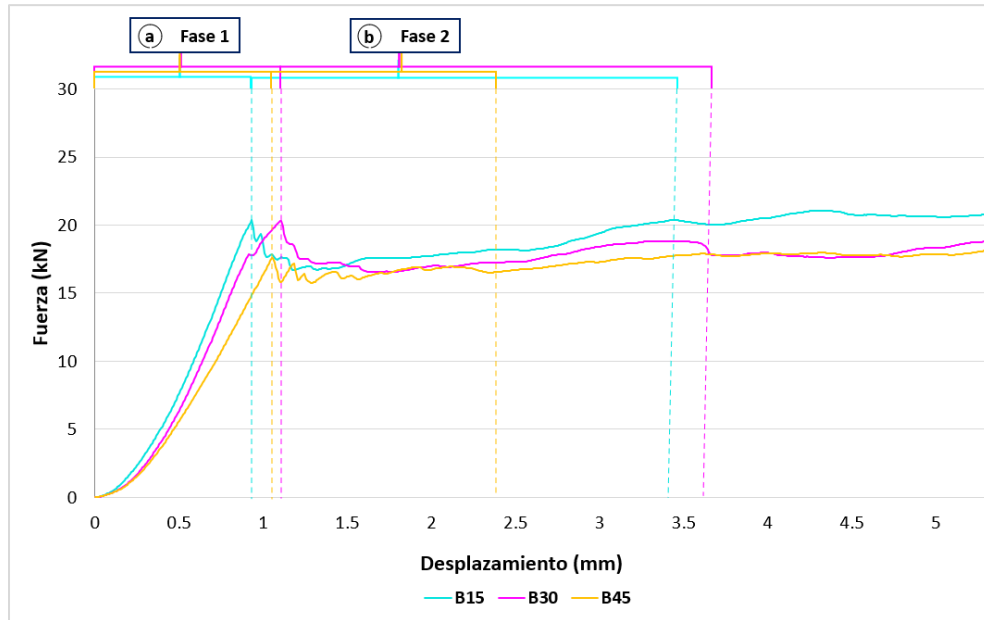


Figura 4.21 Curva Fuerza-Desplazamiento de la configuración B; a) Fase 1, b) Fase 2

Tabla 4.6 EA y SEA en las Fases 1 y 2, en la configuración B

Probeta	Masa (g)	EA (mJ)		SEA (mJ/g)	
		Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
B15	13.1400	7660.8224	44912.6726	583.0154	3418.0116
B30	12.5230	9953.3887	42722.3970	794.8087	3411.5146
B45	12.0067	7557.8051	20502.4618	629.4674	1707.5898

Estos resultados resaltan la influencia de la orientación de la fibra en la capacidad de absorción de energía. A pesar de mantener la misma secuencia de apilado de laminados, el cambio en la orientación de algunos laminados conduce a variaciones en la SEA.

#### 4.4.3 Influencia de la orientación de la fibra sobre tubos con fibras en la configuración C

La configuración C se diseñó con láminas de  $[0,90]$  en el centro del tubo, mientras que en el exterior e interior se colocaron láminas con ángulos  $[\pm\theta]$ , contemplando variaciones de  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ . En la Figura 4.22 se muestra gráficamente la

disposición de estas láminas, en donde el color verde representa las capas de  $[0,90]$  y el color azul representa las capas  $[\pm\theta]$ .



$[\pm\theta/\pm\theta/0^\circ, 90^\circ]_s$

**Figura 4.22** Configuración C

En la Figura 4.23 se presenta la curva Fuerza-Desplazamiento correspondiente a la configuración C, como se muestra en la Figura 4.22, con distintas orientaciones de la fibra. Con los datos de la Tabla 4.7 y la Figura 4.23 a) en donde se observa la fase 1 (Fuerza máxima de aplastamiento), se muestra que configuración C45 tiene mayor capacidad para absorber energía específica, con 749026 mJ/g. En contraste, con la configuración C15 que muestra menor capacidad de absorción de energía, registrando 387.93 mJ/g, lo que representa una diferencia del 48.22% con respecto a C45.

Además, se calculó una SEA de 478.41 mJ/g para C30 en la fase 1 de la curva carga-desplazamiento de la Figura 4.23, mostrando una diferencia del 36.15% en comparación con C45. Por lo que, se puede observar que para la configuración C, las láminas con orientación de  $\pm 45^\circ$  es la que absorbe mayor energía específica en comparación a  $\pm 15$  y  $\pm 30$  en la fase 1 de la curva Fuerza-Desplazamiento de la Figura 4.23.

Para el análisis de la fase 2 (Región de inestabilidad) de la configuración C, la cual, se puede observar en la Figura 4.23b) muestra como las variaciones en la orientación de la fibra pueden influir en el comportamiento de la SEA de las estructuras de material compuesto reforzado con fibras de vidrio. Con los datos de la Tabla 4.7 y en la Figura 4.23b) se muestran los cálculos de la absorción de energía para las muestras de material compuesto sometidas a cargas de compresión. Se calculó que C15 tuvo la mayor capacidad para absorber energía específica, con un valor de 4462.27 mJ/g, mientras que C30 registró la menor SEA, con 2417.55 mJ/g, lo que representa una

diferencia del 45.82% entre ambas configuraciones. Por otro lado, para la configuración C45 se calculó una SEA de 2900.39 mJ/g, teniendo una diferencia del 35% respecto a C15. Estos resultados evidencian que la orientación de la fibra está relacionada con la capacidad de absorción de energía específica del material compuesto, que las fibras en diferentes orientaciones pueden mejorar la resistencia del material y la SEA. En este caso C15 fue la que absorbió mayor energía específica en comparación a las orientaciones  $\pm 30$  y  $\pm 45$ , en la fase 2 de la curva Fuerza-Desplazamiento.

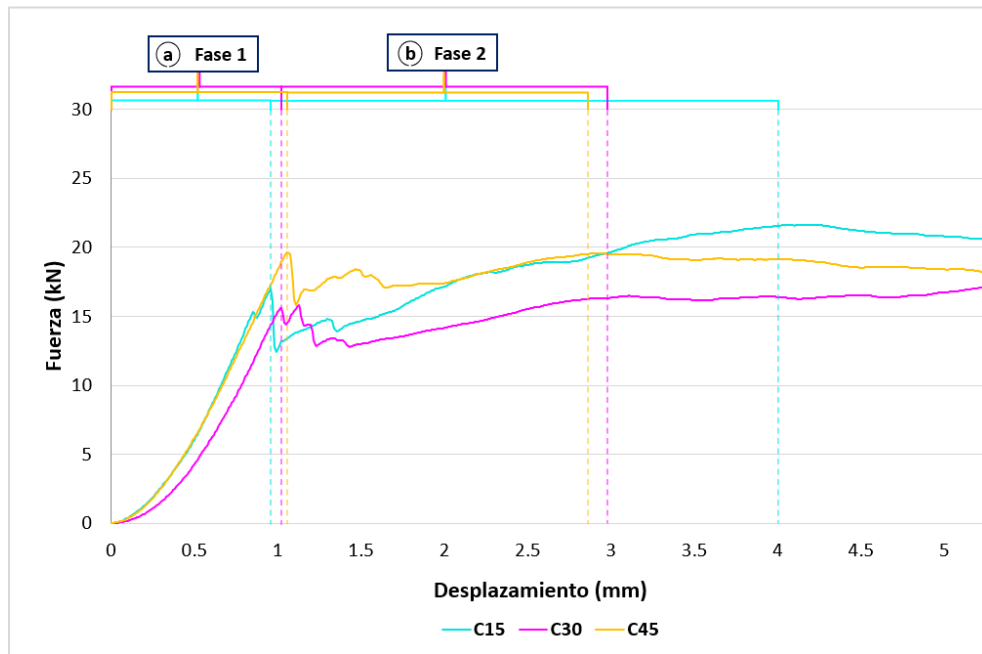


Figura 4.23 Curva Fuerza-Desplazamiento de la configuración C; a) Fase 1, b) Fase 2

Tabla 4.7 EA y SEA en las Fases 1 y 2, en la configuración C

Probeta	Masa (g)	EA (mJ)		SEA (mJ/g)	
		Zona 1	Zona 2	Zona 1	Zona 2
C15	12.7133	4931.9504	56730.4506	387.9353	4462.2798
C30	12.4767	5968.9642	30162.9877	478.4102	2417.5518
C45	11.3033	8469.1450	32784.1568	749.2608	2900.3972

Estos resultados evidencian el impacto de la orientación de la fibra en el cálculo de la SEA. Y que, en el caso de la configuración C, donde las láminas están dispuestas en  $[0,90]$  en el centro del tubo, se resalta que C45 exhibe una mayor capacidad de resistencia (Fase 1) del material en comparación con otras orientaciones. Este hallazgo subraya la

importancia de considerar la disposición de las fibras al diseñar materiales compuestos para mejorar las propiedades mecánicas y la capacidad de absorción de energía en estructuras de materiales compuestos reforzados con fibras. Es importante destacar que, aunque se mantenga la misma secuencia de laminado, las variaciones en la orientación de la fibra pueden cambiar las propiedades estructurales del tubo compuesto.

#### 4.5 Modelos para el cálculo de la absorción de energía específica

En esta sección se presenta el desarrollo de los modelos de regresión lineal múltiple para la estimación de la absorción de energía específica de estructuras tubulares en función de dos variables de diseño: secuencia de apilado y orientación de la fibra. El cual puede obtenerse a través de la ecuación 4.1:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 \dots \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

- $Y$  representa la variable de respuesta que queremos predecir o explicar.
- $X_1, X_2, \dots, X_K$  son las variables de diseño y sus interacciones.
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K$  son los parámetros de coeficientes de regresión.

Como primer paso, se renombran las variables de diseño de la Ecuación 4.1 por las variables de diseño definidas para el presente trabajo. En la Tabla 4.8 se muestran las dos variables de diseño que se utilizaron para los modelos empíricos de la absorción de energía específica.

**Tabla 4.8** Variables de diseño de los modelos para calcular la SEA

Variables de diseño			Estudio experimental
$X_1$	$S_a$	Secuencia de apilado	$[0,90]_6 \quad \therefore 1$
			$[0,90/\pm\theta/\pm\theta]_s \quad \therefore 0.556$
			$[\pm\theta/0,90/\pm\theta]_s \quad \therefore 0.333$
$X_2$	$\theta$	Orientación de la fibra	$[\pm\theta/\pm\theta/0,90]_s \quad \therefore 0.111$
			$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$

La secuencia de apilado es una variable cualitativa que requiere ser convertida en variable cuantitativa, dentro del modelo de regresión múltiple, para ser utilizadas como variable de diseño. Por lo tanto, en la sección 3.1.6 del presente trabajo se establecieron sistemas de clasificación de los laminados en función de la secuencia de apilado. Para estimar los parámetros  $\beta_j$  de la regresión lineal múltiple se necesita contar con  $n$  datos u observaciones ( $n > k$ ) que relacionen cada combinación de valores de las variables de diseño ( $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nk}$ ) con un valor de la variable de respuesta ( $Y_n$ ). Por lo tanto, en la Tabla 4.9, Tabla 4.10 y Tabla 4.11, se muestra una representación de la organización de la información experimental de los laminados de estudio en la fase 1, fase 2 y la suma de las fases 1 y 2, la cual permite relacionar cada combinación de las variables de diseño ( $\theta, S_a$ ) con la variable de respuesta y así poder estimar los parámetros  $\beta_j$  del modelo.

**Tabla 4.9** Organización de la información experimental de los tubos de estudio para la regresión lineal múltiple en la fase 1

<b>Fase 1</b>			
Laminado	$X_1$	$X_2$	Y
	$\theta$ (°)	$S_a$	<i>SEA</i> (mJ/g)
<b>A0</b>	0	1	781.79
<b>A15</b>	15	0.556	690.50
<b>A30</b>	30	0.556	741.75
<b>A45</b>	45	0.566	708.08
<b>B15</b>	15	0.333	583.01
<b>B30</b>	30	0.333	794.80
<b>B45</b>	45	0.333	629.46
<b>C15</b>	15	0.111	387.93
<b>C30</b>	30	0.111	478.41
<b>C45</b>	45	0.111	749.26

**Tabla 4.10** Organización de la información experimental de los tubos de estudio para la regresión lineal múltiple en la fase 2

<b>Fase 2</b>			
Laminado	$X_1$	$X_2$	Y
	$\theta$ (°)	$S_a$	<i>SEA</i> (mJ/g)
<b>A0</b>	0	1	4697.33
<b>A15</b>	15	0.556	4542.68
<b>A30</b>	30	0.556	2306.12
<b>A45</b>	45	0.566	0
<b>B15</b>	15	0.333	3418.01
<b>B30</b>	30	0.333	3411.51

<b>B45</b>	45	0.333	1707.58
<b>C15</b>	15	0.111	4462.27
<b>C30</b>	30	0.111	2417.55
<b>C45</b>	45	0.111	2900.39

**Tabla 4.11** Organización de la información experimental de los tubos de estudio para la regresión lineal múltiple en la suma de las fases 1 y 2

<b>Suma de las fases 1 y 2</b>			
<b>Laminado</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>Y</b>
	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>S_a</math></b>	<b><math>SEA</math></b>
<b>A0</b>	0	1	5479.13
<b>A15</b>	15	0.556	5233.19
<b>A30</b>	30	0.556	3047.88
<b>A45</b>	45	0.566	708.08
<b>B15</b>	15	0.333	4001.02
<b>B30</b>	30	0.333	4206.32
<b>B45</b>	45	0.333	2337.05
<b>C15</b>	15	0.111	4850.21
<b>C30</b>	30	0.111	2895.96
<b>C45</b>	45	0.111	3649.65

#### 4.5.1 Modelo para la predicción de la SEA en la fase 1

El modelo empírico para  $SEA_{Fase1}$  se determinó al utilizar el método de regresión lineal múltiple (sección 3.1.6) de los resultados experimentales obtenidos de los tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio para este estudio, los cuales se muestran en la Tabla 4.9. El modelo de la absorción de energía específica ( $SEA_{Fase1}$ ) se describe a través de la Ecuación 4.2:

$$SEA_{Fase1} = -111.36 + 1731 S_a + 25.686 \theta - 838.25 S_a^2 - .020544 \theta^2 - 25.928 S_a \theta \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

- $SEA_{Fase1}$  es la absorción de energía específica en la Fase 1 de la curva Fuerza-Desplazamiento, en unidades de mJ/g
- $S_a$  es la secuencia de apilado
- $\theta$  es la orientación de la fibra

En la Tabla 4.12 se muestra un resumen del análisis estadístico obtenido sobre el modelo  $SEA_{Fase1}$  con el propósito de conocer la significancia del modelo y la calidad de estimación de los coeficientes de regresión. El modelo  $SEA_{Fase1}$  tiene un nivel de determinación del  $R^2 = 0.8007$ , lo cual indica que el 80.07%, por lo tanto, se tiene un buen ajuste del modelo con respecto a los resultados experimentales, ya que un valor de  $R^2 = 0.9$  o superior se considera un muy buen ajuste, un valor de  $R^2 = 0.8$  o superior es un buen ajuste, y un valor de  $R^2 = 0.6$  o superior se considera un ajuste satisfactorio [89].

**Tabla 4.12** Resumen del análisis estadístico realizado sobre el modelo  $SEA_{Fase1}$

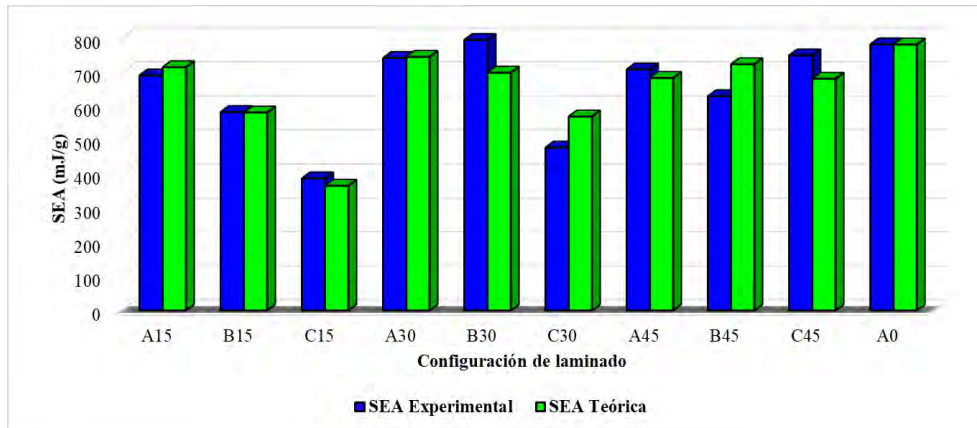
<b>Modelo de la SEA en la Fase 1</b>		
<b>Coefficiente de determinación <math>R^2 = 0.8007</math></b>		
<b>Variables independientes</b>	<b>Coefficientes de regresión</b>	
Constante	-111.36	mJ/g
$S_a$	1731	mJ/g
$\theta$	25.686	mJ/g*°
$S_a^2$	-838.25	g/mJ
$\theta^2$	-0.20544	mJ/g*°2
$S_a * \theta$	-25.928	mJ/g*°

En la Tabla 4.13 se presenta la comparación entre los valores estimados a través del modelo  $SEA_{Fase1}$  y los datos experimentales de los 10 laminados. De igual manera, la comparación realizada entre el modelo  $SEA_{Fase1}$  y los laminados se puede observar a través de la gráfica que se muestra en la Figura 4.24. Los resultados indican que el modelo  $SEA_{Fase1}$  es capaz de estimar la absorción de energía de 7 configuraciones con una diferencia menor a 10% del valor experimental. En las configuraciones restantes el modelo tiene una diferencia menor al 16% en la SEA del valor experimental. Por lo tanto, el modelo  $SEA_{Fase1}$  es capaz de predecir, con una diferencia menor al 10% del valor experimental, de la absorción de energía específica en la Fase 1 de la curva Fuerza-Desplazamiento dentro de los tubos de material compuesto con fibras de vidrio en este estudio.



**Tabla 4.13** Comparación entre los valores estimados a través del modelo  $SEA_{Fase1}$  y los datos experimentales

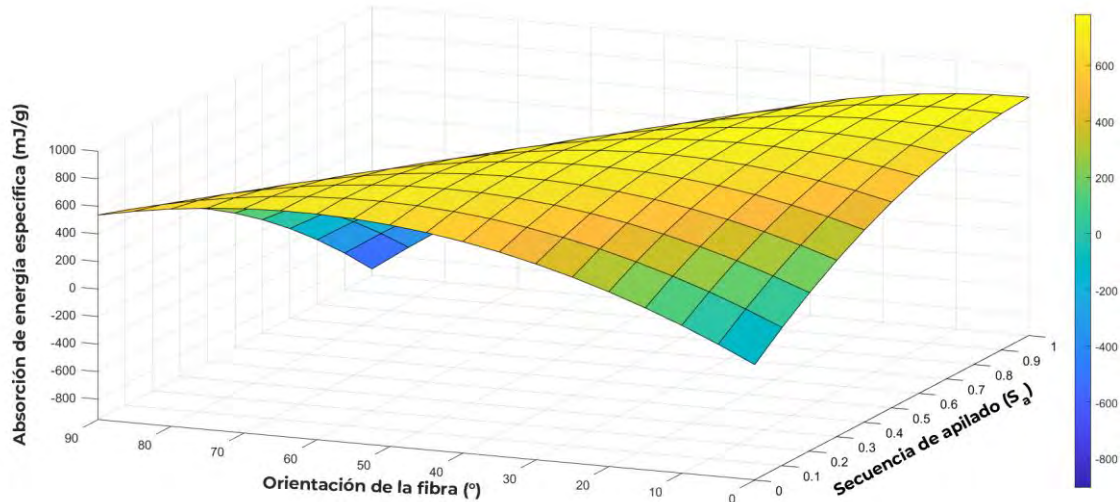
Fase 1					
Probeta	Variables de diseño		Modelo		
	$S_a$	$\theta$ (°)	SEA Experimental (mJ/g)	SEA Teórica (mJ/g)	Diferencia %
A15	0.556	15	690.506	714.7692	-3.395
B15	0.333	15	583.015	581.6659	0.231
C15	0.111	15	387.935	366.3488	5.564
A30	0.556	30	741.753	745.1477	-0.456
B30	0.333	30	794.809	698.7736	13.740
C30	0.111	30	478.410	569.7967	-16.038
A45	0.556	45	708.086	683.0782	3.532
B45	0.333	45	629.467	723.4332	-12.989
C45	0.111	45	749.261	680.7966	10.060
A0	1	0	781.797	781.3900	0.052



**Figura 4.24** Comparación la absorción de energía específica obtenida experimentalmente y teóricamente del modelo  $SEA_{Fase1}$

De acuerdo con el coeficiente de correlación  $R^2 = 80.07\%$  entre los resultados experimentales y el modelo teórico se atribuyen a la influencia de las variables de diseño en los diferentes tubos de material compuesto. Según los análisis realizados en las secciones 4.4 y 4.5, estas variables ejercen una influencia variable en cada configuración. Por ejemplo, en algunas configuraciones, como aquellas con una orientación de  $\pm 30$  grados, la variable  $S_a$  tiene la mayor influencia, mientras que en otros casos la orientación  $\theta$  es más significativa. Esto se refleja en las diferencias entre los datos experimentales y teóricos. Por ejemplo, en las configuraciones con una orientación de  $\pm 30$  grados, la diferencia entre los datos reales y teóricos es del 13% en

el caso de B30, donde los datos experimentales son mayores, mientras que en el caso de C30, la diferencia es del 16%, con la  $SEA$  teórica siendo mayor. Estas diferencias subrayan la influencia de las variables de diseño en los resultados obtenidos.



**Figura 4.25** Comportamiento del modelo  $SEA_{Fase1}$

La gráfica de la Figura 4.25 muestra cómo varía el modelo  $SEA_{Fase1}$  en función de las variables  $S_a$  y  $\theta$ . Se observan las áreas donde la función tiene valores más altos o más bajos, y cómo estas variaciones se relacionan con los cambios en las variables.

Los colores en la superficie tridimensional indican los valores de la función  $SEA_{Fase1}$  en cada punto de la malla de valores para  $S_a$  y  $\theta$ . En las zonas azules/verdes (colores oscuros) indican áreas donde la función  $SEA_{Fase1}$  tiene valores bajos. Pueden representar áreas de baja energía o niveles mínimos de la función en el espacio de variables  $S_a$  y  $\theta$ . En las zonas amarillas/rojas (colores claros) indican áreas donde la función  $SEA_{Fase1}$  tiene valores altos. Pueden representar áreas de alta energía o niveles máximos de la función en el espacio de variables  $S_a$  y  $\theta$ . Las transiciones entre colores oscuros y claros en la superficie representan cambios en los valores del modelo  $SEA_{Fase1}$  a medida que las variables  $S_a$  y  $\theta$  varían.

### 4.5.2 Modelo para la predicción de la SEA en la fase 2

El modelo empírico para  $SEA_{Fase2}$  se determinó al utilizar el método de regresión lineal múltiple (sección 4.1.6) de los resultados experimentales obtenidos de los tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio para este estudio, los cuales se muestran en la Tabla 4.10. El modelo de la absorción de energía específica ( $SEA_{Fase2}$ ) se describe a través de la Ecuación 4.3:

$$SEA_{Fase2} = 3689.6 + 8204.4 S_a - 24.792 \theta - 7129.2 S_a^2 + 0.064149 \theta^2 - 193.18 S_a \theta \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

- $SEA_{Fase2}$  es la absorción de energía específica en la Fase 2 de la curva Fuerza-Desplazamiento, en unidades de mJ/g
- $S_a$  es la secuencia de apilado
- $\theta$  es la orientación de la fibra

En la Tabla 4.14 se muestra un resumen del análisis estadístico obtenido sobre el modelo  $SEA_{Fase2}$  con el propósito de conocer la significancia del modelo y la calidad de estimación de los coeficientes de regresión. El modelo  $SEA_{Fase2}$  tiene un nivel de determinación del  $R^2 = 0.87796$ , lo cual indica que el 87.79%, por lo tanto, se tiene un buen ajuste del modelo con respecto a los resultados experimentales (ver sección 4.5.1).

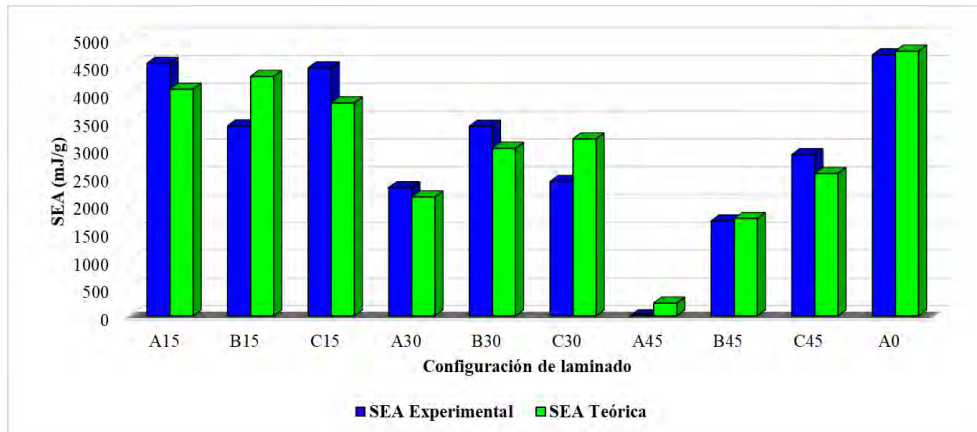
**Tabla 4.14** Resumen del análisis estadístico realizado sobre el modelo  $SEA_{Fase2}$

Modelo de la SEA en la Fase 2		
Coeficiente de determinación $R^2 = 0.87796$		
Variables independientes	Coeficientes de regresión	
Constante	3689.6	mJ/g
$S_a$	8204.4	mJ/g
$\theta$	-24.792	mJ/g*°
$S_a^2$	-7129.2	g/mJ
$\theta^2$	6.41E-02	mJ/g*°²
$S_a * \theta$	-193.18	mJ/g*°

En la Tabla 4.15 se presenta la comparación entre los valores estimados a través del modelo  $SEA_{Fase2}$  y los datos experimentales de los 10 laminados. De igual manera, la comparación realizada entre el modelo  $SEA_{Fase2}$  y los laminados se puede observar a través de la gráfica que se muestra en la Figura 4.26. Los resultados indican que el modelo  $SEA_{Fase2}$  es capaz de estimar la absorción de energía de 8 configuraciones con una diferencia menor a 15% del valor experimental. En las configuraciones restantes el modelo tiene una diferencia menor al 24% en la  $SEA$  del valor experimental. Por lo tanto, el modelo  $SEA_{Fase2}$  es capaz de predecir, con una diferencia menor al 15% del valor experimental, de la absorción de energía específica en la Fase 2 de la curva Fuerza-Desplazamiento dentro de los tubos de material compuesto con fibras de vidrio en este estudio.

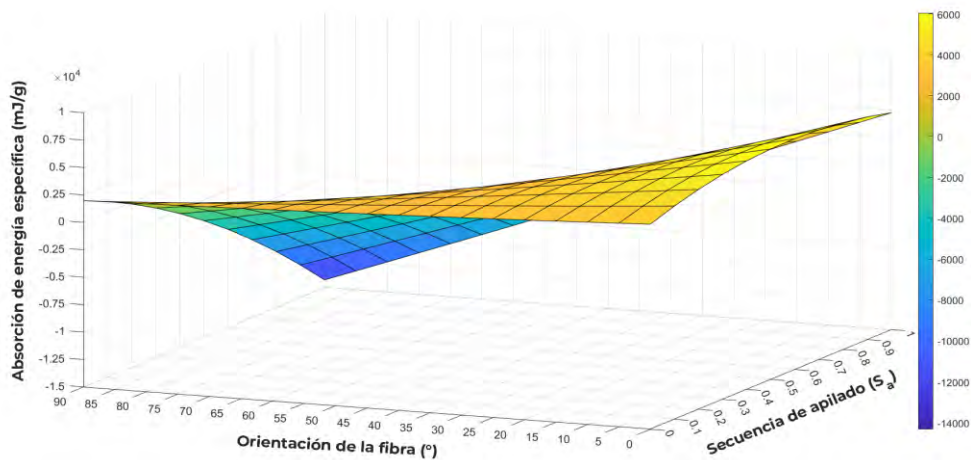
**Tabla 4.15** Comparación entre los valores estimados a través del modelo  $SEA_{Fase2}$  y los datos experimentales

<b>Fase 2</b>					
<b>Probeta</b>	<b>Variables de diseño</b>		<b>Modelo</b>		
	$S_a$	$\theta$ (°)	<b>SEA Experimental (mJ)</b>	<b>SEA Teórica (mJ)</b>	<b>Diferencia %</b>
<b>A15</b>	0.556	15	4542.6851	4078.7864	11.370
<b>B15</b>	0.333	15	3418.0116	4308.7348	-20.672
<b>C15</b>	0.111	15	4462.2798	3833.3584	16.41
<b>A30</b>	0.556	30	2306.1291	2139.0857	7.243
<b>B30</b>	0.333	30	3411.5146	3015.2212	13.140
<b>C30</b>	0.111	30	2417.5518	3183.1342	-24.051
<b>A45</b>	0.556	45	0.0000	228.2522	-100.000
<b>B45</b>	0.333	45	1707.5898	1750.5748	-2.455
<b>C45</b>	0.111	45	2900.3972	2561.7772	13.220
<b>A0</b>	1	0	4697.3351	4764.8000	-1.416



**Figura 4.26** Comparación la absorción de energía específica obtenida experimentalmente y teóricamente del modelo  $SEA_{Fase2}$

En la fase dos, se observan diferencias máximas del 24% entre los datos experimentales y teóricos, lo que sugiere que las variables de diseño influyen en el cálculo de la SEA. Esta influencia varía según la configuración y la orientación de la fibra en cada caso específico. Por lo tanto, en algunos casos, las diferencias son mayores en los datos experimentales, mientras que en otros casos son mayores en los datos teóricos. Por ejemplo, en las configuraciones con orientaciones de  $\pm 15$  grados, las configuraciones A15 y C15 muestran diferencias del 11% y 16%, respectivamente, con una SEA experimental mayor. Sin embargo, en el caso de B15, la diferencia es del 21%, siendo mayor la parte teórica, lo que ilustra claramente la influencia de las variables de diseño en los resultados obtenidos.



**Figura 4.27** Comportamiento del modelo  $SEA_{Fase2}$

La gráfica de la Figura 4.27 muestra cómo varía el modelo  $SEA_{Fase2}$  en relación de las variables  $S_a$  y  $\theta$ . Se pueden identificar las zonas con valores altos y bajos, y cómo estas variaciones se relacionan con los cambios en las variables.

Los colores en la superficie tridimensional reflejan los valores de la función  $SEA_{Fase2}$  en cada punto de la malla de valores para  $S_a$  y  $\theta$ . En las áreas con tonos azules/verdes (colores oscuros) indican áreas donde la función  $SEA_{Fase2}$  tiene valores bajos. Pueden representar áreas de baja energía o niveles mínimos de la función en el espacio de variables  $S_a$  y  $\theta$ . En las zonas amarillas/rojas (colores claros) indican áreas donde la función  $SEA_{Fase2}$  tiene valores altos. Pueden representar áreas de alta energía o niveles máximos de la función en el espacio de variables  $S_a$  y  $\theta$ . Las transiciones entre colores oscuros y claros en la superficie representan cambios en los valores del modelo  $SEA_{Fase2}$  a medida que las variables  $S_a$  y  $\theta$  cambian.

#### 4.5.3 Modelo para la predicción de la SEA en la suma de las fases 1 y 2

El modelo empírico para  $SEA_{Fase1y2}$  se determinó al utilizar el método de regresión lineal múltiple (sección 4.1.6) de los resultados experimentales obtenidos de los tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio para este estudio, los cuales se muestran en la Tabla 4.11. El modelo de la absorción de energía específica ( $SEA_{Fase1y2}$ ) se describe a través de la Ecuación 4.4:

$$SEA_{Fase1y2} = 3578.2 + 9935.4 S_a + 0.89327 \theta - 7967.5 S_a^2 - 0.14128 \theta^2 - 219.11 S_a \theta \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

- $SEA_{Fase1y2}$  es la absorción de energía específica en las Fases 1 y 2 de la curva Fuerza-Desplazamiento, en unidades mJ/g
- $S_a$  es la secuencia de apilado
- $\theta$  es la orientación de la fibra

En la Tabla 4.16 se muestra un resumen del análisis estadístico obtenido sobre el modelo  $SEA_{Fase1y2}$  con el propósito de conocer la significancia del modelo y la calidad de estimación de los coeficientes de regresión. El modelo  $SEA_{Fase1y2}$  tiene un nivel de determinación del  $R^2 = 0.86124$ , lo cual indica que el 86.12%, por lo tanto, se tiene un buen ajuste del modelo con respecto a los resultados experimentales, ya que un valor de  $R^2 = 0.9$  o superior se considera un muy buen ajuste (ver sección 4.5.1).

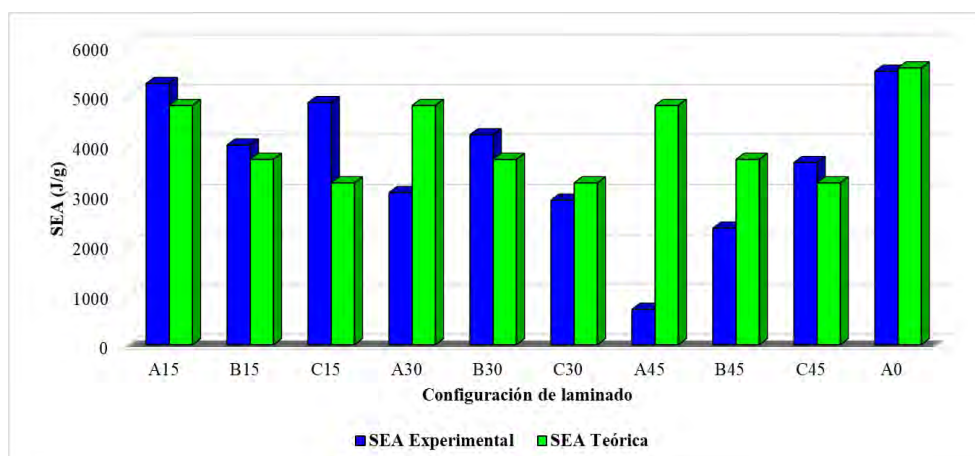
**Tabla 4.16** Resumen del análisis estadístico realizado sobre el modelo  $SEA_{Fase1y2}$

<b>Modelo de la SEA en las Fases 1 y 2</b>		
<b>Coefficiente de determinación <math>R^2 = 0.86124</math></b>		
<b>Variables independientes</b>	<b>Coefficientes de regresión</b>	
Constante	3578.2	mJ/g
$S_a$	9935.4	mJ/g
$\theta$	0.89327	mJ/g <sup>*o</sup>
$S_a^2$	-7967.5	g/mJ
$\theta^2$	-1.41E-01	mJ/g <sup>*o2</sup>
$S_a * \theta$	-219.11	mJ/g <sup>*o</sup>

En la Tabla 4.17 se presenta la comparación entre los valores estimados a través del modelo  $SEA_{Fase1y2}$  y los datos experimentales de los 10 laminados. De igual manera, la comparación realizada entre el modelo  $SEA_{Fase1y2}$  y los laminados se puede observar a través de la gráfica que se muestra en la Figura 4.28. Los resultados indican que el modelo  $SEA_{Fase1y2}$  es capaz de estimar la absorción de energía de 6 configuraciones con una diferencia menor a 12% del valor experimental. En 3 configuraciones el modelo tiene una diferencia menor al 38% en la  $SEA$  del valor experimental y en la configuración A45 se tiene una diferencia del 85%, por cuestiones de que en esta secuencia la falla fue distinta y la fase 2 no se pudo diferenciar de la fase 3. Por lo tanto, el modelo  $SEA_{Fase1y2}$  es capaz de predecir, con una diferencia menor al 12% del valor experimental, de la absorción de energía específica en las Fases 1 y 2 de la curva Fuerza-Desplazamiento dentro de los tubos de material compuesto con fibras de vidrio en este estudio.

**Tabla 4.17** Comparación entre los valores estimados a través del modelo  $SEA_{Fase1y2}$  y los datos experimentales

Probeta	Variables de diseño		Modelo		
	$S_a$	$\theta$ (°)	SEA Experimental (mJ/g)	SEA Teórica (mJ/g)	Diferencia %
	A15	0.556	15	5233.1915	4793.4750
B15	0.333	15	4001.0270	3713.9173	7.176
C15	0.111	15	4850.2151	3242.5125	49.600
A30	0.556	30	3047.8825	4793.4750	-36.416
B30	0.333	30	4206.3232	3713.9173	13.26
C30	0.111	30	2895.9619	3242.5125	-10.688
A45	0.556	45	708.0859	4793.4750	-85.228
B45	0.333	45	2337.0572	3713.9173	-37.073
C45	0.111	45	3649.6581	3242.5125	12.560
A0	1	0	5479.1325	5546.1000	-1.207

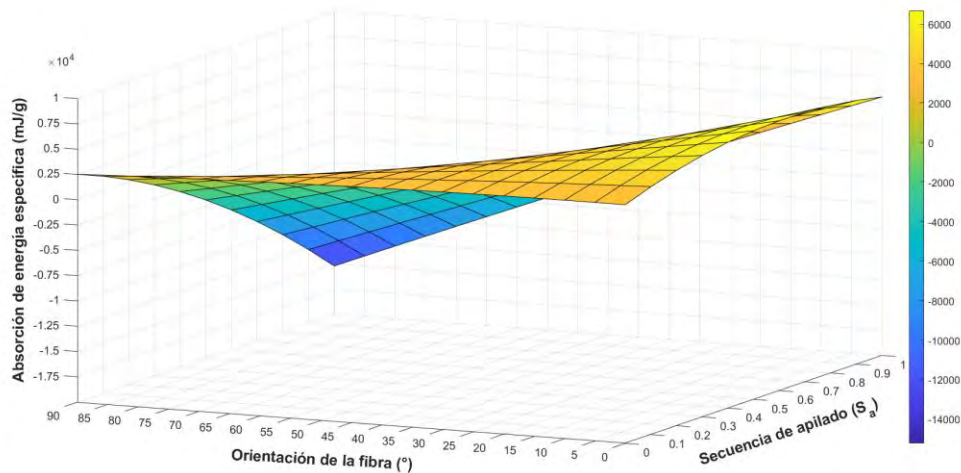


**Figura 4.28** Comparación la absorción de energía específica obtenida experimentalmente y teóricamente del modelo  $SEA_{Fase1y2}$

Las diferencias entre los resultados experimentales y teóricos reflejan claramente la influencia de las variables de diseño en el cálculo de la *SEA*. Se observa que estas diferencias varían según cada configuración, ya que en algunos casos la *SEA* es mayor en los cálculos experimentales, mientras que en otros casos lo es en la parte teórica. Por ejemplo, en el caso de A45, la diferencia alcanza el 85%. Esta disparidad se debe a la forma de falla que experimentó la muestra, lo que impidió la identificación de la Fase 2, limitándonos así a considerar únicamente la Fase 1 en los cálculos. Por otro lado, en los casos de B45 y C45, las diferencias son del 37% y 13%, respectivamente, lo que subraya



la influencia de las variables en relación con la *SEA*. Estos ejemplos destacan la importancia de considerar cuidadosamente las variables de diseño en la interpretación de los resultados experimentales y teóricos.



**Figura 4.29** Comportamiento del modelo  $SEA_{Fase1y2}$

La gráfica de la Figura 4.29 muestra cómo varía el modelo  $SEA_{Fase1y2}$  en relación de las variables  $S_a$  y  $\theta$ . Se pueden identificar las zonas con valores altos y bajos, y cómo estas variaciones se relacionan con los cambios en las variables.

Los colores en la superficie tridimensional reflejan los valores de la función  $SEA_{Fase1y2}$  en cada punto de la malla de valores para  $S_a$  y  $\theta$ . En las áreas con tonos azules/verdes (colores oscuros) indican áreas donde la función  $SEA_{Fase1y2}$  tiene valores bajos. Pueden representar áreas de baja energía o niveles mínimos de la función en el espacio de variables  $S_a$  y  $\theta$ . En las zonas amarillas/rojas (colores claros) indican áreas donde la función  $SEA_{Fase1y2}$  tiene valores altos. Pueden representar áreas de alta energía o niveles máximos de la función en el espacio de variables  $S_a$  y  $\theta$ . Las transiciones entre colores oscuros y claros en la superficie representan cambios en los valores del modelo  $SEA_{Fase1y2}$  a medida que las variables  $S_a$  y  $\theta$  cambian.

#### 4.5.4 Comparación de los modelos $SEA_{Fase1}$ , $SEA_{Fase2}$ y $SEA_{Fase1y2}$ en la predicción de la SEA

Al comparar los modelos  $SEA_{Fase1}$ ,  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$ , se observa una evolución en la capacidad predictiva y en la comprensión de la influencia de las variables de diseño en la absorción de energía específica (SEA) de los tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio.

En la Fase 2, se desarrolló un modelo para predecir la SEA en esta etapa de la curva Fuerza-Desplazamiento. Aunque este modelo exhibe un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) más alto que el de la Fase 1 (0.87796), indicando una mejor capacidad para explicar la variabilidad de los datos experimentales, la interpretación de las relaciones entre las variables de diseño es menos directa. El modelo, representado por la ecuación 4.3, refleja la interacción lineal entre las variables y la SEA. Esto sugiere que, si bien la Fase 2 puede capturar una mayor proporción de la variabilidad en los datos, la comprensión de cómo las variables de diseño afectan la respuesta del material puede ser más complicado.

Por otro lado, el modelo que abarca la suma de las Fases 1 y 2 muestra un coeficiente de determinación intermedio ( $R^2 = 0.86124$ ), lo que indica que combinar ambas fases mejora la capacidad predictiva en comparación con la Fase 1 sola, pero no tanto como la Fase 2 sola. Sin embargo, la ventaja de este enfoque radica en su capacidad para capturar tanto la fase inicial como la posterior de la curva Fuerza-Desplazamiento, lo que proporciona una visión más completa del comportamiento del material a lo largo de todo el proceso de carga.

Al comparar los modelos  $SEA_{Fase1}$ ,  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$ , se puede concluir que la Fase 1 sigue siendo crucial para comprender la influencia de las variables de diseño en la SEA. Aunque los modelos  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$  pueden ofrecer una mayor capacidad predictiva en términos generales, el modelo  $SEA_{Fase1}$  proporciona una base sólida y una comprensión más directa de las relaciones entre las variables de diseño y la respuesta del material.

La fase 1 del estudio emerge como el punto óptimo para observar con mayor precisión la influencia de las variables de diseño (la orientación de la fibra y la secuencia de apilado) en el comportamiento de los tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio.

En primer lugar, el modelo empírico desarrollado para la absorción de energía específica (SEA) en la fase 1, mediante el método de regresión lineal múltiple, ofrece una descripción detallada de cómo las variables de diseño, como la secuencia de apilado ( $S_a$ ) y la orientación de la fibra ( $\theta$ ), influyen en la respuesta del material. La ecuación resultante (Ecuación 4.2) proporciona una representación matemática de estas relaciones, permitiendo una interpretación precisa de cómo cada variable contribuye al resultado final.

Además, el análisis estadístico del modelo de la fase 1 revela un nivel de determinación ( $R^2$ ) del 80.07%, indicando un buen ajuste del modelo a los datos experimentales. Esta proporción explica el 80.07% de la variabilidad observada en la absorción de energía específica, lo que subraya la capacidad del modelo para capturar y explicar de manera efectiva la influencia de las variables de diseño. La comparación entre los valores estimados por el modelo y los datos experimentales muestra que el modelo de la fase 1 es capaz de predecir la SEA con una precisión significativa. La diferencia entre los valores teóricos y experimentales es menor al 10% en la mayoría de los casos, lo que demuestra la capacidad del modelo para capturar con precisión el comportamiento del material en diversas configuraciones.

Además, la Fase 1 establece una base sólida para las fases posteriores del estudio. La información recopilada durante esta etapa inicial proporciona una visualización de cómo las variables de diseño afectan la respuesta del material, lo que guía el diseño y la interpretación de las fases subsiguientes. Esta secuencia garantiza que cualquier influencia de las variables de diseño se pueda identificar y abordar de manera efectiva desde el principio, mejorando así la calidad y la confiabilidad de los resultados en las etapas posteriores del estudio. La fase 1 del estudio se destaca como el punto de partida óptimo para evaluar la influencia de las variables de diseño en el comportamiento de

los tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio. El modelo empírico desarrollado en esta fase proporciona una representación matemática precisa de estas relaciones y muestra un buen ajuste a los datos experimentales, lo que lo convierte en una herramienta para comprender y predecir el rendimiento del material en aplicaciones prácticas.

# Conclusiones

---

Del análisis experimental de los ensayos a compresión realizados en tubos de material compuesto reforzados con fibras de vidrio, se puede concluir que:

- Con la revisión de la literatura, se ha demostrado que las variables de diseño (orientación de la fibra, secuencia de apilado, forma y geometría de las estructuras) de las estructuras de materiales compuestos reforzados con fibras impactan significativamente en su capacidad para absorber energía. Por lo tanto, una selección adecuada de estas variables puede mejorar considerablemente las propiedades de las estructuras de material compuesto.
- La orientación de las fibras en un material compuesto laminado tiene impacto en su capacidad de absorción de energía. Las fibras alineadas en diferentes direcciones pueden mejorar la resistencia de las estructuras al distribuir las cargas de manera más uniforme y optimizar la transferencia de esfuerzos. En un estudio realizado, se demostró que los laminados con fibras orientadas a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , y  $90^\circ$  mostraron una capacidad de absorción de energía notablemente superior en comparación con aquellos con una orientación unidireccional.
- La secuencia de apilado también desempeña un papel crucial en estructuras de materiales compuestos, ya que la disposición de las capas en una secuencia específica puede influir en la capacidad de absorción de energía, especialmente en términos de deformación y falla del material. Según los resultados obtenidos los laminados con una secuencia de apilado simétrica y balanceada, como  $[090/\pm 45/\pm 45]_s$ , exhibieron una mejor respuesta bajo cargas cuasi-estáticas.
- Se evidencia que la orientación de las fibras en los materiales compuestos tiene un impacto directo en sus propiedades mecánicas. Configuraciones con fibras orientadas en la dirección de la carga, como en el caso de la configuración A0, muestran una mayor resistencia a la fuerza aplicada y una absorción de energía específica más alta en comparación con otras orientaciones.
- Un análisis más detallado de la absorción de energía específica se logró al dividir la curva Fuerza-Desplazamiento de los ensayos a compresión de los materiales

compuestos en tres fases: a) Fuerza máxima de aplastamiento, b) Región inestable y c) Colapso progresivo.

- Se determinó que en la Fase 1 y la Fase 2, la influencia de las variables de diseño (secuencia de apilado y orientación de la fibra) es más notable, mientras que la Fase 3 está más influenciada por la longitud del tubo de material compuesto.
- La diferencia porcentual entre las configuraciones A15 y C15 muestra que A15 tiene una mayor capacidad de absorción de energía específica en contraste con C15, con una diferencia del 56.17%. Esto demuestra que en las configuraciones con  $\pm 15$ , la secuencia de apilado tiene una influencia directa en el cálculo de la SEA en la Fase 1. Pero en la Fase 2, las configuraciones que tienen mayor diferencia son A15 y B15 con el 24.75%. Por lo que se puede observar que en la Fase 1, la secuencia de apilado es la variable que tiene mayor influencia con respecto a la SEA.
- Para secuencias con láminas de  $\pm 30$ , en la Fase 1 B30 y C30 tienen una diferencia del 39.81%, mostrando que la secuencia de apilado tiene influencia en la SEA, pero en cuestión de soportar fuerza máxima A30 es la que muestra tener mayor resistencia. En la Zona 2 la configuración A30 fue menor por un 32.4% menor que B30, por lo que se puede deducir que la orientación de la fibra tiene mayor impacto que la secuencia de apilado con laminado de  $\pm 30$ .
- Para laminados con orientaciones de  $\pm 45$  se determinó que la secuencia de apilado tiene gran influencia en el cálculo de la absorción de energía específica y en el modo de falla que se puede presentar. Para la SEA en la Fase 1 C45 es la que tuvo mayor capacidad para absorber energía con 0.7486J/g en comparación con B45 en donde se registró una diferencia del 5.49%, en esta configuración la variable con mayor impacto es la orientación de la fibra. Para la Fase 2 se observó que no se puede diferenciar la Fase 2 en A45 por el modo de fallo presentado, en cambio para B45 y C45 se tiene una diferencia del 41.12%.
- La ubicación específica de un laminado en la secuencia de apilado influye significativamente en la absorción de energía específica y en la respuesta estructural de los materiales compuestos. La deformación distintiva observada

en A45, con rupturas a un ángulo de  $45^\circ$ , ilustra cómo la disposición de laminados puede inducir una respuesta estructural que conduce a una capacidad de absorción de energía considerablemente inferior.

- Las pruebas realizadas muestran que diferentes configuraciones de materiales compuestos presentan comportamientos distintos durante la falla. Configuraciones con fibras alineadas a la carga tienden a experimentar un colapso progresivo durante la deformación, lo que indica una capacidad de absorción de energía más eficaz en situaciones de compresión.
- Se desarrollaron los modelos  $SEA_{Fase1}$ ,  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$  para calcular la absorción de energía específica en estructuras de material compuesto reforzado con fibras, en función de dos variables de diseño (secuencia de apilado y orientación de la fibra). El desarrollo del modelo implicó convertir datos cualitativos en cuantitativos de la variable  $S_a$ , tomando en cuenta la posición de la lámina  $[0,90]$ .
- Los modelos de absorción de energía específica en la Fase 1 ( $SEA_{Fase1}$ ), Fase 2 ( $SEA_{Fase2}$ ) y en la suma de la Fase 1 y 2 ( $SEA_{Fase1y2}$ ) tienen una calidad de estimación del 80.07%, 87.79% y 86.12%, respectivamente, los cuales se consideran como buenos; por lo tanto, es posible estimar la capacidad de absorción de energía específica a través de los modelos propuestos, una vez que se conoce la configuración del tubo compuesto (secuencia de apilado y la orientación de la fibra).
- Aunque los coeficientes de correlación son altos, las diferencias porcentuales entre los valores experimentales y teóricos revelan discrepancias específicas en las predicciones del modelo en diferentes condiciones. Esta variabilidad indica que el modelo puede no ser igualmente preciso en todas las situaciones experimentales y podría requerir ajustes para mejorar su exactitud en casos específicos.

# Trabajos Futuros

---

Las siguientes recomendaciones de trabajos futuros tienen como propósito ampliar los aportes de este trabajo:

- Realizar ensayos en muestras de estructuras tubulares fabricadas con materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio y carbono. Se recomienda analizar diferentes orientaciones no contempladas en este estudio, así como explorar el comportamiento de fibras unidireccionales en dichas estructuras.
- Profundizar en el estudio de los modelos propuestos, variando las variables de diseño (secuencia de apilado y la orientación de la fibra). Esto permitirá evaluar la eficacia de los modelos en diferentes escenarios.
- Analizar los mecanismos de falla de las estructuras tubulares sometidas a cargas cuasi-estáticas. Un análisis detallado de estos mecanismos proporcionará información para mejorar la resistencia y durabilidad de las estructuras en condiciones de carga.
- Explorar otras variables de diseño en las estructuras de materiales compuestos. Se sugiere evaluar cómo estas variables impactan en el cálculo de la capacidad de absorción de energía en las distintas fases de la curva fuerza-desplazamiento. Esta investigación podría revelar nuevas perspectivas sobre el comportamiento de las estructuras bajo diferentes condiciones de carga.



# Referencias

---

- [1] P. H. Thornton y R. A. Jeryant, “Crash energy management in composite automotive structures”, *Int J Impact Eng*, vol. 7, núm. 2, pp. 167–180, 1988, doi: 10.1016/0734-743X(88)90024-3.
- [2] C. Reuter y T. Tröster, “Crashworthiness and numerical simulation of hybrid aluminium-CFRP tubes under axial impact”, *Thin-Walled Structures*, vol. 117, pp. 1–9, ago. 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.03.034.
- [3] S. Gowid, E. Mahdi, J. Renno, S. Sassi, G. Kharmanda, y A. Shokry, “Experimental investigation of the crashworthiness performance of fiber and fiber steel-reinforced composites tubes”, *Composite Structures*, vol. 251. Elsevier Ltd, el 1 de noviembre de 2020. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112655.
- [4] D. Hu, C. Zhang, X. Ma, y B. Song, “Effect of fiber orientation on energy absorption characteristics of glass cloth/epoxy composite tubes under axial quasi-static and impact crushing condition”, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 90, pp. 489–501, nov. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.08.017.
- [5] J. Fu, Q. Liu, Y. Ma, y Z. Zhang, “A comparative study on energy absorption of flat sides and corner elements in CFRP square tube under axial compression”, *Thin-Walled Structures*, vol. 166, sep. 2021, doi: 10.1016/j.tws.2021.108080.
- [6] C. W. Isaac y C. Ezekwem, “A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability”, *Composite Structures*, vol. 257. Elsevier Ltd, el 1 de febrero de 2021. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113081.
- [7] L. S. Arias Maya y L. Vanegas Useche, “Materiales Compuestos Inteligentes”, *Scientia et Technica*, vol. 2, núm. 25, ago. 2004, doi: 84911685026.
- [8] P. D. Mangalgi, “Composite materials for aerospace applications”, *Bulletin of Materials Science*, vol. 22, núm. 3, pp. 657–664, may 1999, doi: 10.1007/BF02749982.
- [9] T. P. Hovorun, K. V. Berladir, V. I. Pererva, S. G. Rudenko, y A. I. Martynov, “Modern materials for automotive industry”, *Journal of Engineering Sciences*, vol. 4, núm. 2, pp. f8–f18, 2017, doi: 10.21272/jes.2017.4(2).f8.

- 
- [10] H. Ahmad, A. A. Markina, M. V Porotnikov, y F. Ahmad, “A review of carbon fiber materials in automotive industry”, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 971, núm. 3, p. 032011, nov. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/971/3/032011.
- [11] J. Faus Ferrer y M. Marquina Contreras, “Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono para aplicaciones estructurales”, dic. 2013, Consultado: el 2 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/34276>
- [12] J. G. Paredes Salinas, C. F. Pérez Salinas, y C. B. Castro Miniguano, “Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz”, *Enfoque UTE*, vol. 8, núm. 3, pp. 1–15, jun. 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n3.163.
- [13] R. Jafari Nedoushan, “Improvement of energy absorption of expanded metal tubular structures under compressive loads”, *Thin-Walled Structures*, vol. 157, dic. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.107058.
- [14] G. Zhu, J. Liao, G. Sun, y Q. Li, “Comparative study on metal/CFRP hybrid structures under static and dynamic loading”, *Int J Impact Eng*, vol. 141, jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103509.
- [15] J. L. Dávila *et al.*, “Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales”, pp. 45–67, 2011.
- [16] J. Xu, Y. Ma, Q. Zhang, T. Sugahara, Y. Yang, y H. Hamada, “Crashworthiness of carbon fiber hybrid composite tubes molded by filament winding”, *Compos Struct*, vol. 139, pp. 130–140, abr. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.11.053.
- [17] W. Aperador, A. Delgado, y J. H. Bautista- Ruiz, “Influencia de las fibras de carbono y fibras de vidrio en materiales compuestos como modelo en la implementación de pisos industriales.”, *Respuestas*, vol. 15, núm. 2, pp. 63–69, feb. 2016, doi: 10.22463/0122820X.398.
- [18] C. Edil da Costa, F. Velasco López, y J. M. Torralba Castelló, “Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones”, *Revista de Metalurgia*, vol. 36, núm. 3, pp. 179–192, jun. 2000, doi: 10.3989/revmetalm.2000.v36.i3.570.
- [19] D. Escudero López, “Composite materials. Applications”, *Informes de la Construcción*, vol. 52, núm. 472, abr. 2001, doi: 10.3989/ic.2001.v52.i472.676.
- [20] S. Palanivelu *et al.*, “Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes”, *Polym Test*, vol. 29, núm. 2, pp. 224–234, abr. 2010, doi: 10.1016/j.polymertesting.2009.11.005.
-

- 
- [21] D. W. Schmueser y L. E. Wickliffe, “Impact Energy Absorption of Continuous Fiber Composite Tubes”, *J Eng Mater Technol*, vol. 109, núm. 1, pp. 72–77, ene. 1987, doi: 10.1115/1.3225937.
- [22] S. Ramakrishna, “Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications”, *Mater Des*, vol. 18, núm. 3, pp. 167–173, oct. 1997, doi: 10.1016/S0261-3069(97)00098-8.
- [23] J. J. Carruthers, A. P. Kettle, y A. M. Robinson, “Energy Absorption Capability and Crashworthiness of Composite Material Structures: A Review”, *Appl Mech Rev*, vol. 51, núm. 10, pp. 635–649, oct. 1998, doi: 10.1115/1.3100758.
- [24] G. L. Farley, “Energy Absorption of Composite Materials”, *J Compos Mater*, vol. 17, núm. 3, pp. 267–279, may 1983, doi: 10.1177/002199838301700307.
- [25] D. Hull, “A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes”, *Compos Sci Technol*, vol. 40, núm. 4, pp. 377–421, ene. 1991, doi: 10.1016/0266-3538(91)90031-J.
- [26] S. T. W. Lau, M. R. Said, y M. Y. Yaakob, “On the effect of geometrical designs and failure modes in composite axial crushing: A literature review”, *Composite Structures*, vol. 94, núm. 3, pp. 803–812, febrero de 2012. doi: 10.1016/j.compstruct.2011.09.013.
- [27] H.-W. Song, X.-W. Du, y G.-F. Zhao, “Energy Absorption Behavior of Double-Chamfer Triggered Glass/Epoxy Circular Tubes”, *J Compos Mater*, vol. 36, núm. 18, pp. 2183–2198, sep. 2002, doi: 10.1177/0021998302036018515.
- [28] P. H. Thornton, “Energy Absorption in Composite Structures”, *J Compos Mater*, vol. 13, núm. 3, pp. 247–262, jul. 1979, doi: 10.1177/002199837901300308.
- [29] M. A. Jiménez, A. Miravete, E. Larrodé, y D. Revuelta, “Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles”, *Compos Struct*, vol. 48, núm. 1–3, pp. 107–111, ene. 2000, doi: 10.1016/S0263-8223(99)00081-1.
- [30] J. J. de la Cuesta y H. Ghasemnejad, “Improvement of Force History Pattern in Composite Tubular Structures by Developed Trigger Mechanisms”, *Applied Composite Materials*, vol. 29, núm. 5, pp. 1771–1794, oct. 2022, doi: 10.1007/s10443-022-10040-5.
- [31] T. Ran, Y. Ren, y H. Jiang, “Design and Assessments of Gradient Chamfer Trigger for Enhancing Energy-Absorption of CFRP Square Tube”, *Applied Composite Materials*, oct. 2022, doi: 10.1007/s10443-022-10071-y.

- 
- [32] Z. Song, S. Ming, T. Li, K. Du, C. Zhou, y B. Wang, “Improving the energy absorption capacity of square CFRP tubes with cutout by introducing chamfer”, *Int J Mech Sci*, vol. 189, ene. 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105994.
- [33] E. Cetin, A. Baykasoğlu, M. E. Erdin, y C. Baykasoğlu, “Experimental investigation of the axial crushing behavior of aluminum/CFRP hybrid tubes with circular-hole triggering mechanism”, *Thin-Walled Structures*, vol. 182, p. 110321, ene. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110321.
- [34] D. Siromani *et al.*, “An experimental study on the effect of failure trigger mechanisms on the energy absorption capability of CFRP tubes under axial compression”, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 64, pp. 25–35, sep. 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.04.019.
- [35] A. G. Mamalis, M. Robinson, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous, M. B. Ioannidis, y J. Carruthers, “Crashworthy capability of composite material structures”, *Compos Struct*, vol. 37, núm. 2, pp. 109–134, feb. 1997, doi: 10.1016/S0263-8223(97)80005-0.
- [36] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, y D. P. Papapostolou, “Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental”, *Compos Struct*, vol. 63, núm. 3–4, pp. 347–360, feb. 2004, doi: 10.1016/S0263-8223(03)00183-1.
- [37] S. Palanivelu *et al.*, “Comparative study of the quasi-static energy absorption of small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures”, *Polym Test*, vol. 29, núm. 3, pp. 381–396, may 2010, doi: 10.1016/j.polymertesting.2010.01.003.
- [38] S. Palanivelu *et al.*, “Comparison of the crushing performance of hollow and foam-filled small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures”, *Compos B Eng*, vol. 41, núm. 6, pp. 434–445, sep. 2010, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.05.009.
- [39] E. F. Abdewi, S. Sulaiman, A. M. S. Hamouda, y E. Mahdi, “Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes”, *Thin-Walled Structures*, vol. 46, núm. 3, pp. 320–332, mar. 2008, doi: 10.1016/j.tws.2007.07.018.
- [40] H. Jishi, R. Alia, y W. Cantwell, “The energy-absorbing characteristics of tubular sandwich structures”, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 24, núm. 1, pp. 742–762, ene. 2022, doi: 10.1177/10996362211020457.
- [41] S. Sulaiman, M. AlHajji, C. N. A. Jaafar, F. A. Aziz, y T. Zuhair, “Effect of composite material distribution and shape on energy absorption systems”, *Advances in Materials*
-

- 
- and Processing Technologies*, vol. 8, núm. 1, pp. 1–10, ene. 2022, doi: 10.1080/2374068X.2020.1793265.
- [42] P. M. Weaver y M. F. Ashby, “Material limits for shape efficiency”, *Prog Mater Sci*, vol. 41, núm. 1–2, pp. 61–128, 1997, doi: 10.1016/S0079-6425(97)00034-0.
- [43] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Demosthenous, y M. B. Ioannidis, “Analysis of failure mechanisms observed in axial collapse of thin-walled circular fibreglass composite tubes”, *Thin-Walled Structures*, vol. 24, núm. 4, pp. 335–352, ene. 1996, doi: 10.1016/0263-8231(95)00042-9.
- [44] S. Boria, S. Pettinari, y F. Giannoni, “Theoretical analysis on the collapse mechanisms of thin-walled composite tubes”, *Compos Struct*, vol. 103, pp. 43–49, sep. 2013, doi: 10.1016/j.compstruct.2013.03.020.
- [45] A. Meidell, “Computer aided material selection for circular tubes designed to resist axial crushing”, *Thin-Walled Structures*, vol. 47, núm. 8–9, pp. 962–969, ago. 2009, doi: 10.1016/j.tws.2009.02.003.
- [46] P. K. Mallick, “Failure of polymer matrix composites (PMCs) in automotive and transportation applications”, en *Failure Mechanisms in Polymer Matrix Composites*, Elsevier, 2012, pp. 368–392. doi: 10.1533/9780857095329.2.368.
- [47] F. Dong, Q. Ma, X. Qin, X. Gan, y T. Zhou, “Failure analysis of Al/CFRP hybrid tube with initial damage during axial compression”, *Thin-Walled Structures*, vol. 181, p. 110108, dic. 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.110108.
- [48] Y. Wang, J. Feng, J. Wu, y D. Hu, “Effects of fiber orientation and wall thickness on energy absorption characteristics of carbon-reinforced composite tubes under different loading conditions”, *Compos Struct*, vol. 153, pp. 356–368, oct. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.06.033.
- [49] M. Mirzaei, M. Shakeri, M. Sadighi, y H. Akbarshahi, “Experimental and analytical assessment of axial crushing of circular hybrid tubes under quasi-static load”, *Compos Struct*, vol. 94, núm. 6, pp. 1959–1966, may 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.01.003.
- [50] M. R. Bambach, “Experiments and crushing mechanism analysis of hybrid square metal tubes with filament wound CFRP”, *Composites Part C: Open Access*, vol. 6, p. 100194, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100194.
- [51] S. M. Hosseini y M. Shariati, “Experimental analysis of energy absorption capability of thin-walled composite cylindrical shells by quasi-static axial crushing test”, *Thin-Walled Structures*, vol. 125, pp. 259–268, abr. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.01.026.
-

- 
- [52] H. Yang, H. Lei, G. Lu, Z. Zhang, X. Li, y Y. Liu, “Energy absorption and failure pattern of hybrid composite tubes under quasi-static axial compression”, *Compos B Eng*, vol. 198, p. 108217, oct. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108217.
- [53] G. Zhu, J. Liao, G. Sun, y Q. Li, “Comparative study on metal/CFRP hybrid structures under static and dynamic loading”, *Int J Impact Eng*, vol. 141, p. 103509, jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103509.
- [54] M. F. De Jesús-Ramírez, A. Abúndez-Pliego, E. Alcudia-Zacarías, J. A. Paz-González, y S. Blanco-Figueroa, “Revisión comparativa de la capacidad de absorción de energía mecánica de estructuras tubulares compuestas”, *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 7, núm. 1, p. e343, mar. 2024, doi: 10.37636/recit.v7n1e343.
- [55] J. A. Naranjo Paredes, “Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos en la edificación: hormigón reforzado con fibra de vidrio”, Universidad Politécnica de Cataluña, 2016. Consultado: el 19 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/84137>
- [56] A. Besednjak, *Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*, Primera edición., vol. 100. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica, 2005.
- [57] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design*. CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781439894132.
- [58] Mariano, “Tecnología de los Plásticos”, *Materiales compuestos*. Consultado: el 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>
- [59] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781498711067.
- [60] A. Miravete, P. Antequera, y L. Jiménez, *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*, 1a ed. Editorial Reverté, 1991.
- [61] Miravete Antonio, *Materiales compuestos*, Miravete., vol. 2. 2011.
- [62] D. Gay, *Composite Materials*. CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b17106.
- [63] Y. Y., “¡Conocé los Tipos de fibra de vidrio que existen!”, *Rejiglass FRP®*. Consultado: el 31 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://rejiglass.com.mx/tipos-de-fibra-de-vidrio/>

- 
- [64] R. A. Balart Gimeno, N. Montañés Muñoz, y L. J. Quiles Carrillo, “Materiales compuestos. Clasificación y tipos de laminados”, *Universitat Politècnica de València*, 2018.
- [65] A. Mayugo Majó, “Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas”, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2003.
- [66] G. Bonet, C. Bottero, y M. Fontana, “Estructura de materiales compuestos - Análisis de falla progresiva”, *Departamento de Aeronautica - Facultad de ingeniería UNLP*, 2013.
- [67] G. Lu y T. X. Yu, *Energy Absorption of Structures and Materials*, 1a ed. England: CRC Press, 2003.
- [68] S. Sulaiman, M. AlHajji, C. N. A. Jaafar, F. A. Aziz, y T. Zuhair, “Effect of composite material distribution and shape on energy absorption systems”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 8, núm. 1, pp. 1–10, ene. 2022, doi: 10.1080/2374068X.2020.1793265.
- [69] D. Hill, *Materiales compuestos*, Reverté. Barcelona, 1987.
- [70] Mates Italiana, “Laminación Manual - Mates Italiana”, Laminación Manual. Consultado: el 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mates.it/es/los-procesos/laminacion-manual/#:~:text=La%20laminaci%C3%B3n%20manual%20o%20hand,dispositivos%20necesarios%20para%20el%20uso>.
- [71] Formlabs, “Cómo fabricar piezas de fibra de carbono”, Tres métodos para crear piezas de fibra de carbono. Consultado: el 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/latam/blog/laminacion-fibra-carbono-materiales-compuestos/>
- [72] T. Dattatray, W. Nikhil, B. Ram, N. Shital, y B. Pankaj, “A Review on Design and Development of Filament Winding Machine for Composite Materials”, *International Journal of Current Engineering and Technology*, ene. 2011, doi: 10.14741/Ijcet/22774106/6.5.2016.20.
- [73] M. Quanjin *et al.*, “Design of portable 3-axis filament winding machine with inexpensive control system”, *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND SCIENCES*, vol. 12, núm. 1, pp. 3479–3493, mar. 2018, doi: 10.15282/jmes.12.1.2018.15.0309.
- [74] L. Terry, G. Dalley, P. C. McCullough, y L. Choquette, “Handbook: Manufacturing Advanced Composite Components for Airframes”, Springfield, Virginia, abr. 1997.
-

- 
- [75] J.-S. Kim, H.-J. Yoon, y K.-B. Shin, “A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers”, *Int J Impact Eng*, vol. 38, núm. 4, pp. 198–207, abr. 2011, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.11.007.
- [76] H. Pulido Gutiérrez y R. de la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, Segunda Edición. México, D.F: McGraw-Hill, 2008.
- [77] “S-Glass Uni-Web”, ACP Composites Online Store. Consultado: el 3 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://store.acpcomposites.com/s-glass-uni-web>
- [78] “Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture”. Consultado: el 27 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.astm.org/d6641\\_d6641m-16.html](https://www.astm.org/d6641_d6641m-16.html)
- [79] “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics”, ASTM. Consultado: el 27 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/standards/d695>
- [80] E. Mahdi, A. M. S. Hamouda, y T. A. Sebaey, “The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes”, *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 923–928, abr. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.009.
- [81] E. Alcudia Zacarías, “Bases para el Diseño de Materiales Compuestos Estructurales Híbridos con Enfoque en Tolerancia a la Deformación”, Tesis doctoral, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)), Cuernavaca, Morelos, 2021.
- [82] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites*. CRC Press, 2007. doi: 10.1201/9781420005981.
- [83] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materials Design, Third Edition*, 3rd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781315296494.
- [84] R. Jiang *et al.*, “Energy Absorption Characteristics of a CFRP-Al Hybrid Thin-Walled Circular Tube under Axial Crushing”, *Aerospace*, vol. 8, núm. 10, p. 279, sep. 2021, doi: 10.3390/aerospace8100279.
- [85] Y. Yang, Y. Nishikawa, A. Nakai, U. S. Ishiaku, y H. Hamada, “Effect of Cross-Sectional Geometry on the Energy Absorption Capability of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Composite Tubes.”, *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 15, núm. 4, ene. 2008, doi: 10.1515/SECM.2008.15.4.249.
- [86] A. Berndt, M. Laux, H. Oberlercher, R. Heim, y F. O. Riemelmoser, “Additive manufacturing of continuous carbon fiber tubes and experimental investigation of the
-



- 
- energy absorption capability under quasi-static loading”, *Procedia Structural Integrity*, vol. 34, pp. 105–110, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.12.016.
- [87] Z. Cui, Q. Liu, Y. Sun, y Q. Li, “On crushing responses of filament winding CFRP/aluminum and GFRP/CFRP/aluminum hybrid structures”, *Compos B Eng*, vol. 200, p. 108341, nov. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108341.
- [88] G. L. Farley y R. M. Jones, “Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes”, *J Compos Mater*, vol. 26, núm. 1, pp. 37–50, ene. 1992, doi: 10.1177/002199839202600103.
- [89] E. Ostertagová, “Modelling using Polynomial Regression”, *Procedia Eng*, vol. 48, pp. 500–506, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.545.
- [90] Q. Ma, Y. Zha, B. Dong, y X. Gan, “Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box”, *Polym Compos*, vol. 41, núm. 10, pp. 4202–4220, oct. 2020, doi: 10.1002/pc.25705.

# Apéndices

## Apéndice A. Base de datos de la secuencia de apilado [0. 90] reportados en la literatura

Autor (es)	Dimensiones			Orientación de fibra		EA	SEA
	Diámetro mm	Longitud mm	Espesor mm	Orientación	Apilado	kJ	kJ/kg
<b>Zhu et al.</b> [53]	52.12	200	1.09	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	2.13059	64.76
	53.49	200	1.63	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	3.05005	59.69
	54.48	200	2.31	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	4.63058	66.82
	47.7	200	0.98	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	2.19908	82.67
	47.72	200	1.37	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	3.38381	86.32
	47.71	200	1.85	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	4.30117	83.03
	52.45	200	2.56	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	3.27328	30.56
	53.72	200	3.26	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	4.4798	36.16
	54.86	200	3.65	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	5.00342	35.74
	49.86	200	2.38	0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>	5.25641	52.88
	49.9	200	2.68	0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>	7.14669	63.41
49.94	200	3.29	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	9.35949	75.42	
<b>Mahdi et al.</b> [80]		120.11	8.032	0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>	5.325	11.99
		120.129	8.064	15/-75	[15°/-75°] <sub>8</sub>	7.927	16.412
		119.857	8.103	30/-60	[30°/-60°] <sub>8</sub>	6.585	13.411
		120.142	8.003	45/-45	[45°/-45°] <sub>8</sub>	5.798	11.95
		120.033	8.094	60/-30	[60°/-30°] <sub>8</sub>	6.585	13.239
		120.211	7.998	75/-15	[75°/-15°] <sub>8</sub>	7.927	15.840 02
<b>Kim et al.</b> [5]	30	100	0.91	90/0	[90°/0°] <sub>7</sub>	2.06	72.7
	30	100	1.1	90/0	[90°/0°] <sub>11</sub>	1.03	43.1
	30	100	1.05	90/0	[90°/0°] <sub>11</sub>	1.23	49.9
	30	100	1.04	90/0	[90°/0°] <sub>11</sub>	1.48	59.5
	30	100	0.96	90/0	[90°/0°] <sub>4</sub>	2.22	81.7
	30	100	1.68	90/0	[90°/0°] <sub>6</sub>	1.29	58
	30	100	2.04	90/0	[90°/0°] <sub>6</sub>	1.06	45.6
<b>Sulaiman et al.</b> [68]	90	100		0/90	[0°/90°] <sub>4</sub>		6.5
	90	100		0/90	[0°/90°] <sub>6</sub>		13
	90	100		0/90	[0°/90°] <sub>8</sub>		21.23
	90	100		0/90	[0°/90°] <sub>10</sub>		19.2

	50	100	1.5	0/90	$[0^\circ/90^\circ]_2$	2.360002	96.33
<b>Fu et al. [5]</b>							
	53	100	3	0/90	$[0^\circ/90^\circ]_2$	3.26872	50.21
<b>Wang et al. [48]</b>							
	50	125	3	15	$[15^\circ]_8$	7.3088	77.2
	50	125	3	30	$[30^\circ]_9$	6.7254	72.2
	50	125	3	45	$[45^\circ]_{10}$	5.0509	56.3
	50	125	3	60	$[60^\circ]_{11}$	6.1558	68.8
	50	125	3	75	$[75^\circ]_{12}$	6.3657	66.8
<b>Mirzaei et al. [49]</b>							
	55	100	2.8	90/90	$[90^\circ/90^\circ]_s$	0.98	9.43
	55	100	3.9	90/0/0/90	$[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$	1.98	15.26
	55	100	3.9	90/45/- 45/90	$[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$	1.63	12.53
	55	100	3.9	60/-60/- 60/60	$[60^\circ/-60^\circ/-60^\circ/60^\circ]_s$	1.4	10.73
	55	100	3.9	90/0/45/- 60	$[90^\circ/0^\circ/45^\circ/- 60^\circ]_s$	1.56	11.98
	55	100	3.3	90/90	$[90^\circ/90^\circ]_s$	1.54	12.02
	55	100	4.4	90/90/90/90	$[90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$	2.45	15.82
	55	100	4.4	30/-30/- 30/30	$[30^\circ/-30^\circ/-30^\circ/30^\circ]_s$	2.1	13.56
	55	100	4.4	45/-45/- 45/45	$[45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$	2.07	13.4
	55	100	4.4	60/-60/- 60/60	$[60^\circ/-60^\circ/-60^\circ/60^\circ]_s$	2.2	14.25
	55	100	4.4	90/0/0/ 90	$[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$	3.45	22.17
	55	100	4.4	90/60/- 60/90	$[90^\circ/60^\circ/-60^\circ/90^\circ]_s$	2.16	13.95
	55	100	4.4	90/0/45/-60	$[90^\circ/0^\circ/45^\circ/-60^\circ]_s$	3.15	30.37
	55	100	4.4	45/-60-30/- 90	$[45^\circ/-60^\circ/-30^\circ/-90^\circ]_s$	1.83	11.84
<b>Ma et al. [90]</b>							
	38	60		30/90	$[\pm 30^\circ/90^\circ]_2$	1.67573	45.56
	38	60		90	$[90^\circ]_6$	1.20661	32.81

## Apéndice B. Influencia de la orientación de la fibra en estructuras de material compuesto

Autor (es)	Dimensiones		ID	Orientación de fibra	EA	SEA
	Diámetro mm	Longitud mm		Grados (°)	J	J/g
<b>Hu et al.</b> [4]	50	125	A	15	7308.8	72.5
	50	125	B	30	6725.4	72.2
	50	125	C	45	5052.9	56.3
	50	125	D	60	6155.8	68.8
	50	125	E	75	6365.7	66.8
<b>Yang et al.</b> [52]	40	80	F	0	1620	58.11
	60	80	G	0	2310	55.85
	80	80	H	0	2920	54.11
	40	80	I	0	2010	50.72
	60	80	J	0	3010	50.45
	80	80	K	0	3720	46.73
<b>Xu et al.</b> [16]	55	55	L	0		155.4
	55	55	M	5		162.4
	55	55	N	10		187.9
	55	55	Ñ	15		167.5
	55	55	O	20		162.4
	55	55	P	25		135.6
<b>Wang et al.</b> [48]	50	125	Q	15	7248	94.3
	50	125	R	30	5505.6	68.9
	50	125	S	45	5237.5	68.1
	50	125	T	60	4713	61.9
	50	125	U	75	4202.1	54.5
	50	125	V	45	2819.2	62.8
	50	125	W	45	5237.5	68.1
	50	125	X	45	7728.9	71.9
	50	125	Y	45	10292.3	73.1
	50	125	Z	45	11951.5	71.6

## Apéndice C. Configuración del apilado del laminado

Nomenclatura	ID	Apilado de la fibra	SEA kJ/kg
$[0^\circ/90^\circ]_4$	A	0 90 0 90 0 90 0 90	64.76
$[0^\circ/90^\circ]_6$	B	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	59.69
$[0^\circ/90^\circ]_8$	C	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	66.82
$[0^\circ/90^\circ]_4$	D	0 90 0 90 0 90 0 90	82.67
$[0^\circ/90^\circ]_6$	E	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	86.32
$[0^\circ/90^\circ]_8$	F	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	83.03
$[0^\circ/90^\circ]_4$	G	0 90 0 90 0 90 0 90	30.56
$[0^\circ/90^\circ]_6$	H	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	36.16
$[0^\circ/90^\circ]_8$	I	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	35.74
$[0^\circ/90^\circ]_4$	J	0 90 0 90 0 90 0 90	52.88
$[0^\circ/90^\circ]_6$	K	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	63.41
$[0^\circ/90^\circ]_8$	L	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	75.42
$[90^\circ/0^\circ]_4$	M	0 90 0 90 0 90 0 90	81.7
$[90^\circ/0^\circ]_6$	N	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	58
$[90^\circ/0^\circ]_6$	Ñ	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	45.6
$[0^\circ/90^\circ]_4$	O	0 90 0 90 0 90 0 90	6.5
$[0^\circ/90^\circ]_6$	P	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	13
$[0^\circ/90^\circ]_8$	Q	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	21.23
$[0^\circ/90^\circ]_{10}$	R	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	19.2
$[0^\circ/90^\circ]_2$	S	0 90 0 90	96.33
$[0^\circ/90^\circ]_2$	T	0 90 0 90	50.21
$[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_S$	U	90 0 0 90 90 0 0 90	15.26
$[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]_S$	V	90 0 0 90 90 0 0 90	22.17

## Apéndice D. Manufactura de las probetas de material compuesto

### a) Preparación de moldes con tubos de aluminio:

1. Tubos de aluminio de 25.4 cm (1") de diámetro y 355 mm de longitud (Ver Figura D.1) se cortaron para utilizarlos como moldes para construir los tubos de material compuesto.



**Figura D.1** Tubos de aluminio utilizados como moldes para el proceso de preimpregnado

2. Los tubos se lijan y limpian, como se muestra en la Figura D.2, para garantizar que no se tengan imperfecciones.



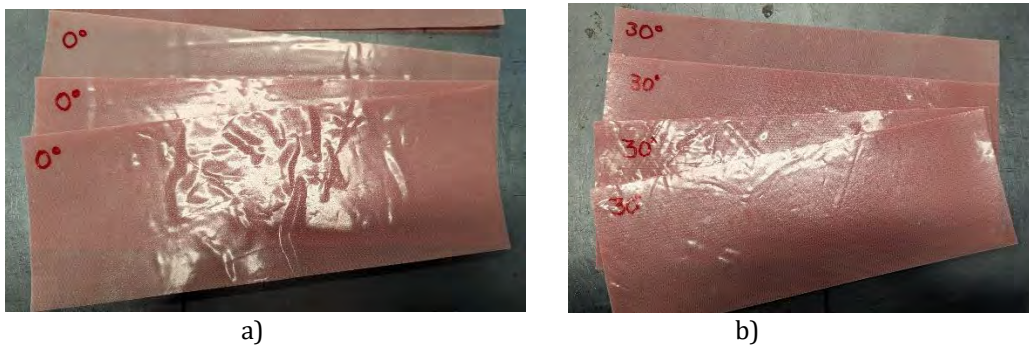
**Figura D.2** Proceso de lijado y limpieza de los moldes

### b) Configuración y corte de la fibra de vidrio preimpregnada:

1. En la siguiente etapa, se trabajó con láminas de fibra de vidrio prepreg, las cuales se cortaron en forma de rectángulos con dimensiones de 9.5 centímetros de ancho por 30 centímetros de largo (Ver Figura D.3). Es importante destacar que se realizaron cortes en diferentes ángulos, los cuales fueron previamente determinados según la matriz experimental diseñada para este proyecto, un ejemplo de estos cortes se muestra en la Figura D.4, con ángulos de 0° y 30°.



**Figura D.3** Proceso de corte de la fibra de vidrio prepreg: a) Marcación de la fibra para recortar , b) Corte de la fibra

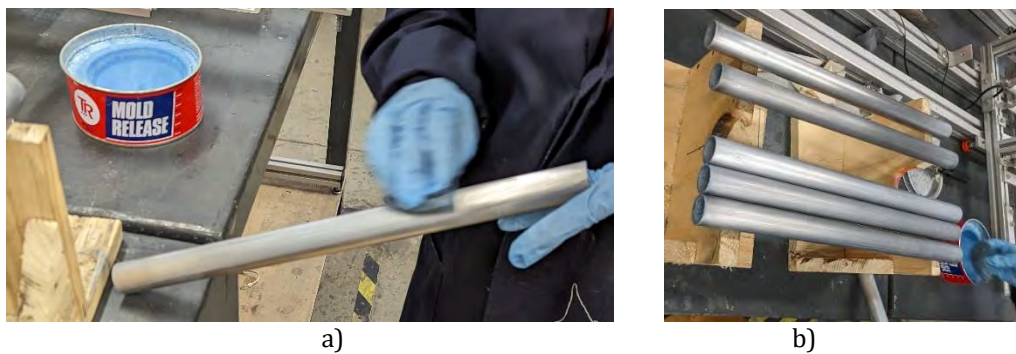


**Figura D.4** Cortes en diferentes ángulos: a) Orientación a 0°, b) Orientación a 30°

Se llevaron a cabo la fabricación de tubos de material compuesto reforzados con fibra de vidrio, cada uno con una longitud de 11 pulgadas, siguiendo las configuraciones especificadas en la matriz experimental. Estos tubos se produjeron con el propósito de obtener las probetas con las dimensiones anteriormente mencionadas.

### c) Proceso de manufactura para la parte experimental por medio de preimpregnado:

1. El proceso de preimpregnado se inicia mediante la aplicación de cinco capas de cera en los moldes (Ver Figura D.5a). El propósito de esta etapa es facilitar la extracción de los tubos una vez finalizado el proceso. Es esencial lograr una aplicación uniforme de la cera, puliendo cuidadosamente entre cada capa para obtener una superficie lo más lisa posible, como se muestra en la Figura D.5b.



**Figura D.5** Preparación de los moldes: a)Encerado, b)Tubos pulidos

2. Se aplican cuatro capas de líquido desmoldeante de resina sobre los moldes previamente encerados para asegurar una extracción más fácil de los tubos. En la Figura D.6 se ilustran el líquido y los tubos con el desmoldante.



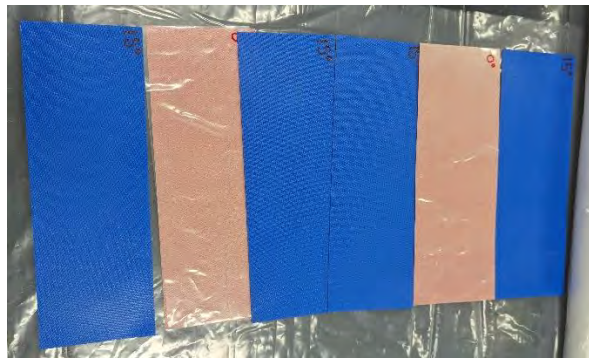
**Figura D.6** Aplicación del líquido desmontable: a)Líquido desmontable, b)Moldes con el líquido

3. La primera capa de fibra preimpregnada se enrolla de manera meticulosa alrededor del tubo de aluminio como se muestra en la Figura D.7, siguiendo la configuración del laminado previamente definida en la matriz experimental un ejemplo de estas secuencias de apilado se muestra en la Figura D.8, B15:  $[15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 15^\circ, 0^\circ, 15^\circ]$ .



**Figura D.7** Primer capa de fibra alrededor del molde





**Figura D.8** Configuración B15 con una secuencia de  $[15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 15^\circ, 0^\circ, 15^\circ]$ .

- Una vez que la primera capa está en su lugar, se marca el punto donde se ubicará el empalme de esta capa. Esto se hace para dividir el tubo en seis partes iguales, asegurando que los empalmes de las seis capas que componen el tubo de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer, por sus siglas en inglés) se distribuyan uniformemente alrededor del mismo, así como se observa en las Figura D.9 y Figura D.10. Esta medida garantiza que los empalmes queden distribuidos alrededor del todo el tubo y no solo en un punto, tratando de reducir las fallas posibles.



**Figura D.9** Marca en donde termina la primera capa de la fibra (1)



**Figura D.10** Marca de los seis puntos, distribución de los empalmes

- Se continúa enrollando las capas restantes de fibra de vidrio, respetando tanto la posición dentro de la distribución del tubo como la configuración del laminado especificada (Ver Figura D.11, Figura D.12 y Figura D.13).



**Figura D.11** Colocación de la tercera capa de la fibra, con una orientación de  $0^\circ$



**Figura D.12** Empalme en la capa 4 e inicio de colocación de la capa 5



**Figura D.13** Distribución de los empalmes al enrollar la fibra prepreg

6. Una vez que se han enrollado las seis capas de fibra en el molde, se coloca una tira de fibra preimpregnada de 7 mm de ancho en uno de los costados del laminado como se muestra en las Figura D.14 y Figura D.15, con el fin de ser un apoyo para la extracción del molde una vez que el tubo esté completamente curado.

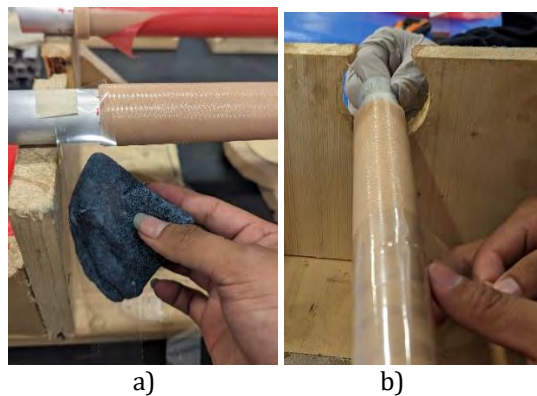


**Figura D.14** Colocación de la tira de 7mm en el costado del tubo laminado

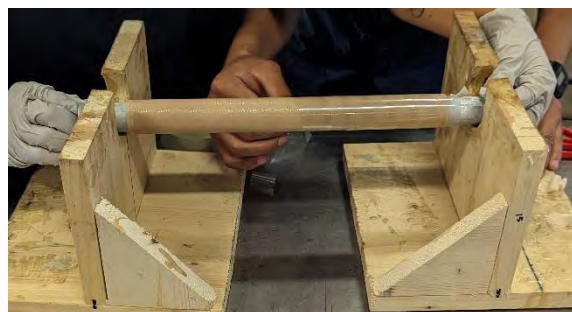


**Figura D.15** Tira de para facilitar la extracción del molde

7. El tubo se envuelve con cinta de poliéster cubierta con cera como se muestra en las Figura D.16 y Figura D.17, para evitar cualquier deformación del tubo de GFRP durante el proceso de curado.



**Figura D.16** Tubo cubierto de cinta de poliéster: a)Cinta cubierta con cera, b)Enrolado con cinta

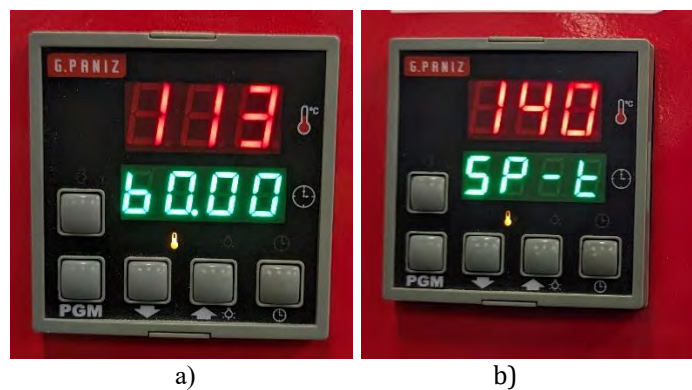


**Figura D.17** Enrollado del tubo con la conta poliéster (Vista frontal)

8. Los tubos preparados se introducen en un horno (Ver Figura D.18) precalentado a una temperatura de  $140^{\circ}\text{C}$  y se mantienen allí durante 60 minutos para que ocurra el proceso de curado, esta configuración se observa en la Figura D.19. Este paso es esencial para asegurar la consolidación de las capas de fibra y la activación adecuada de la resina, garantizando así la integridad estructural de los tubos de material compuesto.



**Figura D.18** Tubos en el horno: a) Colocación dentro del horno, b) Horno cerrado (precalentado)



**Figura D.19** Configuración del horno para curado de los tubos: a) Tiempo, b) Temperatura

9. Después de completar el tiempo de curado necesario, los tubos de material compuesto se retiran cuidadosamente del horno y se les permite enfriarse gradualmente a temperatura ambiente (Ver Figura D.20).



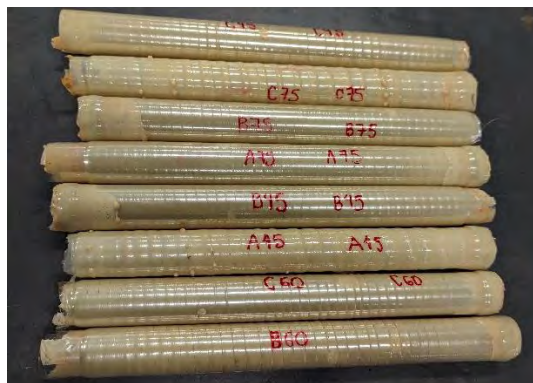
**Figura D.20** Enfriado de los tubos de GFRP: a) Horno abierto (Después de los 60min), b) Enfriamiento de los tubos

10. Una vez que los tubos están completamente fríos, como se muestra en la Figura D.21 se procede a retirar la cinta de poliéster que había sido aplicada alrededor de ellos para evitar deformaciones durante el proceso de curado.



**Figura D.21** Retiro del sobrante de la cinta de poliéster

11. Se extrae el molde de aluminio como resultado, queda solamente el tubo de material compuesto reforzado con fibra de vidrio como se observa en la Figura D.22, para ser cortado y obtener las probetas requeridas por cada configuración.



**Figura D.22** Tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio de diferentes configuraciones

#### **d) Corte de tubos de material compuesto para obtener las probetas:**

1. Los tubos de material compuesto reforzado con fibra de vidrio, se cortan como se observa en las Figura D. 23 y Figura D.24. La longitud de dos pulgadas, que es la longitud requerida para nuestras probetas. De cada tubo se obtuvieron cinco probetas, asegurando un uso eficiente de los recursos y la disponibilidad de múltiples muestras para los ensayos y análisis.

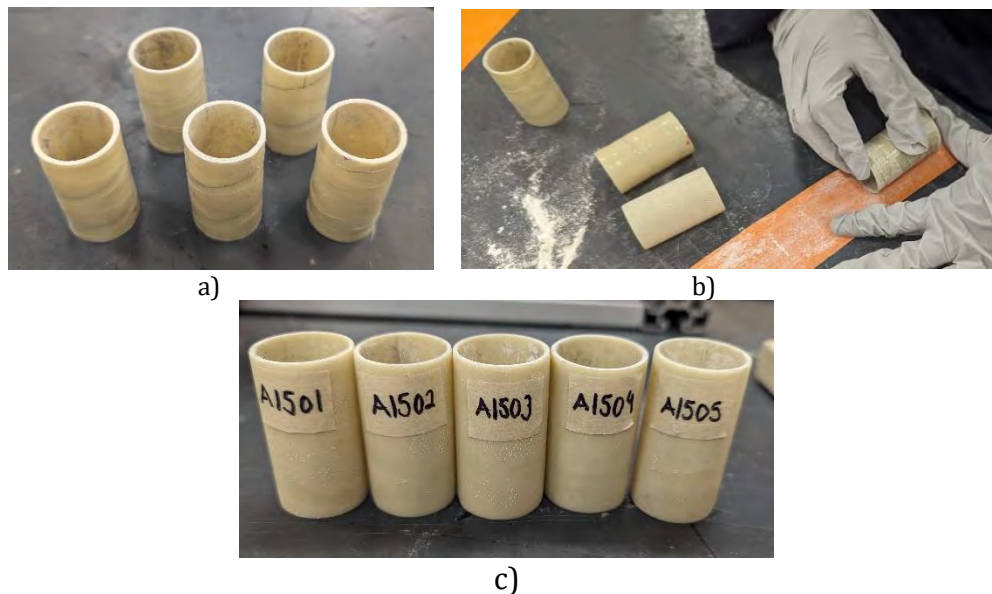


**Figura D. 23** Proceso de corte del tubo: a) Posición del tubo en la cortadora , b) Verificar antes de cortar



**Figura D.24** Corte de las probetas

2. Teniendo las cinco probetas como me muestra en la Figura D.25a, se realiza un proceso de lijado (Ver Figura D.25b) para garantizar que tengan una superficie exterior uniforme y libre de imperfecciones notables como se observa en la figura D25c. Esta fase es para asegurar que las propiedades mecánicas de las probetas sean consistentes y que los resultados de los ensayos sean confiables.



**Figura D.25** Lijado de las probetas: a) Probetas no lijadas, b) Proceso de lijado de las probetas, c) Probetas lijadas

3. Las probetas se someten a un proceso de limpieza utilizando alcohol (Ver Figura D.26). Esto se hace para eliminar cualquier contaminante superficial que pueda afectar los resultados de las pruebas. Además, se asigna a cada probeta una identificación específica con una nomenclatura definida como se muestra en la Figura D.27. Esto facilita la trazabilidad y la asociación de los resultados de las pruebas con cada muestra.



Figura D.26 Limpieza de las probetas



a)



b)

Figura D.27 Ejemplo de la nomenclatura utilizada en orientaciones de a) 15° y b) 30°

## Apéndice E. Selección de las probetas para el desarrollo del modelo empírico

El proceso de selección se llevó a cabo para cada conjunto de probetas con diversas configuraciones. De las cinco muestras obtenidas de cada conjunto, se optó por seleccionar tres para su uso en el desarrollo de un modelo empírico destinado a determinar la capacidad de absorción de energía específica.

La selección se realizó siguiendo los siguientes pasos: inicialmente, se generaron gráficos que representaban los datos de las cinco probetas (Figura E.1) para observar y analizar el comportamiento individual de cada una. Posteriormente, se registraron las mediciones correspondientes a la fuerza máxima, EA y SEA, tal como se muestra en la Tabla E.1. Este registro sirvió para identificar las probetas que se encontraban fuera de los rangos deseados para el análisis de datos y el posterior desarrollo del modelo empírico.

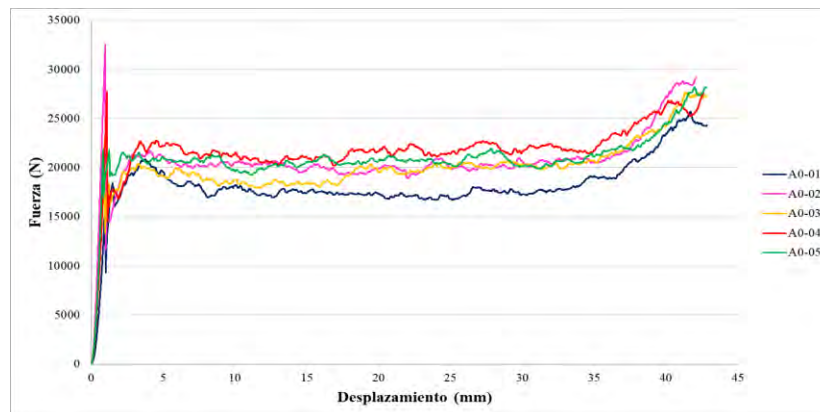


Figura E.1 Gráfica fuerza-desplazamiento A00

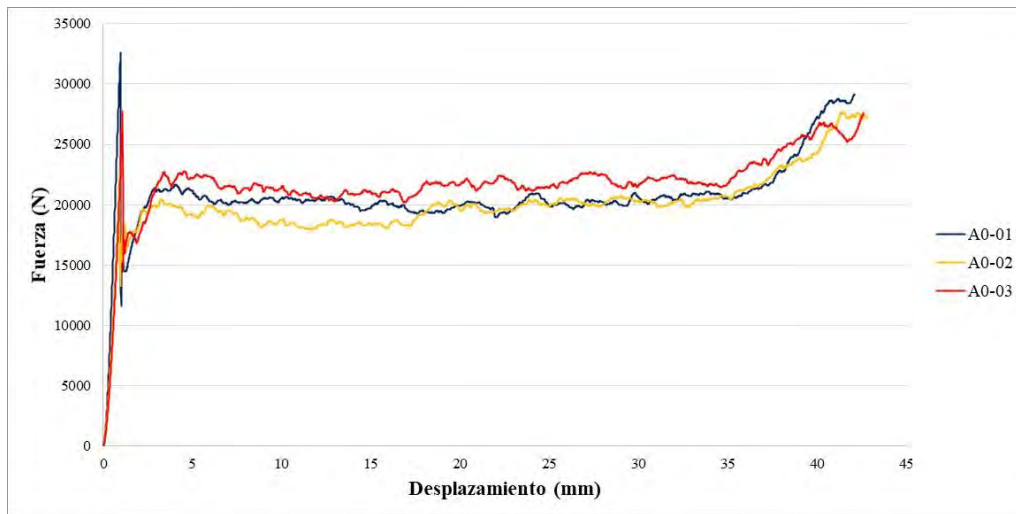
Tabla E.1 Datos registrados de los ensayos en las probetas A00  
Dimensiones

Probeta	Diámetro exterior (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Masa (kg)	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento (mm)	EA (J)	SEA (kJ/kg)
A0-01	28.74	50.03	1.54	0.0115	20862.50	3.84	779.89	68.11
A0-02	28.96	49.35	1.60	0.01205	32578.13	1.43	870.59	72.25
A0-03	28.78	50.88	1.57	0.01204	22803.13	1.14	856.79	71.16
A0-04	29.16	50	1.59	0.01252	27753.13	1.50	925.96	73.96
A0-05	28.67	51.12	1.61	0.01246	21853.13	1.48	896.02	71.91



La selección de las tres muestras se basó en criterios específicos. Se eligieron aquellas que mostraron una mayor similitud entre sí en cuanto a comportamiento de deformación, además de mantener dimensiones dentro de un rango deseable (Figura E.2). Estas muestras seleccionadas presentaron un comportamiento similar, lo cual garantiza una consistencia adecuada para llevar a cabo el análisis requerido.

En este caso, se han seleccionado las probetas identificadas en la Tabla E.1: A0-02, A0-03 y A0-04. Estas muestras fueron escogidas debido a su notable similitud observada en los gráficos, así como a la gran semejanza en los datos de SEA, además de mantener dimensiones muy similares entre sí.



**Figura E.2** Probetas seleccionada en la configuración A00

Las probetas fueron renombradas con el objetivo de mejorar el análisis. Las disparidades entre las probetas se deben a diversas circunstancias. Aquellas muestras que mostraron notables diferencias estaban ubicadas en los extremos del tubo fabricado, donde durante el proceso se perdió resina. Esta pérdida de resina, producto del lijado, resultó en una disminución del diámetro, lo cual afectó los cálculos de EA y SEA, generando las discrepancias observadas. En la Tabla E.2 se muestra la selección de las probetas y en la Tabla E.3 se observan los datos finales.

Tabla E.2 Datos con las cinco muestras de cada configuración

Orientación de la fibra ( $\theta$ )	Nomenclatura	Probeta	Fuerza máxima (N)	EA (J)	SEA (kJ/kg)
<b>A0</b>	[0°/0°/0°]s	A0-01	20862.500	779.887	68.112
		A0-02	32578.130	870.592	72.248
		A0-03	22803.130	856.790	71.162
		A0-04	27753.130	925.963	73.959
		A0-05	21853.130	896.025	71.912
<b>A15</b>	[0°/15°/15°]s	A15-01	25468.750	879.334	69.458
		A15-02	32271.870	839.006	67.596
		A15-03	29681.250	683.372	52.571
		A15-04	24978.130	952.799	71.964
		A15-05	25531.250	910.208	69.434
<b>B15</b>	[15°/0°/15°]s	B15-01	22818.750	858.729	67.510
		B15-02	27959.380	927.830	67.973
		B15-03	19734.380	870.529	66.707
		B15-04	18078.130	833.563	69.522
		B15-05	35890.630	899.185	67.812
<b>C15</b>	[15°/15°/0°]s	C15-01	19962.500	816.078	67.556
		C15-02	28134.380	960.730	72.127
		C15-03	33850.000	926.403	69.238
		C15-04	21978.130	883.524	69.350
		C15-05	18290.630	672.840	52.813
<b>A30</b>	[0°/30°/30°]s	A30-01	22456.250	564.813	47.583
		A30-02	23606.250	855.913	67.930
		A30-03	22687.500	851.950	66.351
		A30-04	28743.750	886.541	66.909
		A30-05	17543.750	791.861	65.988
<b>B30</b>	[30°/0°/30°]s	B30-01	22700.000	803.411	63.102
		B30-02	25890.630	485.800	37.124
		B30-03	21753.130	786.403	65.973
		B30-04	20671.880	854.684	69.379
		B30-05	19903.130	813.695	62.994
<b>C30</b>	[30°/30°/0°]s	C30-01	16125.000	816.668	67.215
		C30-02	21928.130	778.238	60.375

		C30-03	26343.750	851.255	63.717
		C30-04	21759.380	788.232	63.618
		C30-05	15865.630	667.130	56.489
		A45-01	19865.630	449.720	38.669
		A45-02	14268.750	438.109	38.532
<b>A45</b>	[0°/45°/45°]s	A45-03	22184.380	713.562	56.812
		A45-04	19315.630	551.527	44.264
		A45-05	21253.130	703.054	61.671
		B45-01	28859.380	781.229	65.871
		B45-02	19403.130	765.795	66.999
<b>B45</b>	[45°/0°/45°]s	B45-03	20715.630	819.810	67.641
		B45-04	23362.500	753.441	66.149
		B45-05	20037.500	823.534	65.830
		C45-01	31393.750	777.121	63.698
		C45-02	30209.380	759.742	62.893
<b>C45</b>	[45°/45°/0°]s	C45-03	19253.130	696.175	64.700
		C45-04	23862.500	712.156	66.063
		C45-05	22381.250	803.448	64.951

**Tabla E.3** Datos finales para el desarrollo del modelo empírico

Orientación de la fibra ( $\theta$ )	Nomenclatura	Probeta	Fuerza máxima (N)	EA (J)	SEA (kJ/kg)
<b>A0</b>	[0°/0°/0°]s	A0-01	32578.130	870.592	72.248
		A0-02	22803.130	856.790	71.162
		A0-03	27753.130	925.963	73.959
<b>A15</b>	[0°/15°/15°]s	A15-01	25468.750	879.334	69.458
		A15-02	24978.130	952.799	71.964
		A15-03	25531.250	910.208	69.434
<b>B15</b>	[15°/0°/15°]s	B15-01	22818.750	858.729	67.510
		B15-02	27959.380	927.830	67.973
		B15-03	19734.380	870.529	66.707
<b>C15</b>	[15°/15°/0°]s	C15-01	19962.500	816.074	67.556
		C15-02	28134.380	960.730	72.127
		C15-03	21978.130	883.524	69.350
<b>A30</b>	[0°/30°/30°]s	A30-01	22456.250	805.099	67.826
		A30-02	23606.250	855.913	67.930
		A30-03	22687.500	851.950	66.351

---

<b>B30</b>	[30°/0°/30°]s	B30-01	22700.000	803.411	63.102
		B30-02	21753.130	786.403	65.973
		B30-03	19903.130	813.695	62.994
<b>C30</b>	[30°/30°/0°]s	C30-01	16125.000	816.668	67.215
		C30-02	21928.130	778.238	60.375
		C30-03	21759.380	788.232	63.618
<b>A45</b>	[0°/45°/45°]s	A45-01	19865.630	449.720	38.669
		A45-02	14268.750	438.109	38.532
		A45-03	19315.630	551.527	44.264
<b>B45</b>	[45°/0°/45°]s	B45-01	20715.630	819.810	67.641
		B45-02	23362.500	753.441	66.149
		B45-03	20037.500	823.534	65.830
<b>C45</b>	[45°/45°/0°]s	C45-01	19253.130	696.175	64.700
		C45-02	23862.500	712.156	66.063
		C45-03	22381.250	803.448	64.951

---

**Apéndice F. Programa de los modelos  $SEA_{Fase1}$ ,  $SEA_{Fase2}$  y  $SEA_{Fase1y2}$** 

En las Figura F1 se muestra el código en MATLAB, que realiza el análisis de regresión lineal múltiple, entre las variables independientes ( $S_a$  y  $\theta$ ) y la variable de salida SEA, el código fue el mismo para cada modelo. El desglose del programa es el siguiente:

**Definición de datos:**

- $S_a$ : Vector que contiene los valores de la variable independiente  $S_a$  (Secuencia de apilado).
- $\theta$ : Vector que contiene los valores de la variable independiente  $\theta$  (Orientación de la fibra)
- $SEA$ : Vector que contiene los valores de la variable dependiente SEA.

**Creación de la matriz de diseño:**

- Se crea una matriz X que contiene los valores de las variables independientes, así como términos cuadráticos y de interacción entre las variables.

**Ajuste del modelo de regresión lineal:**

- Utilizando la función *fitlm*, se ajusta un modelo de regresión lineal a los datos. Este modelo intenta encontrar la mejor relación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente.

**Mostrar los coeficientes del modelo:**

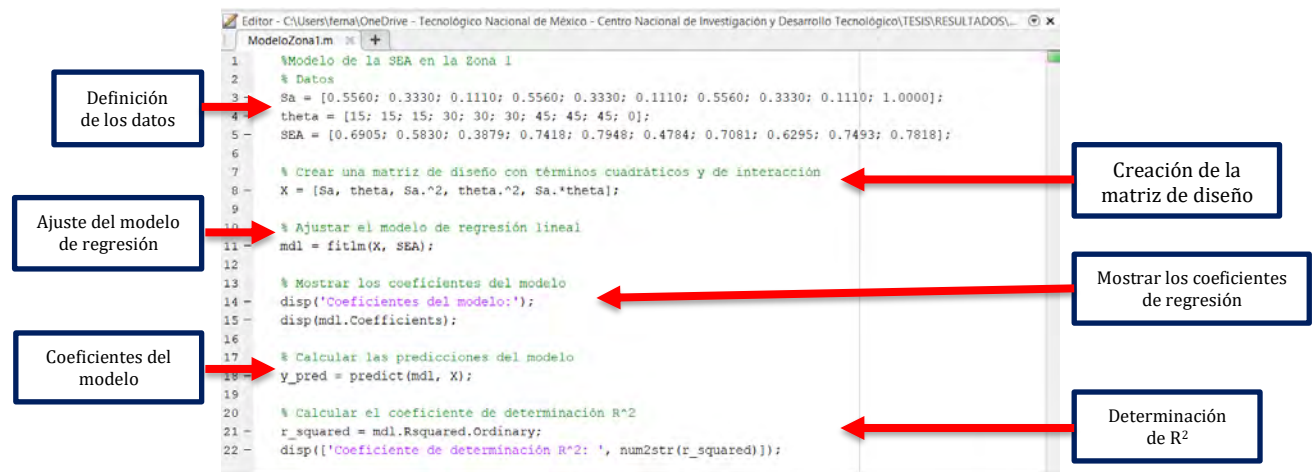
- Se muestran los coeficientes calculados por el modelo. Estos coeficientes representan las pendientes y el término independiente de la ecuación de regresión.

**Calcular las predicciones del modelo:**

- Se utilizan los coeficientes del modelo ajustado para predecir los valores de la variable dependiente utilizando los valores de las variables independientes.

**Calcular el coeficiente de determinación  $R^2$ :**

- Se calcula el coeficiente de determinación  $R^2$ , que es una medida de cuánto de la variabilidad en la variable dependiente es explicada por el modelo de regresión. Se muestra este valor después del cálculo.



The image shows a MATLAB script editor window titled 'ModeloZona1.m'. The code defines data, creates a design matrix, fits a linear regression model, displays coefficients, and calculates the coefficient of determination  $R^2$ . Red arrows point from text boxes to specific lines of code.

```
1 %Modelo de la SEA en la Zona 1
2 % Datos
3 Sa = [0.5560; 0.3330; 0.1110; 0.5560; 0.3330; 0.1110; 0.5560; 0.3330; 0.1110; 1.0000];
4 theta = [15; 15; 15; 30; 30; 30; 45; 45; 45; 0];
5 SEA = [0.6905; 0.5830; 0.3879; 0.7418; 0.7948; 0.4784; 0.7081; 0.6295; 0.7493; 0.7818];
6
7 % Crear una matriz de diseño con términos cuadráticos y de interacción
8 X = [Sa, theta, Sa.^2, theta.^2, Sa.*theta];
9
10 % Ajustar el modelo de regresión lineal
11 mdl = fitlm(X, SEA);
12
13 % Mostrar los coeficientes del modelo
14 disp('Coeficientes del modelo:');
15 disp(mdl.Coefficients);
16
17 % Calcular las predicciones del modelo
18 y_pred = predict(mdl, X);
19
20 % Calcular el coeficiente de determinación R^2
21 r_squared = mdl.Rsquared.Ordinary;
22 disp(['Coeficiente de determinación R^2: ', num2str(r_squared)]);
```

Annotations:

- Definición de los datos (lines 3-5)
- Ajuste del modelo de regresión (line 11)
- Coeficientes del modelo (line 15)
- Creación de la matriz de diseño (line 8)
- Mostrar los coeficientes de regresión (line 15)
- Determinación de  $R^2$  (line 21)

Figura F1 Código del modelo para SEA<sub>Fase1</sub>