



Artículo de revisión

Revisión comparativa de la capacidad de absorción de energía mecánica de estructuras tubulares compuestas

Comparative review of the mechanical energy absorption capacity of composite tubular structures

Fernanda De Jesús-Ramírez¹ , Arturo Abúndez-Pliego¹ , Enrique Alcudia-Zacarías² , Juan Antonio Paz González² , Salomón Blanco-Figueroa¹ 

¹Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Int. Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62490.

²Universidad Autónoma de Baja California / Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Blvd. Universitario #1000. Unidad Valle de las Palmas. Tijuana, Baja California, México. C.P. 21500

Autor de correspondencia: Fernanda De Jesús-Ramírez, Tecnológico Nacional de México / CENIDET. Int. Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62490. Correo-e: m22ce071@cenidet.tecnm.mx, ORCID: 0009-0004-0189-156X.

Recibido: 26 de Enero del 2024

Aceptado: 5 de Marzo del 2024

Publicado: 19 de Marzo 2024

Resumen. - En esta investigación se presenta el análisis y comparación de los resultados reportados en la literatura de 1987 al 2023 relacionados con la capacidad de absorción de energía específica de columnas tubulares de materiales compuestos, los cuales se clasificaron en tres categorías: a) laminados con fibras en orientación de $[0,90]$, b) laminados con fibras unidireccionales, y 3) laminados con laminados multidireccionales. Se examinó la absorción de energía específica (SEA) y se realizaron comparaciones entre los estudios. Los resultados exhibieron una amplia dispersión en los datos, incluso para configuraciones aparentemente similares. Las diferencias se atribuyen a factores como dimensiones de probetas, materiales utilizados y técnicas de ensayo. Además, se observó la falta de normativas estandarizadas, lo que dificulta la comparación y la identificación de patrones consistentes. Se concluye que la implementación de estándares unificados mejoraría la coherencia y comparabilidad de los resultados, proporcionando una comprensión más profunda de estos materiales en aplicaciones futuras.

Palabras clave: Configuraciones de laminado; Orientación de la fibra; Materiales compuestos; Comparación de datos; Normativas; Estándares.

Abstract. - In this work, the analysis and comparison of results reported in the literature from 1987 to 2023 related to the specific energy absorption capacity of tubular columns of composite materials is presented. These materials were classified into three categories: a) Laminates with fibers in $[0,90]$ orientation, b) Laminates with unidirectional fibers, and c) Laminates with multidirectional fibers. Specific energy absorption (SEA) was examined, and comparisons were made among the studies. The results exhibited a wide data scattering, even for quite similar configurations. Differences are attributed to factors such as specimen dimensions, constituent materials, and testing techniques. Additionally, a lack of standardized regulations was observed, hindering the comparison and identification of consistent patterns. It is concluded that the implementation of unified standards would enhance the coherence and comparability of results, providing a deeper understanding of these materials for future applications.

Keywords: Laminate configurations; Fiber orientation; Composite materials; Data comparison; Regulations; Standards.



1. Introducción

En la actualidad, los materiales compuestos se reconocen como una alternativa a los materiales convencionales debido a su versatilidad en diseño y su destacado comportamiento en términos de propiedades mecánicas. Esta versatilidad ha permitido una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias [1-8]. Entre estas aplicaciones se destacan las estructuras compuestas tubulares debido a su destacada capacidad de absorción de energía en comparación con los materiales tradicionales, especialmente en sectores industriales como la industria automotriz y aeronáutica [9-12].

Investigaciones previas, tales como las realizadas por Schmueser *et al.* [13] y Arias Maya *et al.* [14], han demostrado que las estructuras metálicas absorben la energía a través de una deformación plástica, mientras que los materiales compuestos lo hacen mediante un colapso progresivo, lo que resulta en una absorción de energía más eficiente. Específicamente, los compuestos de plástico reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés) han demostrado una capacidad excepcional de absorción de energía en comparación con las estructuras metálicas convencionales [15-18]; sin embargo, el desempeño de las estructuras de compuestos para la absorción de energía está influenciada por una amplia variedad de factores, los cuales pueden agruparse en varias categorías que incluyen: a) los tipos de materiales compuestos y sus propiedades, b) las condiciones de fabricación, c) la geometría y d) las dimensiones de los componentes estructurales, así como e) las condiciones de ensayo [1, 19-23]. Investigadores tales como Ramakrishna [24] y Carruthers *et al.* [25] han identificado diferencias significativas en el comportamiento y las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, y encontraron que la disipación de energía durante el colapso

progresivo de las estructuras compuestas no sólo depende de las propiedades del material, sino también de factores tales como las fracciones de volumen de la fibra y la matriz, el orden de apilamiento [26, 27], la orientación de la fibra [28, 29], el mecanismo desencadenante de la falla [9, 23, 30], la forma y geometría [9, 31-33], y en algunos casos, el modo de falla [21, 34, 35].

Actualmente, las investigaciones se centran en la caracterización experimental de tubos con fibras de carbono y vidrio [18, 36-41], las cuales están enfocadas en evaluar el efecto de la orientación de las fibras y la secuencia de apilado sobre la capacidad de absorción de energía. Sin embargo, la heterogeneidad de las metodologías experimentales lleva a una alta dispersión de los resultados, aun cuando éstos se normalicen con respecto a la masa de las probetas, lo cual impide una comparación objetiva y complica la selección de la configuración adecuada de una estructura de material compuesto, por parte de un ingeniero de diseño, para alguna aplicación específica. Además, en el campo de la investigación, la diversidad de resultados experimentales para configuraciones similares impide la identificación de posibles tendencias o similitudes entre los diferentes estudios en relación con la capacidad de absorción de energía.

Por lo tanto, en este estudio se llevó a cabo un análisis sistemático de resultados experimentales de la capacidad de absorción de energía de estructuras tubulares de material compuesto para tres casos. Inicialmente, se examinaron laminados con fibras orientadas a $[0,90]$, considerando distinta cantidad de láminas. Los resultados exhibieron una alta dispersión sobre la absorción específica de energía (SEA), incluso en configuraciones aparentemente similares. En el segundo caso, se analizaron laminados unidireccionales. Los resultados demostraron la



sensibilidad de la absorción específica de energía a las orientaciones de las fibras, proporcionando información sobre la compleja interacción de los parámetros de diseño en estas características. Por último, la exploración de laminados multidireccionales reveló diferencias en la absorción específica de energía de acuerdo con la orientación de las fibras. Las variaciones notables en los resultados, incluso dentro de la misma configuración de laminados, resaltaron la importancia de metodologías experimentales uniformes.

La comparación entre las distintas mediciones reportadas en la literatura exhibe la estrecha relación entre los parámetros de diseño de los materiales compuestos y su desempeño sobre la absorción de energía específica en estructuras tubulares, pero además, de la influencia de parámetros como las dimensiones y las condiciones de ensayo. Las variaciones identificadas en los resultados enfatizan la necesidad crítica de procedimientos de prueba estandarizados para permitir comparaciones

significativas e identificación de tendencias, lo cuales mejorarían no sólo la coherencia y comparabilidad de los resultados de investigación, sino también contribuirían a avanzar en la aplicación de estos materiales en industrias críticas.

2. Capacidad de absorción de energía de estructuras tubulares reportadas en la literatura

Los trabajos publicados en la literatura seleccionados para este estudio fueron aquellos que reportaron resultados experimentales sobre la capacidad de absorción de energía de estructuras tubulares cilíndricas de materiales compuestos. Esta selección se fundamentó en la documentación existente que sostiene que la geometría cilíndrica es reconocida por su mayor capacidad de absorción de energía en comparación con otras formas [9, 33, 36, 42-44]. La evaluación de los datos se realizó mediante un proceso sistemático, cuya representación gráfica se presenta en la Figura 1:

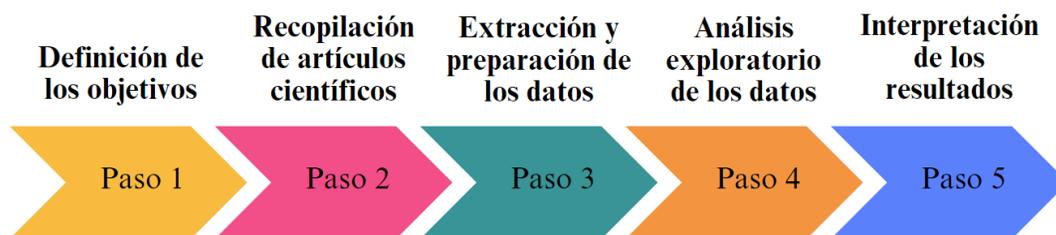


Figura 1. Proceso sistemático para el análisis de los resultados reportados en la literatura.

El propósito de este estudio consiste en examinar y comparar la absorción de energía específica (SEA, por sus siglas en inglés) de estructuras tubulares de material compuesto con distintas configuraciones de secuencia de apilado y orientaciones de fibras, con el fin de comparar cómo estas variables de diseño influyen en el cálculo de la absorción de energía específica. Los datos obtenidos de la literatura se clasificaron en

función de las dimensiones (diámetro, longitud y masa), la absorción de energía (EA), la absorción específica de energía (SEA) y la configuración de laminado correspondiente a cada ensayo reportada en la literatura revisada.

Los datos recopilados se dividieron en tres casos específicos para su análisis: a) laminados con fibras orientadas en $[0,90]$, b) laminados



unidireccionales, y c) laminados multidireccionales. Los datos de cada caso fueron procesados y presentados en tablas y gráficas para identificar patrones, correlaciones y diferencias entre las diversas configuraciones de las fibras.

2.1 Absorción de energía específica

En esta investigación, la absorción de energía (EA, absorción total de energía) se calcula a través de la medición del área bajo la curva experimental carga-desplazamiento típica [16, 23, 24, 36, 43-48], obtenida de un ensayo de compresión sobre un espécimen de tubo compuesto. Matemáticamente, la EA se puede calcular usando la ecuación 1:

$$EA = \int_0^d F(x)dx \quad (1)$$

Donde $F(x)$ es la fuerza de aplastamiento y d es el desplazamiento final de aplastamiento.

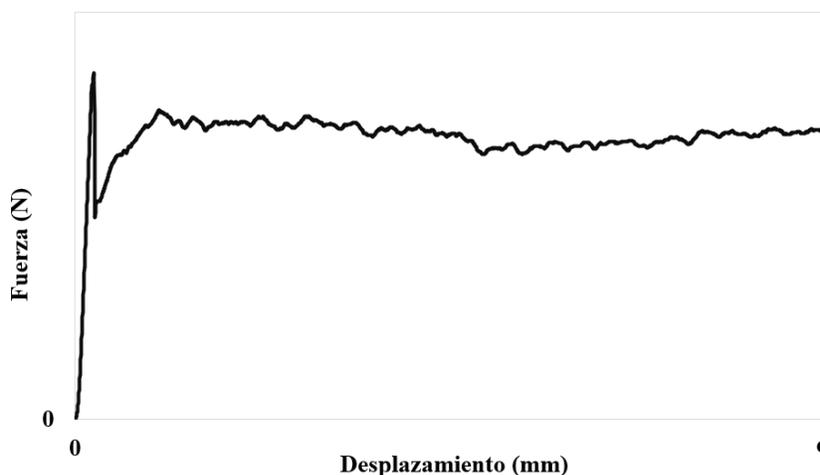


Figura 2. Curva típica de carga-desplazamiento de un tubo de material compuesto.

2.2 Caso I: Laminados con fibras en orientación de [0,90]

La elección estructuras tubulares de materiales compuestos con fibras orientadas en [0,90] es una práctica común en la literatura científica [16, 22, 37, 45-47], a causa de su excelente capacidad

La absorción de energía específica (SEA, absorción de energía por unidad de masa del material), se calcula mediante la ecuación 2:

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2)$$

Donde m es la masa de la estructura en kg, kJ/kg son las unidades de SEA

En la Figura 2. Curva típica de carga-desplazamiento de un tubo de material compuesto. En este caso, se trata de un tubo fabricado con preimpregnado de fibra de vidrio (CYCOM 919), con dimensiones de 54.8 mm de longitud y 25.4 mm de diámetro, el cual fue sometido a ensayos de compresión.

para disipar energía y sus destacadas propiedades mecánicas. Esta configuración se prefiere especialmente en aplicaciones donde las fuerzas dominantes actúan en la dirección de las fibras, basándose en su eficiente manejo de cargas axiales, lo cual confiere un valor significativo a la resistencia y la capacidad de absorción de



energía, especialmente en situaciones donde la compresión desempeña un papel crucial.

Esta configuración permite aprovechar la alta resistencia a la tracción de las fibras orientadas en el eje longitudinal (0°), combinada con la capacidad de resistir cargas transversales proporcionada por las fibras dispuestas en la orientación perpendicular (90°).

En la Tabla 1 se presentan los resultados experimentales de cuatro estudios en donde se

detallan las dimensiones y materiales utilizados [16, 36, 46-49].

Los estudios se centraron en analizar la capacidad de absorción de energía en la configuración [0,90], es decir, la misma orientación de las fibras, y apilamientos que van desde 2 hasta 10 láminas en cada probeta, además se etiquetaron respecto a la Tabla 4 en donde los datos se acomodaron de acuerdo al número de láminas.

Tabla 1. Resumen de datos sobre la absorción de energía en la configuración [0,90].

Autor	Materiales		Dimensiones		Secuencia de apilado	SEA kJ/kg	Etiqueta
	Refuerzo	Matriz	Diámetro mm	Longitud mm			
Zhu et al. [16]	CFRP	Epoxi	52.12	200	[0/90] ₄	64.76	A ₃
	CFRP	Epoxi	47.7	200	[0/90] ₄	82.67	A ₄
	CFRP	Epoxi	53.49	200	[0/90] ₆	59.69	A ₆
	CFRP	Epoxi	47.72	200	[0/90] ₆	86.32	A ₇
	CFRP	Epoxi	54.48	200	[0/90] ₈	66.82	A ₁₀
	CFRP	Epoxi	47.71	200	[0/90] ₈	83.03	A ₁₁
Jiang et al. [49]	CFRP	Epoxi	50	100	[0/90] ₂	96.33	A ₁
Sulaiman et al. [36]	GFRP	Epoxi	90	100	[0/90] ₄	6.5	A ₂
	GFRP	Epoxi	90	100	[0/90] ₆	13	A ₅
	GFRP	Epoxi	90	100	[0/90] ₈	21.23	A ₉
	GFRP	Epoxi	90	100	[0/90] ₁₀	19.2	A ₁₂
Mahdi et al. [46]	GFRP	Epoxi		120	[0/90] ₂	11.99	A ₈

En la Figura 3 se ilustra cómo se estructuran los tubos en las configuraciones [0,90]₂ y [0,90]₄.

En este contexto, los aros de color amarillo representan las láminas con fibras a 0°, mientras que los de color azul indican láminas con una orientación de 90° respecto a la dirección longitudinal del tubo.

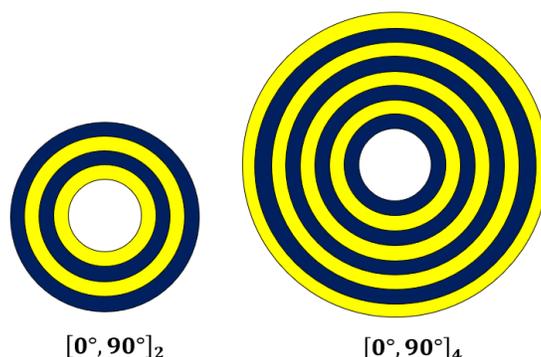


Figura 3 Ilustración de las configuraciones de tubos compuestos $[0,90]_2$ y $[0,90]_4$.

2.3 Caso II: Laminados unidireccionales

En esta sección se aborda el análisis de estructuras tubulares diseñadas con orientaciones de fibras unidireccionales. En este caso se analiza cómo la orientación de las fibras influye la capacidad de la estructura para resistir y absorber energía en direcciones particulares, un aspecto crítico en aplicaciones donde la resistencia bajo carga juega un papel determinante.

Los datos recopilados abarcan orientaciones desde 0° hasta 75° , con incrementos de 5° , y se han organizado en configuraciones que varían desde 2 hasta 28 laminados en cada tubo. En la Figura 4 se muestran algunas representaciones de las configuraciones $[5]_2$, $[10]_2$ y $[0]_8$, donde cada aro representa una lámina y el color indica que los laminados consisten de láminas con refuerzos orientados en la misma dirección. Esta representación visual tiene como finalidad clarificar la disposición de los laminados en las muestras mencionadas en la Tabla 1.

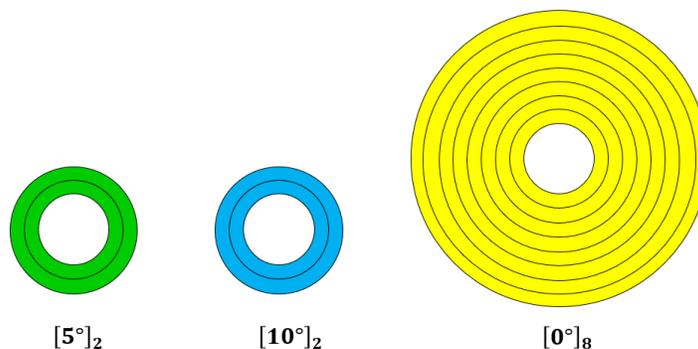


Figura 4 Ejemplificación de las configuraciones de laminado $[5]_2$, $[10]_2$ y $[0]_8$.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los materiales, las dimensiones, la configuración de laminado, y la capacidad de absorción de energía de laminados unidireccionales de tres trabajos reportados en la literatura [24, 45, 48], demás que se etiquetan respecto a la .



Tabla 5. En estos experimentos, se ha puesto especial énfasis en la comprensión y medición de la capacidad de las estructuras tubulares para

absorber, centrándose en las distintas orientaciones de fibras.

Tabla 2. Resumen de datos sobre la absorción de energía en una sola dirección.

Autor	Materiales		Dimensiones		Secuencia de apilado	SEA kJ/kg	Etiqueta
	Refuerzo	Matriz	Diámetro mm	Longitud mm			
Yang et al. [45]	CFRP	Epoxi 6508	40	80	[0] ₈	58.11	B ₆
	CFRP	Epoxi 6508	60	80	[0] ₈	55.85	B ₅
	CFRP	Epoxi 6508	80	80	[0] ₈	54.11	B ₄
Ramakrishna [24]	CFRP	Epoxi	50	100	[5] ₂	205.3	B ₇
	CFRP	Epoxi	50	100	[10] ₂	225.3	B ₈
	CFRP	Epoxi	50	100	[15] ₂	226	B ₁₀
	CFRP	Epoxi	50	100	[20] ₂	202.3	B ₁₁
	CFRP	Epoxi	50	100	[25] ₂	181.1	B ₁₂
Berndt et al. [48]	CFRP	Epoxi	42	100	[15] ₈	65.4	B ₉
	CFRP	Epoxi	42	100	[30] ₈	61.2	B ₁₃
	CFRP	Epoxi	42	100	[45] ₈	49.8	B ₁₄
	CFRP	Epoxi	42	100	[60] ₈	53.3	B ₁₅
	CFRP	Epoxi	42	100	[75] ₈	49.2	B ₁₆
Yang et al. [45]	GFRP	Epoxi 6508	40	80	[0] ₈	50.72	B ₃
	GFRP	Epoxi 6508	60	80	[0] ₈	50.45	B ₂
	GFRP	Epoxi 6508	80	80	[0] ₈	46.73	B ₁

2.4 Caso III: Laminados multidireccionales

El análisis de laminados con diferentes orientaciones se convierte en un factor crítico para comprender de manera general el comportamiento de los materiales compuestos bajo cargas de compresión.

La importancia de considerar laminados con distintas orientaciones radica en la posibilidad de mejorar la eficiencia y rendimiento del comportamiento mecánico de los materiales compuestos en términos de resistencia y absorción de energía. Al explorar configuraciones menos convencionales, se pueden descubrir patrones de comportamiento

que no serían evidentes en laminados convencionales. Este conocimiento sobre la interacción de las fibras en múltiples ángulos proporciona una base sólida para el diseño de materiales compuestos adaptados a requisitos específicos de aplicaciones de ingeniería. En la Figura 5 se muestran esquemas de algunas de las configuraciones utilizadas para el análisis de datos, en las cuales cada aro representa una lámina y cada color, la orientación. Se representan la configuración [30, -30, 90]₂, donde el color amarillo denota laminados a 30°, el color verde a -30° y el color azul a 90°. Asimismo, se ilustran [45, -45, 90]₂, en donde el color morado indica laminados de 45°, el color naranja de -45° y el color azul 90°.



Adicionalmente, se presenta la configuración $[60, -60, 90]_2$, destacando el color rojo para

laminas a 60° , el color gris a -60° y el color azul a 90° .

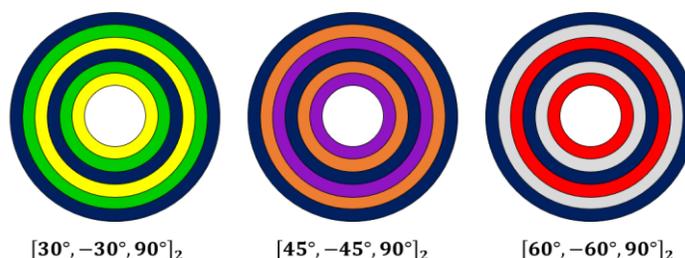


Figura 5 Ilustración de los tubos compuestos con configuraciones $[30, -30, 90]_2$, $[45, -45, 90]_2$ y $[60, -60, 90]_2$.

En la

Tabla 3 se resumen los datos seleccionados de tres estudios experimentales reportados por Jishi et al. [43], Mahdi et al. [46] y Cui et al. [47] quienes se enfocaron en la evaluación del efecto de las configuraciones y orientaciones de fibra sobre la absorción de energía específica en estructuras tubulares de materiales compuestos. También se presenta un concentrado de las dimensiones de las muestras seleccionadas para el estudio y se etiquetan de acuerdo a la .

Tabla 6. Esta diversidad de laminados resalta la complicación en el diseño de materiales compuestos y la importancia de considerar cada configuración como única, ya que cada apilado

puede tener un comportamiento distinto en la capacidad de absorción de energía debido a la interacción compleja de los mecanismos de daño afectados por la orientación de las fibras.

Tabla 3. Resumen de datos sobre la absorción de energía en laminados a diferentes orientaciones

Autor	Materiales		Dimensiones		Secuencia de apilado	SEA kJ/kg	Etiquetas
	Refuerzo	Matriz	Diámetro mm	Longitud mm			
Mahdi et al. [46]	GFRP	Epoxi		120.129	$[15/-75]_8$	16.41	C ₅
	GFRP	Epoxi		119.857	$[30/-60]_8$	13.41	C ₃
	GFRP	Epoxi		120.142	$[45/-45]_8$	11.95	C ₁
	GFRP	Epoxi		120.033	$[60/-30]_8$	13.24	C ₂
	GFRP	Epoxi		120.211	$[75/-15]_8$	15.84	C ₄
Jishi et al. [43]	CFRP	Epoxi	10	20	$[45/-45]_8$	104.7	C ₁₅
	CFRP	Epoxi	6	20	$[45/-45]_8$	121	C ₁₆
	CFRP	Epoxi	57	150	$[30, -30, 90]_2$	42.81	C ₉
Cui et al. [47]	CFRP	Epoxi	57	150	$[30, -30, 90]_2$	40.72	C ₇
	CFRP	Epoxi	57	150	$[30, -30, 90]_2$	44.27	C ₁₁
	CFRP	Epoxi	57	150	$[45, -45, 90]_2$	48.27	C ₁₄
	CFRP	Epoxi	57	150	$[45, -45, 90]_2$	46.76	C ₁₂
	CFRP	Epoxi	57	150	$[45, -45, 90]_2$	47.52	C ₁₃



CFRP	Epoxi	57	150	[60,-60,90] ₂	43.84	C ₁₀
CFRP	Epoxi	57	150	[60,-60,90] ₂	40.18	C ₆
CFRP	Epoxi	57	150	[60,-60,90] ₂	40.79	C ₈

3. Resultados y discusión

El análisis de los datos recopilados de los estudios se llevó a cabo clasificándolos según la configuración de laminados presentes en cada probeta de estructura tubular. Este análisis se centró en comparar la capacidad de absorción de energía específica (SEA) con el fin de identificar patrones o tendencias entre los distintos ensayos realizados por varios autores.

3.1 Efecto de laminados [0,90] respecto a la absorción de energía específica en estructuras tubulares de materiales compuestos

En la Figura 6 se presenta la comparación de la SEA para laminados con la misma configuración [0,90] pero diferente cantidad de láminas. Se puede observar que, a pesar de tener la misma configuración y orientación de fibra, los laminados exhiben grandes diferencias en los valores experimentales de SEA. En el estudio llevado a cabo por Zhu et al. [16], se evaluó la capacidad de absorción de energía en una configuración de [0,90]₄, obteniendo valores de 64.76 kJ/kg y 82.67 kJ/kg con probetas de CFRP

de 50 mm de diámetro y 100 mm de longitud. Por otro lado, Sulaiman et al. [36] analizó la misma orientación y configuración de laminado, pero utilizando GFRP con dimensiones de 90 mm de diámetro y 100 mm de longitud, obteniendo una SEA de 6.5 kJ/kg. Estos resultados resaltan la influencia de diversos factores, como el tipo de material y las dimensiones de las probetas, sobre la absorción de energía específica en estructuras tubulares de materiales compuestos.

Además, en los resultados presentados Zhu et al. [16] para la configuración [0,90]₈ se obtuvieron valores de SEA de 66.82 kJ/kg y 83.03 kJ/kg; se puede observar una diferencia entre los resultados tomando en cuenta el mismo material y dimensiones (50 mm de diámetro y 100 mm de longitud). Por otro lado, Sulaiman et al. [36] obtuvieron 21.23 kJ/kg de SEA con GFRP, mientras que Mahdi et al. [46] reportaron 11.99 kJ/kg de SEA de tubos de GFRP; estas diferencias se muestran en la Figura 6. Estos estudios fueron seleccionados debido a la similitud en el número de laminados por probeta, con el propósito de facilitar la comparación de los datos reportados.

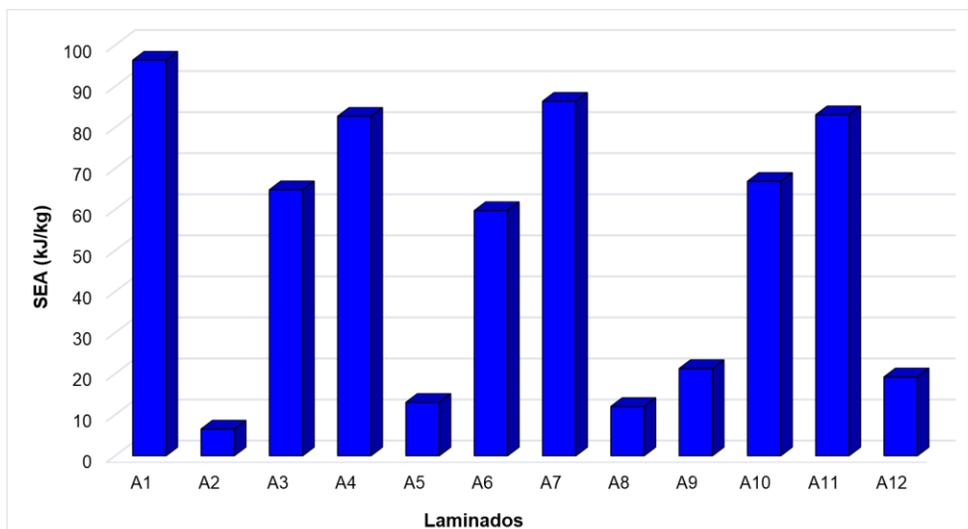


Figura 6. Comparación de la SEA de estructuras tubulares con fibras orientadas a $[0,90]$ (ver Tabla 1 y Tabla 4).

Se puede observar, tanto en la Figura 6 como en la Tabla 4, un valor máximo de SEA de 96.33 kJ/kg para la configuración A₁ $[0/90]_2$. Al contrastarlo con la configuración A₂ $[0,90]_4$, en la cual se obtuvo la menor SEA de 6.5 kJ/kg (ver Figura 7), se puede calcular una diferencia del 93.25%. Se puede notar de la información de la Tabla 1 que, además de la cantidad de láminas y de la longitud, estos tubos están reforzados con fibras de diferente material, vidrio (A₂) y carbono (A₁), la cual podría ser la diferencia de mayor impacto, ya que se ha reportado que las fibras de carbono exhiben una mayor capacidad de absorción de energía que las fibras de carbono $[36, 48, 49-52]$.

Tabla 4. Porcentajes de SEA respecto a la configuración $[0,90]_2$.

Etiqueta	Porcentaje
A1	100%
A2	6.75%
A3	67.23%
A4	85.82%
A5	13.50%
A6	61.96%
A7	89.61%
A8	12.45%
A9	22.04%

A10	69.37%
A11	86.19%
A12	19.93%

Se puede observar en la Figura 6 que muestras de A₈ a A₁₁ comparten la misma configuración $[0,90]_8$. Sin embargo, hay una variación significativa en la absorción de energía específica (SEA) reportada en la Tabla 4, con un mínimo de 11.99 kJ/kg para A₈ y un máximo de 83.03 kJ/kg para A₁₁, lo que representa una diferencia de 71.04 kJ/kg. Esta diferencia en la SEA a pesar de la configuración similar podría atribuirse a varias variables. Por ejemplo, la longitud de las muestras puede jugar un papel importante, ya que A₈ tiene 120 mm de longitud y se realizó con fibra de vidrio, mientras que A₁₁ tiene 200 mm y los tubos fueron reforzados con fibra de carbono, por lo tanto, el material como la longitud pueden ser variables del diseño que afectan directamente a la SEA.

En la configuración $[0,90]_4$, es posible notar una mayor diferencia entre los resultados reportados de SEA, los cuales van desde 6.5 kJ/kg hasta 82.67 kJ/kg. Estas diferencias podrían atribuirse a diversas variables experimentales y de diseño, tales como diferencias en las dimensiones de las muestras, las variaciones en los materiales



compuestos utilizados, así como también las técnicas de ensayo empleadas para evaluar la SEA. Estas diferencias refuerzan la necesidad de

un análisis detallado para identificar los factores que influyen sobre la absorción de energía en estructuras compuestas reforzadas con fibras.

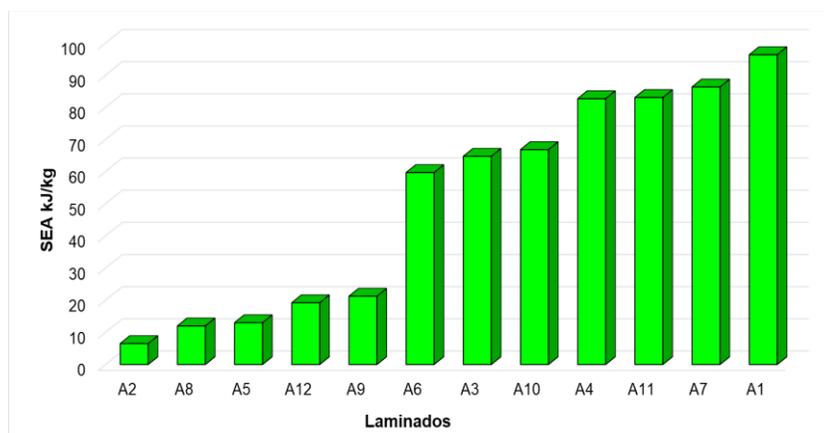


Figura 7. Análisis de la absorción de energía en relación a la configuración de laminado $[0,90]_2$ (ver

Se puede observar, tanto en la Figura 6 como en la Tabla 4, un valor máximo de SEA de 96.33 kJ/kg para la configuración $A_1 [0/90]_2$. Al contrastarlo con la configuración $A_2 [0,90]_4$, en la cual se obtuvo la menor SEA de 6.5 kJ/kg (ver Figura 7), se puede calcular una diferencia del 93.25%. Se puede notar de la información de la Tabla 1 que, además de la cantidad de láminas y de la longitud, estos tubos están reforzados con fibras de diferente material, vidrio (A_2) y carbono (A_1), la cual podría ser la diferencia de mayor impacto, ya que se ha reportado que las fibras de carbono exhiben una mayor capacidad de absorción de energía que las fibras de vidrio [36, 48, 49-52].

Tabla 4).

La evaluación de la absorción de energía específica (SEA), respecto al porcentaje de en la configuración $[0,90]$ con diversos laminados se presenta detalladamente en la Figura 7, tomando como referencia $[0,90]_2$, ya que de los datos analizados fue la que reporto mayor SEA. En la cual se presentan gráficamente los datos de la Tabla 1. Las diferencias porcentuales entre la SEA obtenidos de los tubos de material compuesto presentados en la Tabla 4 sugieren una influencia considerable de las características de diseño de las probetas y los parámetros de los ensayos. A pesar de que las configuraciones de laminado y la orientación de los ensayos son consistentes la dispersión en los resultados subraya la importancia de protocolos estandarizados que regulen dimensiones de probetas y procedimientos de ensayo, contribuyendo así a la obtención de datos más consistentes y comparables en este tipo de evaluaciones.

3.2 Efecto de las orientaciones unidireccionales de fibras en la absorción de energía específica en estructuras tubulares de materiales compuestos

En la evaluación de las orientaciones unidireccionales de fibras, representadas en la Figura 8 se llevó a cabo una comparación detallada de diversas configuraciones de laminado con ángulos variables (0° a 75°) en ensayos de compresión en estructuras tubulares de materiales compuestos. Es posible notar grandes



diferencias en los resultados obtenidos para las configuraciones de laminado aparentemente similares. En el estudio enfocado en orientaciones de 0° realizado por Yang et al. [45], se observa una variación sobre la absorción de energía específica como se puede observar en la Figura 8 y con los datos de la Tabla 2, en donde se alcanzó una SEA mínima de 46 kJ/kg para B₁ y una SEA máxima para B₆ de 58.11 kJ/kg. En estas muestras, las diferencias observadas en la absorción de energía pueden deberse al diámetro de los tubos, ya que se realizaron con 40 mm, 60 mm y 80 mm, incorporando en algunas muestras fibras de vidrio y en otras fibras de carbono en su composición.

En contraste, en el trabajo llevado a cabo por Ramakrishna et al. [24] se abordaron orientaciones de 5° hasta 25°, con incrementos de 5°. En la Figura 8 se puede observar gráficamente la SEA para cada configuración y, en la

Tabla 5 se presentan las diferencias porcentuales de capacidad de energía específica. Se puede notar que la orientación de B₁₂ 25° exhibió una capacidad de absorción mínima con 181.1 kJ/kg, y una máxima de 226 kJ/kg para B₁₀. La metodología para calcular la absorción de

energía sigue un enfoque común, que implica determinar el área bajo la curva de la gráfica de carga-desplazamiento derivada de los ensayos. Sin embargo, las diferencias persisten debido a las variaciones en las condiciones experimentales entre los estudios.

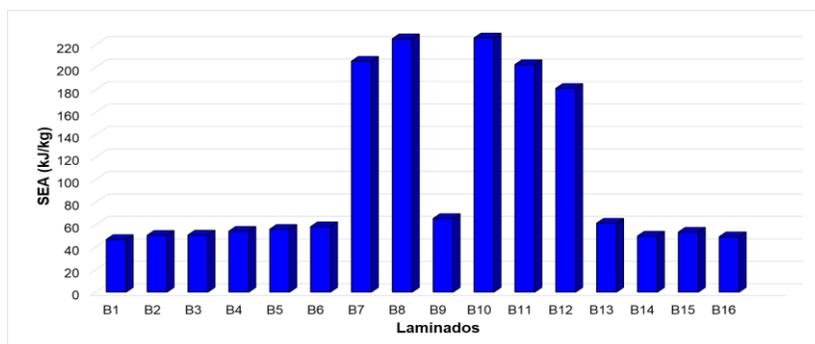


Figura 8. Comparación en laminados con fibras unidireccionales (ver Tabla 2).

Tabla 5. Porcentajes de SEA respecto a los laminados unidireccionales

Etiqueta	Porcentaje
B ₁	20.68%
B ₂	22.32%
B ₃	22.44%
B ₄	23.94%
B ₅	24.71%
B ₆	25.71%
B ₇	90.84%
B ₈	99.69%
B ₉	28.94%
B ₁₀	100%
B ₁₁	89.51%
B ₁₂	80.13%



B₁₃	27.08%
B₁₄	22.04%
B₁₅	23.58%
B₁₆	21.77%

Con los datos de la .

Tabla 5, en la Figura 9 se observa la variación en la absorción de energía en diversas orientaciones, tomando como referencia la configuración B₁₀ [15]₂, donde se registra el valor máximo de 226 kJ/kg. En contraste, con la configuración B₁ [0]₈ muestra el valor mínimo con un 20.68%. Este análisis resalta la importancia de normalizar el diseño experimental de las probetas, ya que en la configuración de [0]₈, los valores reportados de la absorción de energía son similares, incluso al utilizar dos tipos de refuerzos (fibra de vidrio y

fibra de carbono), oscilando entre el 20.68% y el 25.71%. Esto sugiere que, al mantener las mismas dimensiones y condiciones de ensayo, los resultados en cuanto a la absorción de energía específica son similares, ya que se normalizan con respecto a la masa de las probetas. Estas discrepancias resaltan que, a pesar de compartir la misma orientación, las variaciones en la metodología de ensayo ejercen una influencia directa sobre los resultados.

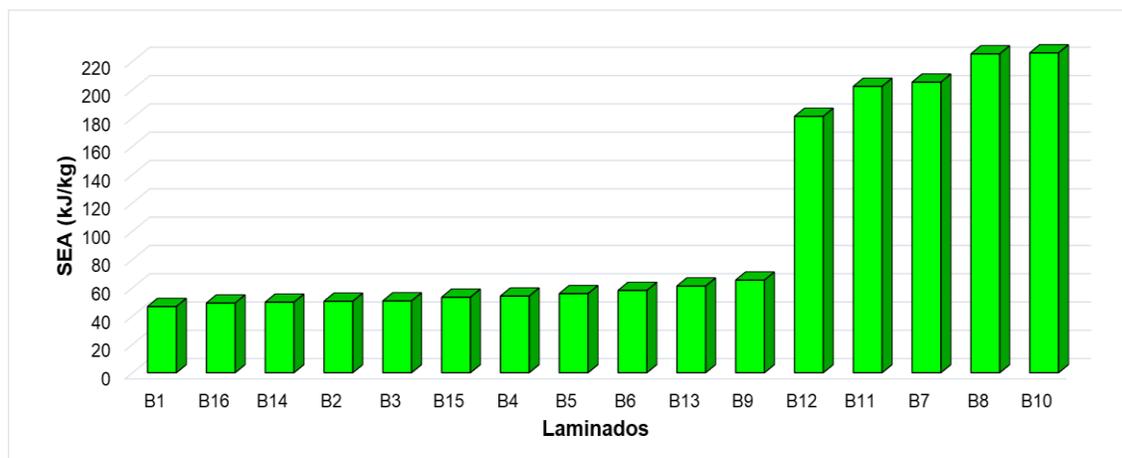


Figura 9 Análisis de la absorción de energía en configuraciones de laminados unidireccionales de 0° hasta 75°.

3.3 Efecto de múltiples orientaciones de fibras en la absorción de energía específica en estructuras tubulares de materiales compuestos

El estudio de la absorción de energía de tubos laminados de material compuesto con orientaciones inclinadas es menos convencional y proporcionan una visión más completa sobre

cómo las diferentes orientaciones de las fibras influyen sobre su capacidad de absorción de energía específica, siendo información relevante en aplicaciones de ingeniería, en cuestión de la optimización y diseño de los tubos. En la Figura 10 se muestra gráficamente la absorción de energía específica (SEA) para tubos laminados con diferentes orientaciones. Es posible observar grandes diferencias que pueden atribuirse tanto a



las variaciones en las configuraciones de laminado empleadas como a las metodologías específicas utilizadas en cada ensayo.

Tabla 3 y la .

Tabla 6, en la Figura 10 se observa una absorción de energía de 11.95 kJ/kg para el tubo C₁ correspondiendo al 9.88% en la configuración [45/-45]₈, fabricado con fibra de vidrio, siendo la mínima reportada. Por otro lado, Jishi et al. [43] reportaron valores de 104.7 kJ/kg (C₁₅) y para C₁₆ una SEA máxima de 121 kJ/kg, utilizando la misma configuración [45/-45]₈ y elaboradas con fibras de carbono; en este caso, el diámetro de las muestras es distinto: en el tubo C₁₅ se utilizó un diámetro de 10mm y para el tubo C₁₆, 6mm. Por lo tanto, se puede observar que esta variable (diámetro) puede ser predominante en la

Tabla 3. En la Figura 10 se puede observar que la configuración [45,-45,90]₂ (C₁₄) exhibió la mayor absorción de energía, con un valor de 48.27 kJ/kg, correspondiente al 39.89%. Al observar la configuración [30,-30,90]₂, se evidencian diferencias en los valores reportados de SEA, que varían entre 40 kJ/kg y 44 kJ/kg, con diferencias aproximadas de 4%. Aunque esta

En el estudio de Mahdi et al. [46] se exploraron distintas configuraciones de laminado, revelando una variación significativa en la SEA según la configuración empleada. Con los datos de la

diferencia en la SEA. A pesar de que todos los resultados provienen de ensayos hechos sobre tubos fabricados con las mismas configuraciones (C₁, C₁₅ y C₁₆), sus propiedades mecánicas varían en 90% entre ambos estudios experimentales, debido a la diferencia de dimensiones y de las fibras empleadas.

Adicionalmente, en el estudio de Cui et al. [49] se obtuvo la capacidad de absorción de energía para los tubos etiquetados C₉, C₇ y C₁₁ con [30,-30,90]₂, C₁₂, C₁₃ y C₁₄ con [45,-45,90]₂ y C₆, C₈ y C₁₀ con [60,-60,90]₂ presentados en la variación puede considerarse relativamente menor, es importante señalar que estos datos provienen de una sola investigación, logrando cierta consistencia entre los resultados debido a condiciones metodológicas similares. No obstante, es crucial reconocer que estas discrepancias no se limitan a una sola configuración de laminado.

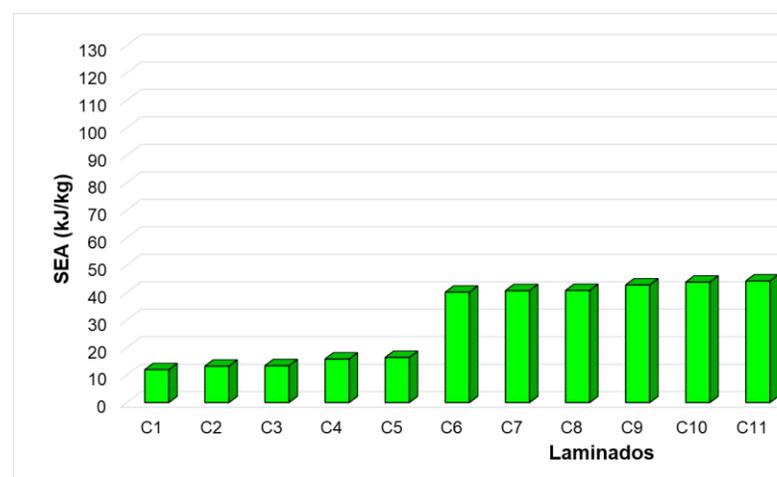


Figura 10. Análisis de la absorción de energía en configuraciones multidireccionales (ver



Tabla 3 y .

Tabla 6).

Tabla 6. Porcentajes de SEA respecto a los laminados multidireccionales

Etiqueta	Porcentaje
C1	9.88%
C2	10.94%
C3	11.08%
C4	13.09%
C5	13.56%
C6	33.21%
C7	33.65%
C8	33.71%
C9	35.38%
C10	36.23%
C11	36.59%
C12	38.64%
C13	39.27%
C14	39.89%
C15	86.53%
C16	100%

Estas diferencias resaltan la necesidad de establecer normativas o estándares para la ejecución de ensayos en estructuras compuestas. La falta de uniformidad en las metodologías experimentales no solo dificulta la comparación directa entre los estudios existentes, sino que también obstaculiza la identificación de tendencias consistentes o patrones confiables en los datos recopilados.

Es esencial dirigir investigaciones destinadas al desarrollo de estándares que regulen los procedimientos de evaluación de la absorción de energía en estos materiales. Esto no solo contribuiría a una mejor comprensión de su comportamiento, sino que también impulsaría su aplicación en sectores cruciales como la industria aeroespacial, automotriz y de construcción.

4. Conclusiones

En este trabajo se reporta la comparación de resultados experimentales relacionados con la capacidad de absorción de energía de estructuras tubulares de material compuesto, publicados entre los años 1987 y 2023. A pesar de que los ensayos se hicieron sobre los mismos materiales y formas, se encontró una gran dispersión de los datos reportados aún cuando éstos se normalizaron con respecto a la cantidad de masa. De los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que:

- El estudio comparativo de los datos obtenidos de diversas investigaciones sobre estructuras tubulares de materiales compuestos, específicamente en relación con la absorción de energía específica (SEA), revela desafíos fundamentales y la necesidad de normativas estandarizadas en los ensayos de estos materiales.
- Los laminados configurados con fibras en orientaciones de $[0,90]$ presentaron una alta dispersión en los resultados de absorción de energía, incluso manteniendo la misma configuración de lamiado y orientación de fibras. Esta diferencia fue evidente en todas las configuraciones analizadas, desde $[0,90]_2$ hasta $[0,90]_8$, donde se observaron diferencias significativas en los valores de SEA, oscilando en rangos considerables.
- Los datos revelan diferencias notables incluso en configuraciones de orientaciones idénticas. Por ejemplo, en la orientación $[0]_8$, se observaron diferencias entre los valores reportados, oscilando entre 46 kJ/kg y 58 kJ/kg en un estudio. Estas discrepancias indican que, aunque las orientaciones sean similares, las variaciones en la metodología de ensayo influyen directamente en los resultados, lo que lleva a



interpretaciones y resultados distintos entre los autores.

- El estudio de laminados con diversas orientaciones muestra diferencias en SEA obtenida debido a las variaciones en las configuraciones de laminado y metodologías específicas empleadas en los ensayos. Aunque cierta consistencia se observa en algunos casos, como la configuración $[30,-30,90]_2$, la amplia gama de valores de SEA refleja la influencia significativa de la disposición de las fibras en la capacidad de absorción de energía de las estructuras tubulares de materiales compuestos.
- La carencia de normativas para guiar los procedimientos de prueba ha sido identificada como un factor clave que contribuye a estas discrepancias. La ausencia de estándares específicos para las dimensiones de las probetas, así como el número requerido de ensayos para pruebas cuasi-estáticas en estructuras tubulares de materiales compuestos, genera una gran dispersión en los procedimientos experimentales y, por lo tanto, en los resultados obtenidos.
- La falta de protocolos normalizados dificulta la comparación precisa entre investigaciones y, por ende, la identificación de patrones o tendencias consistentes en los resultados, lo cual conduce a la desconfianza por parte de los ingenieros de diseño para usar tubos compuestos como absorbedores de impacto en aplicaciones estructurales.
- La implementación de normalización de procedimientos y condiciones experimentales no solo facilitaría la comparación entre estudios, sino que también contribuiría a una comprensión más profunda de los factores que influyen en esta propiedad, promoviendo así avances en aplicaciones industriales clave.

5. Agradecimientos

MFDJR agradece al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el

apoyo otorgado a través de la beca No. CVU: 1231855 y hacer posible un posgrado.

6. Reconocimiento de autoría

Fernanda De Jesús-Ramírez: análisis formal; metodología; procesamiento de datos y discusión de resultados; preparación del borrador, revisión y edición. *Arturo Abúndez-Pliego*: conceptualización; administración del proyecto; supervisión; redacción del borrador original; *Enrique Alcudia-Zacarías*: procesamiento de datos, preparación del borrador (de apoyo); procesamiento de datos y discusión de resultados. *Juan Antonio Paz-González*: procesamiento de datos, preparación del borrador (de apoyo); procesamiento de datos y discusión de resultados; *Salomón Blanco-Figueroa*: preparación del borrador (de apoyo); procesamiento de datos y discusión de resultados.

Referencias

- [1] G. C. Jacob, J. F. Fellers, S. Simunovic, and J. M. Starbuck, "Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness," *J Compos Mater*, vol. 36, no. 7, pp. 813–850, Apr. 2002, doi: 10.1177/0021998302036007164.
- [2] D. Escudero López, "Composite materials. Applications," *Informes de la Construcción*, vol. 52, no. 472, Apr. 2001, doi: 10.3989/ic.2001.v52.i472.676.
- [3] C. Edil da Costa, F. Velasco López, and J. M. Torralba Castelló, "Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones," *Revista de Metalurgia*, vol. 36, no. 3, pp. 179–192, Jun. 2000, doi: 10.3989/revmetalm.2000.v36.i3.570.
- [4] D. Hill, *Materiales compuestos*, Reverté. Barcelona, 1987.
- [5] J. G. Paredes Salinas, C. F. Pérez Salinas, and C. B. Castro Miniguano, "Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y



cabuya aplicada a la industria automotriz,” *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 3, pp. 1–15, Jun. 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n3.163.

[6] W. Aperador, A. Delgado, and 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, no. 2, pp. 63–69, Feb. 2016, doi: 10.22463/0122820X.398.

[7] J. Faus Ferrer and M. Marquina Contreras, “Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono para aplicaciones estructurales,” Dec. 2013, Accessed: Dec. 02, 2023. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/34276>

[8] D. K. Rajak, P. H. Wagh, and E. Linul, “Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 21, p. 3721, Oct. 2021, doi: 10.3390/polym13213721.

[9] 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, no. 6, pp. 434–445, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.05.009.

[10] H. Ahmad, A. A. Markina, M. V. Porotnikov, and F. Ahmad, “A review of carbon fiber materials in automotive industry,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 971, no. 3, p. 032011, Nov. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/971/3/032011.

[11] T. P. Hovorun, K. V. Berladir, V. I. Pererva, S. G. Rudenko, and A. I. Martynov, “Modern materials for automotive industry,” *Journal of Engineering Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. f8–f18, 2017, doi: 10.21272/jes.2017.4(2).f8.

[12] P. D. Mangalgi, “Composite materials for aerospace applications,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 22, no. 3, pp. 657–664, May 1999, doi: 10.1007/BF02749982.

[13] D. W. Schmueser and L. E. Wickliffe, “Impact Energy Absorption of Continuous Fiber Composite Tubes,” *J Eng Mater Technol*, vol. 109, no. 1, pp. 72–77, Jan. 1987, doi: 10.1115/1.3225937.

[14] L. S. ARIAS MAYA and L. VANEGAS USECHE, “MATERIALES COMPUESTOS INTELIGENTES,” *Scientia et Technica*, vol. 2, no. 25, Aug. 2004, Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available:

<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7225> SP -

[15] C. W. Isaac and 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, Feb. 01, 2021. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113081.

[16] G. Zhu, J. Liao, G. Sun, and 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.

[17] G. Sun, H. Yu, Z. Wang, Z. Xiao, and Q. Li, “Energy absorption mechanics and design optimization of CFRP/aluminium hybrid structures for transverse loading,” *Int J Mech Sci*, vol. 150, pp. 767–783, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.10.043.

[18] Z. Zhang, Q. Liu, J. Fu, and Y. Lu, “Parametric study on the crashworthiness of the Al/CFRP/GFRP hybrid tubes under quasi-static crushing,” *Thin-Walled Structures*, vol. 192, p. 111156, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.111156.

[19] G. L. Farley, “Energy Absorption of Composite Materials,” *J Compos Mater*, vol. 17, no. 3, pp. 267–279, May 1983, doi: 10.1177/002199838301700307.

[20] J. Fu, Q. Liu, Y. Ma, and 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.
- [21] A. Meidell, “Computer aided material selection for circular tubes designed to resist axial crushing,” *Thin-Walled Structures*, vol. 47, no. 8–9, pp. 962–969, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.tws.2009.02.003.
- [22] E. Mahdi, A. M. S. Hamouda, B. B. Sahari, and Y. A. Khalid, “Effect of residual stresses in a filament wound laminated conical shell,” in *Journal of Materials Processing Technology*, Jul. 2003, pp. 291–296. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00087-6.
- [23] Z. Song, S. Ming, T. Li, K. Du, C. Zhou, and B. Wang, “Improving the energy absorption capacity of square CFRP tubes with cutout by introducing chamfer,” *Int J Mech Sci*, vol. 189, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105994.
- [24] S. Ramakrishna, “Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications,” *Mater Des*, vol. 18, no. 3, pp. 167–173, Oct. 1997, doi: 10.1016/S0261-3069(97)00098-8.
- [25] J. J. Carruthers, A. P. Kettle, and A. M. Robinson, “Energy Absorption Capability and Crashworthiness of Composite Material Structures: A Review,” *Appl Mech Rev*, vol. 51, no. 10, pp. 635–649, Oct. 1998, doi: 10.1115/1.3100758.
- [26] Y. Wang, J. Feng, J. Wu, and 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.
- [27] S. M. Hosseini and 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, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.tws.2018.01.026.
- [28] D. Hu, C. Zhang, X. Ma, and 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.
- [29] H.-W. Song, X.-W. Du, and G.-F. Zhao, “Energy Absorption Behavior of Double-Chamfer Triggered Glass/Epoxy Circular Tubes,” *J Compos Mater*, vol. 36, no. 18, pp. 2183–2198, Sep. 2002, doi: 10.1177/0021998302036018515.
- [30] J. Xu, Y. Ma, Q. Zhang, T. Sugahara, Y. Yang, and H. Hamada, “Crashworthiness of carbon fiber hybrid composite tubes molded by filament winding,” *Compos Struct*, vol. 139, pp. 130–140, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.11.053.
- [31] R. Jafari Nedoushan, “Improvement of energy absorption of expanded metal tubular structures under compressive loads,” *Thin-Walled Structures*, vol. 157, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.107058.
- [32] S. Palanivelu *et al.*, “Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes,” *Polym Test*, vol. 29, no. 2, pp. 224–234, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.polymertesting.2009.11.005.
- [33] 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, no. 3, pp. 381–396, May 2010, doi: 10.1016/j.polymertesting.2010.01.003.
- [34] P. M. Weaver and M. F. Ashby, “Material limits for shape efficiency,” *Prog Mater Sci*, vol. 41, no. 1–2, pp. 61–128, 1997, doi: 10.1016/S0079-6425(97)00034-0.
- [35] A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, G. A. Demosthenous, and M. B. Ioannidis, “Analysis of failure mechanisms observed in axial collapse of thin-walled circular fibreglass composite tubes,” *Thin-Walled Structures*, vol. 24, no. 4, pp. 335–352, Jan. 1996, doi: 10.1016/0263-8231(95)00042-9.



- [36] S. Sulaiman, M. AlHajji, C. N. A. Jaafar, F. A. Aziz, and T. Zuhair, “Effect of composite material distribution and shape on energy absorption systems,” *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2022, doi: 10.1080/2374068X.2020.1793265.
- [37] S. Sulaiman, M. AlHajji, C. N. A. Jaafar, F. A. Aziz, and T. Zuhair, “Effect of composite material distribution and shape on energy absorption systems,” *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2022, doi: 10.1080/2374068X.2020.1793265.
- [38] J. J. de la Cuesta and H. Ghasemnejad, “Improvement of Force History Pattern in Composite Tubular Structures by Developed Trigger Mechanisms,” *Applied Composite Materials*, vol. 29, no. 5, pp. 1771–1794, Oct. 2022, doi: 10.1007/s10443-022-10040-5.
- [39] T. Ran, Y. Ren, and 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.
- [40] E. Cetin, A. Baykasoğlu, M. E. Erdin, and 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, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2022.110321.
- [41] D. Wang, B. Liu, and H. Liang, “Investigation into design strategy of aluminum alloy-CFRP hybrid tube under multi-angle compression loading,” *Int J Mech Sci*, vol. 248, p. 108207, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108207.
- [42] E. F. Abdewi, S. Sulaiman, A. M. S. Hamouda, and E. Mahdi, “Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes,” *Thin-Walled Structures*, vol. 46, no. 3, pp. 320–332, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.tws.2007.07.018.
- [43] H. Jishi, R. Alia, and W. Cantwell, “The energy-absorbing characteristics of tubular sandwich structures,” *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 24, no. 1, pp. 742–762, Jan. 2022, doi: 10.1177/10996362211020457.
- [44] P. H. Thornton, “Energy Absorption in Composite Structures,” *J Compos Mater*, vol. 13, no. 3, pp. 247–262, Jul. 1979, doi: 10.1177/002199837901300308.
- [45] H. Yang, H. Lei, G. Lu, Z. Zhang, X. Li, and 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.
- [46] E. Mahdi, A. M. S. Hamouda, and 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, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.009.
- [47] Z. Cui, Q. Liu, Y. Sun, and 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.
- [48] A. Berndt, M. Laux, H. Oberlercher, R. Heim, and 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.
- [49] R. Jiang *et al.*, “Energy Absorption Characteristics of a CFRP-Al Hybrid Thin-Walled Circular Tube under Axial Crushing,” *Aerospace*, vol. 8, no. 10, p. 279, Sep. 2021, doi: 10.3390/aerospace8100279.
- [50] J.-S. Kim, H.-J. Yoon, and K.-B. Shin, “A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers,” *Int J Impact Eng*, vol. 38, no. 4, pp. 198–207, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.11.007.



[51] M. Mirzaei, M. Shakeri, M. Sadighi, and H. Akbarshahi, “Experimental and analytical assessment of axial crushing of circular hybrid tubes under quasi-static load,” *Compos Struct*, vol. 94, no. 6, pp. 1959–1966, May 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2012.01.003.

[52] Y. Yang, Y. Nishikawa, A. Nakai, U. S. Ishiaku, and 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, no. 4, Jan. 2008, doi: 10.1515/SECM.2008.15.4.249.

Derechos de Autor (c) 2024 Fernanda De Jesús-Ramírez, Arturo Abúndez-Pliego, Enrique Alcudia-Zacarías, Juan Antonio Paz González, Salomón Blanco-Figueroa



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)