

Evaluación del comportamiento a flexión de tubos estructurales de acero reforzados con cintas pre-impregnadas de CFRP para aplicaciones vehiculares

Gustavo Neira-Alatrasta¹, Daniel Lavayen-Farfán¹, Wilfredo Bullón-Carhuallanqui¹, Mirko Flores-Sánchez¹, Jorge Llimpe-Rojas¹, Jorge Rodríguez-Hernández¹

¹Grupo de Investigación Applied Mechanics, Machines and Mechanisms. Departamento Académico de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, San Miguel, Lima 15088, Perú. Email: gustavo.neira@pucp.edu.pe, dlavayen@pucp.edu.pe, wilfredo.bullon@pucp.edu.pe, mirko.flores@pucp.edu.pe, jllimper@pucp.edu.pe, crodrig@pucp.edu.pe

Resumen

Uno de los objetivos de la industria vehicular es mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de combustible. Basándose en ese principio, los vehículos deben ser confortables, estables, ligeros, pero sin descuidar la seguridad que brinda a los pasajeros en caso de accidentes y colisiones. Frente a una colisión inesperada, los elementos estructurales deben ser capaces de disipar la energía del impacto en forma de deformación plástica. Una alternativa de mejorar la capacidad de disipación de energía, y por consiguiente, la seguridad del vehículo, es mediante el refuerzo de los elementos estructurales empleando polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) superficial y localmente. En este estudio, se explora esta alternativa de refuerzo en tubos de acero estructural empleados comúnmente en estructuras de protección de vuelco. Se considera como refuerzo cintas pre-impregnadas de CFRP disponibles comercialmente, y se evalúa su influencia en la resistencia y peso de la estructura, a través de ensayos de flexión de tres puntos. Los resultados muestran una notable mejora en la resistencia y en la energía de deformación plástica para una serie de configuraciones geométricas distintas de refuerzos, los cuales pueden aplicarse tanto en diseños nuevos como en estructuras existentes.

Palabras clave: Elementos estructurales, refuerzos, fibra de carbono, absorción de energía.

Abstract

One of the objectives of the vehicle industry is to improve energy efficiency and reduce fuel consumption. Based on this principle, vehicles must be comfortable, stable, light, but without neglecting the safety they provide to passengers in the event of accidents and collisions. In the event of an unexpected collision, the structural elements must be capable of dissipating the impact energy in the form of plastic deformation. An alternative to improve the energy dissipation capacity, and consequently, the safety of the vehicle, is by reinforcing the structural elements using carbon fiber reinforced polymers (CFRP) superficially and locally. In this study, this reinforcement alternative is explored in structural steel tubes commonly used in rollover protection structures. Commercially available CFRP pre-impregnated tapes are considered as reinforcement, and their influence on the strength and weight of the structure is evaluated through three-point bending tests. The results show a notable improvement in strength and plastic deformation energy for a series of different geometric configurations of reinforcements, which can be applied in both new designs and existing structures.

Keywords: Structural elements, reinforcements, carbon fiber, collisions, energy absorption

1. Introducción

Los elementos, con los cuales se fabrican las estructuras vehiculares de bus que conforman el compartimiento de pasajeros, son elementos tubulares de acero estructural los cuales pueden ser de sección cuadrada y rectangular y, por lo general, no presentan refuerzos de ninguna índole. Los elementos estructurales de sección rectangular y cuadrada usados ampliamente en vehículos automotores, conforman

una estructura de protección contra vuelcos y deben cumplir ciertos requisitos de seguridad [1]. En un impacto accidental, tales elementos estructurales colapsan localmente bajo cargas de flexión. Si los desplazamientos durante el colapso son muy elevados, entonces la estructura puede invadir el espacio mínimo de supervivencia, pudiendo causar lesiones de gravedad e incluso la muerte en los pasajeros. Es así que el estudio del colapso de los elementos estructurales es importante tanto para el diseño como

para el análisis de estructuras de seguridad con limitaciones de peso. Estos elementos estructurales han sido objeto de varias investigaciones durante los últimos años. Kecman [1-2], fue uno de los primeros en estudiar el colapso por flexión en tubos y su influencia en la resistencia durante el vuelco en autobuses, concretamente en tubos de sección rectangular y cuadrada, completamente de acero. Kecman encontró relaciones empíricas entre el momento flector de la junta y el ángulo de flexión, caracterizando así el colapso mediante una curva momento-ángulo.

Una forma de reforzar los elementos estructurales es el uso de dos materiales, tal como lo presenta Mamalis et al. [3], quien experimenta con tubos de acero y cobre reforzados con tubos de PVC y aluminio, los cuales son ensayados a compresión, presentando un ligero incremento en la resistencia del conjunto.

Los elementos estructurales no son solamente de acero, Shin et al. [4] experimenta con tubos de aleación de

aluminio, reforzados con fibra de vidrio pre-impregnada; en esta investigación, los especímenes son sometidos a compresión y flexión, empleando tubos de aluminio de sección cuadrada. Los refuerzos de fibra de vidrio se adhirieron al tubo de aluminio en distintas orientaciones. Estos refuerzos de fibra de vidrio fueron adheridos en toda la longitud del espécimen a ensayar. Los refuerzos no solamente se pueden adherir en las superficies exteriores de los elementos estructurales; Steeves et al [5-6] estudia el comportamiento de elementos viga tipo sándwich fabricados a partir de fibra de vidrio tejida pre-impregnada y reforzados con espuma de PVC en el interior, cuyas densidades relativas varían desde 6.6% hasta 13.3%; los cuales fueron ensayados a flexión en tres puntos. El uso de estos elementos incide notoriamente en el peso de los elementos fabricados mediante perfiles metálicos de las mismas dimensiones. La geometría de la viga sándwich se muestra en la figura 1a.

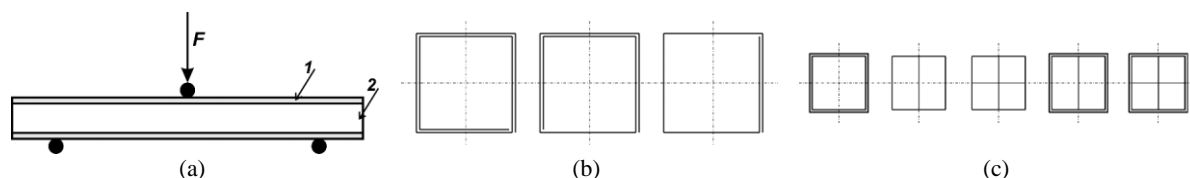


Figura 1. (a) Geometría de una viga sándwich, (1): láminas de material compuesto, (2) interior de espuma de PVC, adaptado de: [5]. (b) Secciones representativas de tubos a partir de plancha doblada de 1mm de espesor. Adaptado de: [8]. (c) Secciones representativas con y sin refuerzo. Adaptado de: [9]

Sung-Hyuk et al. [7] describe las características de la absorción de energía para vigas tubulares de aluminio reforzadas con capas en distintas orientaciones de fibra de vidrio impregnadas de resina epoxi. El proceso de manufactura para las vigas híbridas consiste en el uso de elementos de aluminio extruidos, Al 6063T5, de sección cuadrada de 20mm de lado y 1 y 2 mm de espesor, los cuales se adhería fibra de vidrio unidireccional preimpregnada en los 4 lados. Luego los tubos de aluminio se curaban en una autoclave siguiendo un ciclo recomendado. Previamente, los tubos de aluminio fueron tratados con ácido fosfórico anodizado. Una capa de adhesivo se insertó entre el tubo de aluminio y la lámina de fibra de vidrio preimpregnada. Para evaluar el colapso por flexión se fabricaron varios tipos de elementos, los cuales consistían en diferentes orientaciones de la fibra de vidrio sobre la superficie del tubo de aluminio. Los refuerzos de fibra de vidrio fueron adheridos en toda la longitud de los especímenes a ensayar.

Algunos elementos estructurales son fabricados a partir de planchas metálicas dobladas, es así que Zhang et al [8] investiga el colapso por flexión en tubos de acero a partir de plancha doblada. Un esquema de la conformación de los tubos fabricados a partir de plancha doblada se muestra en la figura 1b.

Asimismo, también experimenta con tubos multicelda, fabricados a partir de plancha doblada, ver figura 1c. En estos experimentos el tubo estaba constituido únicamente por la plancha doblada de acero. En esta investigación, se incidió en la comparación frente a los tubos comerciales de similares secciones transversales en cuanto a la capacidad para la absorción de energía. Los elementos estructurales que conforman la estructura de un vehículo pueden ser tubos híbridos multicelda. Huang et al [9] presenta un estudio experimental y numérico sobre el colapso a flexión de tubos híbridos multicelda de aluminio y CFRP, como se muestra en la figura 3. El refuerzo de fibra de carbono tejida preimpregnada se adhiere en toda la longitud del elemento estructural, y el mismo se ubica en los cuatro lados del tubo. Los tubos presentan configuraciones de doble celda y cuádruple celda. La longitud es de 270 mm.

Los especímenes fueron sometidos a ensayos de flexión cuasi estáticos en tres puntos, y a pruebas dinámicas de impacto, en todos los especímenes ensayados se observó deformación debido a la flexión en forma global y características de indentación en forma local. Además, se observó que las capas de fibra de carbono en los tubos híbridos, se rompieron en dos segmentos en las áreas centrales.

El refuerzo en los elementos estructurales no tiene por qué adherirse en los cuatro lados del tubo. Lavayen et al [10] analiza el colapso de elementos estructurales reforzados con CFRP de sección cuadrangular, los cuales son sometidos a flexión en tres puntos. Los refuerzos están localizados en toda la longitud del elemento a ensayar, como se muestra en la figura 2.

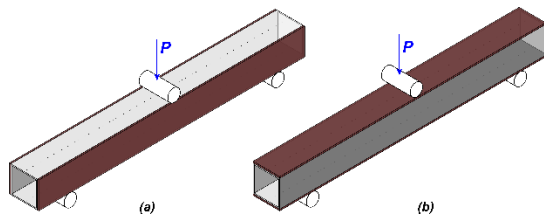


Figura 2. Refuerzos en toda la longitud del espécimen, (a) refuerzos en las almas; (b) refuerzos en las alas. Adaptado de: [10]

En este caso, los elementos estructurales se encuentran reforzados en la parte superior e inferior o en las partes laterales, respecto al lado en el cual se aplica la fuerza. Previamente, los especímenes son pulidos mediante lijas y limpiados con etanol; a continuación, se esparce el adhesivo en la superficie del espécimen, y se adhiere la lámina de CFRP. Ambos tipos de refuerzos ofrecieron incrementos similares de resistencia y de energía disipada por deformación plástica y delaminación del compuesto. Sin embargo, existen grandes zonas del refuerzo que no resultaron dañadas ni sufrieron ningún tipo de delaminación.

En la presente investigación se busca explorar la influencia que tiene la longitud de refuerzo de CFRP con respecto a la longitud total de la probeta. De esta manera, se podría optimizar la cantidad de material compuesto empleado en los refuerzos, de manera que solamente se use la cantidad necesaria de material compuesto.

2. Metodología

El presente estudio se realiza de manera netamente experimental. Los especímenes a ensayar son de acero de sección cuadrada, de 50 mm de lado y 2 mm de espesor; los cuales estarán reforzados localmente. Por la teoría de vigas, al ensayar una viga a flexión en tres puntos, la sección crítica es el punto medio de la viga. Bajo este criterio, la zona central se reforzará con cinta preimpregnada de CFRP, definiendo para ello distintas longitudes de refuerzo. Los especímenes a ensayar tendrán una longitud de 500 mm, y la carga estará aplicada en el punto medio, tal como se muestra en la figura 3. El propósito de adherir los refuerzos localmente en la parte central de la viga es determinar la longitud mínima de refuerzo necesaria para obtener incrementos de resistencia y energía disipada como deformación plástica.

La fase experimental del trabajo se dividió en varias etapas, las cuales consisten en: fabricación de los

especímenes a ensayar, preparación de la superficie de los especímenes, preparación de los refuerzos, adhesión de refuerzos en la superficie preparada, curado, montaje en la máquina de ensayo y ensayo de los especímenes.

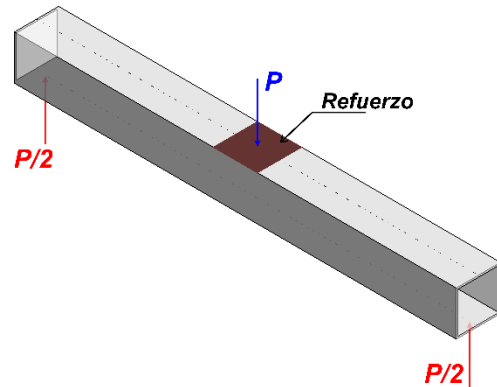


Figura 3. Disposición de los refuerzos en los especímenes

2.1. Fabricación de los especímenes

Los especímenes se fabricaron a partir de tubos de acero estructural laminado en caliente (LAC) ASTM A500, las cuales se encuentran en el mercado local. Los especímenes presentan las medidas siguientes: largo de 500 mm, sección cuadrada de 50 mm de lado y espesor de pared de 2 mm. Los cortes se realizaron utilizando un esmeril angular, equipado con un disco de corte.

2.2. Preparación de los especímenes

Los especímenes deben ser preparados para que sobre ellos se adhiera el refuerzo de cintas pre-impregnadas de CFRP. La preparación de los especímenes consistió en la limpieza de la zona en la cual se adheriría el refuerzo. Para ello se procedió al pulido de los especímenes, usando una amoladora, lijas grado 800 y 1000, y finalmente la superficie fue limpiada con alcohol isopropílico.

2.3. Preparación de los refuerzos

Los refuerzos se cortaron a partir de platinas Sika CarboDur®, la cual es un laminado a base de polímeros reforzados con fibras de carbono, utilizadas para refuerzo estructural. Los refuerzos fueron cortados usando un esmeril angular, en longitudes de 50, 100 y 150 mm, como se muestra en la figura 4. Se utilizó alcohol isopropílico para limpiar los refuerzos ya cortados y tenerlos listos para ser adheridos a los especímenes. De acuerdo a la información técnica de las platinas usadas, el valor medio de la resistencia a la tracción del laminado es 3.1 GPa, siendo el módulo de elasticidad a la tracción del laminado igual a 170 GPa; ambos valores de determinaron según la norma ASTM 3039, método de prueba estándar para propiedades de

tensión aplicable a materiales compuestos de matriz polimérica.

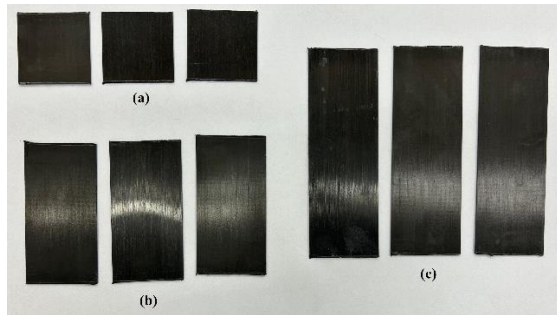


Figura 4. Refuerzos a ser adheridos en los especímenes: (a) 50 mm, (b) 100 mm, (c) 150 mm

2.4. Adhesión de los refuerzos

La adhesión de los refuerzos en los especímenes se realizó utilizando Sikadur® 30, el cual es un adhesivo a base de resina epoxi bicomponente. El adhesivo se fijó en la parte central de espécimen, la capa de adhesivo, de acuerdo a la recomendación del fabricante, fue de 1 mm aproximadamente. Luego se aplicó presión sobre el área donde se ubicó el refuerzo. Se utilizaron longitudes de refuerzo igual a 50, 100 y 150 mm, ver figura 4.

Los refuerzos fueron adheridos en las alas de los especímenes a ensayar y en la parte central del mismo, en la figura 5 se muestra la disposición del refuerzo de 50 mm de longitud.

2.5. Curado

Una vez adherido el refuerzo en cada espécimen, estos se dejaron curar a temperatura ambiente por cinco días, evitando estar expuestos a la luz solar directa y asegurando condiciones de humedad no excesiva. Se mantuvo la presión sobre los especímenes durante el tiempo de curado.

2.6. Montaje en la máquina de ensayo

Cada uno de los especímenes fue montado en la máquina de ensayos, utilizando para ello un puente de flexión de tres puntos, ver figura 5. Se verificó que la fuerza sea aplicada en el punto medio del elemento a ensayar. La distancia entre los puntos de apoyo fue de 480 mm.



Figura 5. Puente de flexión

2.7. Ensayo de los especímenes

Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayos universal Zwick/Roell modelo Z250. La fuerza se aplicó en forma gradual. La velocidad del ensayo fue de 1mm/s. El término del ensayo se determinó cuando el espécimen colapsó completamente o la parte inferior del tubo entró en contacto con la base del puente de flexión. El número de especímenes ensayados fueron 12, agrupados en 4 grupos de 3 especímenes cada uno, de acuerdo a la longitud del refuerzo. El primer grupo consistió en especímenes sin refuerzo. Los refuerzos se definieron en longitudes de 50, 100 y 150 mm, y la disposición de los mismos de acuerdo a lo mostrado en la figura 6. De esta manera, se ensayaron los 9 especímenes reforzados, 3 por cada longitud de refuerzo definido.

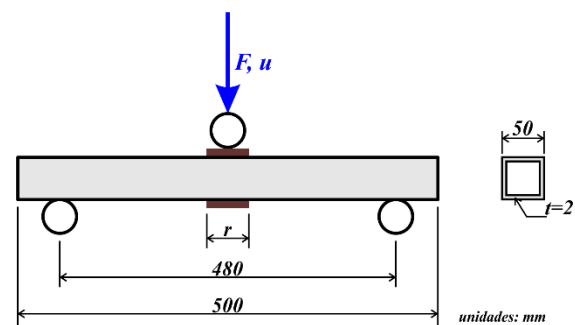


Figura 6. Dimensiones del espécimen y condición de carga en el ensayo a flexión en tres puntos; r =longitud del refuerzo

Los especímenes se codifican de acuerdo al perfil usado (C: cuadrado), longitud del refuerzo expresado en centímetros si es que presentan refuerzo, y un número de orden. En la tabla 1 se muestra la codificación definida para los especímenes.

Tabla 1. Codificación de especímenes.

Código	Descripción
C-##	Perfil cuadrado sin refuerzo
C05F-##	Perfil cuadrado con refuerzo en las alas, longitud del refuerzo: 50 mm

C10F-##	Perfil cuadrado con refuerzo en las alas, longitud del refuerzo: 100 mm
C15F-##	Perfil cuadrado con refuerzo en las alas, longitud del refuerzo: 150 mm

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Los resultados se describirán de acuerdo a la longitud del refuerzo presente en los especímenes. Se ensayaron especímenes sin refuerzo con el propósito de comparar el comportamiento, disipación de energía y resistencia, de los mismos con y sin refuerzo.

3.1. Especímenes sin refuerzo

Se ensayaron tres especímenes bajo esta configuración. Los resultados de los ensayos se presentan en la figura 7, en la cual se muestra la fuerza aplicada vs el desplazamiento del punto medio, punto donde se aplicó la fuerza durante el ensayo de flexión.

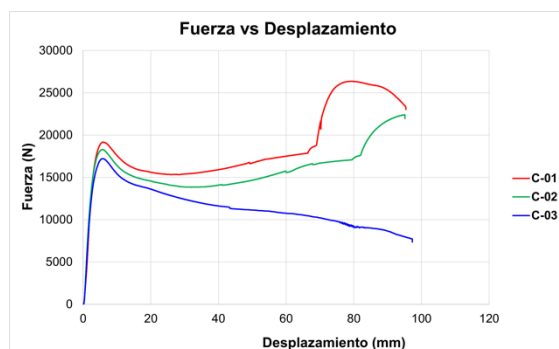


Figura 7. Diagramas de fuerza vs desplazamiento para especímenes sin refuerzo

El espécimen C-01, luego del ensayo, se muestra en la figura 8. El espécimen C-02 presenta una forma muy similar luego del ensayo.



Figura 8. Indentación presentada en el espécimen C-01

El espécimen C-03 se muestra en la figura 9, mostrando la zona de colapso esperada, no presentando indentación. Por lo tanto, se empleó la distancia entre apoyos del espécimen C-03.



Figura 9. Colapso presentado en el espécimen C-03

3.1.1. Energía de deformación

La energía de deformación disipada por el espécimen analizado está representada por el área bajo la curva de fuerza vs. desplazamiento. Con la información entregada por la máquina de ensayos, se calculó la energía disipada, dividiendo la curva correspondiente al espécimen C-03 en trapecios, calculando su área, y considerando hasta que el ángulo de flexión que presenta el espécimen ensayado sea como máximo 20° , aproximadamente 0.35 rad . Se ha considerado 20° como valor máximo del ángulo de flexión, para el cálculo de la energía pues un ángulo mayor convierte en inseguro y con consecuencias fatales el espacio donde eventualmente se pueden encontrar los pasajeros. Este procedimiento, para el cálculo de la energía de deformación, se empleará también en los especímenes que presenten refuerzos.

3.1.2. Determinación del ángulo de flexión

El ángulo de flexión se determina para cada par de datos entregado por la máquina de ensayos, el mismo se determina por geometría simple, como se muestra en la figura 10. La determinación del ángulo de flexión será la misma a emplearse cuando se trate de los especímenes con refuerzo.

3.1.3. Momento máximo

El momento máximo a considerar es el valor del momento cuando el espécimen comienza a fluir. Dicho valor se determina de la curva momento vs ángulo de flexión.

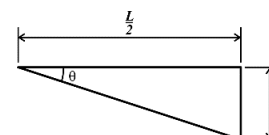


Figura 10. Ángulo de flexión, L: longitud entre apoyos, δ : deflexión del punto medio, θ : ángulo de flexión

3.1.4. Determinación de la curva momento vs ángulo de flexión

Con la información suministrada por la máquina de ensayos, se procedió a determinar la curva momento vs ángulo de rotación. Los resultados comparativos momento vs ángulo de rotación para los especímenes sin refuerzo C-01, C-02 y C-03 se muestran en la figura 11.

Las curvas correspondientes a los especímenes C-01 y C-02 presentan un comportamiento no esperado cuando ocurre la plastificación del espécimen, esto debido a la indentación que se produce en el mismo y el cual aprecia en la figura 10. En el espécimen C-01, la distancia entre los apoyos fue de 450 mm, mientras que en el espécimen C-02 esa distancia se varió a 465 mm. Se observa también, en la curva fuerza vs desplazamiento, que en este espécimen también se produce indentación. Finalmente, al establecer la distancia entre los apoyos a 480 mm, ensayo del espécimen C-03, obtenemos una curva esperada, y esta curva es la que usaremos para la comparación de los resultados de los ensayos de los especímenes con refuerzo.

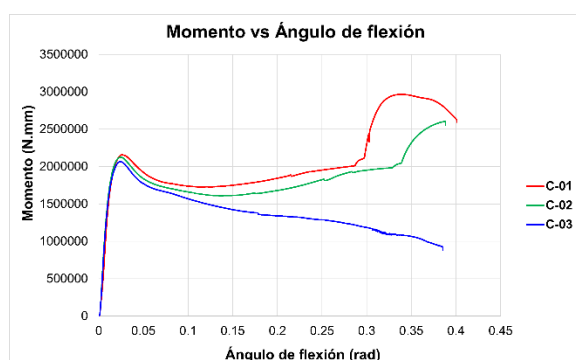


Figura 11. Gráfica comparativa – especímenes sin refuerzo.
Fuente: elaboración propia.

La energía de deformación absorbida y el momento máximo soportado por cada espécimen ensayado, determinados de acuerdo al método detallado, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Energía absorbida y momento máximo – Especímenes sin refuerzo.

Especímen	Energía (kJ)	Momento (N.m)
C-01	2817	2156
C-02	2286	2125
C-03	1600	2066

Fuente: elaboración propia.

3.2. Especímenes con refuerzo – l = 50 mm

En la figura 12 se muestran las curvas Momento vs. Ángulo de flexión correspondientes a los especímenes cuya longitud de refuerzo es 50 mm. Dichas curvas se compararán con la curva correspondiente al espécimen C-03 sin refuerzo.

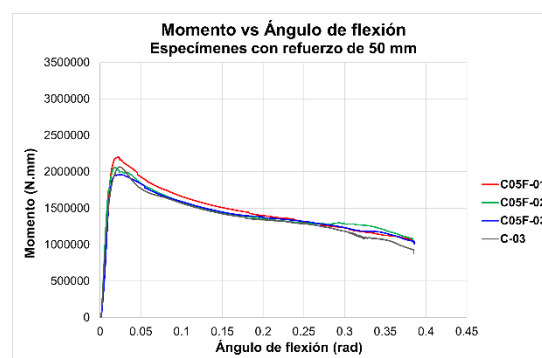


Figura 12. Gráfica comparativa – especímenes con refuerzo de 50 mm. Fuente: elaboración propia.

Al igual que la curva correspondiente al espécimen C-03, las curvas Momento vs. Ángulo de flexión correspondientes a los especímenes con refuerzo presentan la forma esperada, ninguna de ellas experimentó indentación que se observaron en los primeros especímenes ensayados. El espécimen C05F-01 ensayado se muestra en la figura 13.



Figura 13. Colapso presentado en el espécimen C05F-01.
Fuente: elaboración propia.

La energía de deformación absorbida y el momento máximo soportado se observa que es ligeramente mayor para el espécimen C05F-01 que para el espécimen sin refuerzo. Los valores para cada espécimen ensayado, se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Energía absorbida y momento máximo – Especímenes con refuerzo de 50 mm, (*) espécimen sin refuerzo.

Especímen	Energía (kJ)	Momento (N.m)
C05F-01	1615	2201
C05F-02	1597	2060
C05F-03	1545	1961
Promedio	1586	2074
C-03 (*)	1600	2066
Cambio (%)	-0.875	0.387

Fuente: elaboración propia.

Se observa que en promedio la energía absorbida es menor que la energía correspondiente al espécimen sin refuerzo, el momento si resulta siendo ligeramente

mayor. La diferencia en los resultados puede ser despreciada

3.3. Especímenes con refuerzo – l = 100 mm

Las curvas Momento vs. Ángulo de flexión para los especímenes con refuerzo de 100 mm se muestran en la figura 14.

En la figura 14 observamos que las curvas correspondientes a los especímenes con refuerzo soportan mayor momento y por consiguiente disipan mayor cantidad de energía comparadas con el espécimen sin refuerzo C-03. Asimismo, se observa para el espécimen C10F-03, curva en color azul, que presenta un pequeño salto en la zona elástica del diagrama, esto se debe a la falla del adhesivo con el cual se unió el refuerzo al espécimen. Los especímenes cuyas curvas Momento vs. Ángulo de flexión que se muestran en la figura 14, no presentaron indentación durante el ensayo, ello se refleja también en la forma de las curvas presentadas. El espécimen C10F-03, luego del ensayo, se muestra en la figura 15, donde se observa la forma en que colapsó.

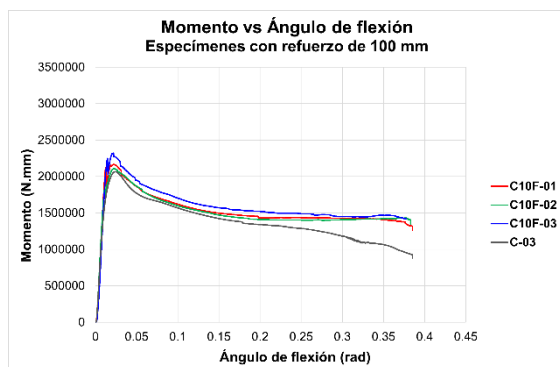


Figura 14. Gráfica comparativa – especímenes con refuerzo de 100 mm. Fuente: elaboración propia.



Figura 15. Colapso presentado en el espécimen C10F-03. Fuente: elaboración propia.

La energía de deformación absorbida y el momento máximo soportado por el espécimen sin refuerzo se observa que, es ligeramente menor para cualquier espécimen mostrado en la gráfica. Los valores para cada espécimen ensayado, se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Energía absorbida y momento máximo – Especímenes con refuerzo de 100 mm, (*) espécimen sin refuerzo.

Especímen	Energía (kJ)	Momento (N.m)
C10F-01	1701	2164
C10F-02	1659	2111
C10F-03	1773	2320
Promedio	1711	2198
C-03 (*)	1600	2066
Cambio (%)	6.938	6.389

Fuente: elaboración propia.

La energía absorbida en promedio es mayor que la energía correspondiente al espécimen sin refuerzo, el momento tiene un similar comportamiento. Los refuerzos de 100 mm ofrecen una ligera mejora respecto al espécimen sin refuerzo.

3.4. Especímenes con refuerzo – l = 150 mm

El tercer grupo de especímenes presentaba refuerzos de 150 mm de longitud. Las curvas Momento vs. Ángulo de flexión para estos especímenes se muestran en la figura 16.

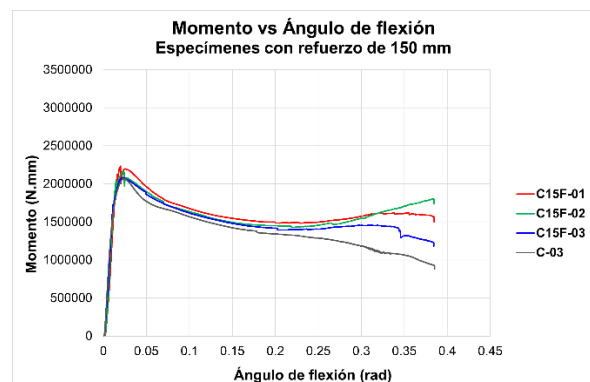


Figura 16. Gráfica comparativa – especímenes con refuerzo de 150 mm. Fuente: elaboración propia.

Los especímenes con refuerzo de 150 mm presentan un comportamiento ligeramente mejor que el espécimen sin refuerzo. La forma de las curvas indica que no se presentó indentación durante los ensayos. En la figura 17 se muestra el espécimen C15F-02, luego de realizado el ensayo correspondiente.



Figura 17. Colapso presentado en el espécimen C15F-02.
Fuente: elaboración propia.

La energía de deformación absorbida y el momento máximo que soportaron los especímenes en los ensayos se muestran en la tabla 5.

En promedio, tanto la energía absorbida como el momento máximo resultan ser mayores que los valores alcanzados por el espécimen C-03, el cual no presentó refuerzo.

Tabla 5. Energía absorbida y momento máximo – Especímenes con refuerzo de 150 mm, (*) espécimen sin refuerzo.

Especímen	Energía (kJ)	Momento (N.m)
C15F-01	1868	2233
C15F-02	1962	2168
C15F-03	1727	2081
Promedio	1852	2161
C-03 (*)	1600	2066
Cambio (%)	15.75	4.598

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

De los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

1. Se observa un incremento al ensayar los especímenes con refuerzo, si bien es cierto el incremento es pequeño, pero no deja de ser importante.
2. La resistencia y la capacidad para disipar energía de los especímenes se incrementa conforme se utilizan refuerzos de mayor longitud.
3. Durante los ensayos de los especímenes sin refuerzo, se tuvo que establecer la distancia entre los apoyos para evitar la indentación durante la plastificación del espécimen, finalmente esta se evitó al separar los apoyos del puente de flexión a 480 mm.
4. Los pequeños saltos que se muestran en las gráficas de Momento vs. Ángulo de flexión se deben a la falla de las fibras de carbono de los refuerzos adheridos en las alas de los especímenes ensayados.

A continuación, se citan trabajos que se encuentran en fase de desarrollo:

1. Diseño y ejecución de un programa de ensayos, que contemple el uso de tubos rectangulares y cuadrados, con refuerzos localizados en las almas y todo el perímetro.
2. Ejecución de un programa de ensayos con refuerzos de 200 mm de longitud, utilizando tubos cuadrados.
3. Empleo de otros adhesivos.

5. Agradecimientos

El presente trabajo fue desarrollado gracias a los fondos del Vicerrectorado de Investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú a través del proyecto PI0989 “Mejorando la seguridad en carreteras: Investigación y desarrollo de juntas y refuerzos multimateriales localizados para incrementar la resistencia al impacto en estructuras vehiculares”. Se agradece el apoyo en la ejecución de los ensayos del Centro de Innovación Tecnológica Privado CITE materiales, perteneciente a la sección Mecánica de la facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

6. Referencias

- [1] Kecman, Bending collapse of rectangular and square section tubes, Int. J. Mech. Sci. 25 (9–10) (1983) 623–636.
[http://dx.doi.org/10.1016/0020-7403\(83\)90072-3](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7403(83)90072-3).
- [2] Kecman, Bending Collapse of Rectangular Section Tubes in Relation to the Bus Roll over Problem (Ph.D. thesis), Cranfield Institute of Technology, 1979.
- [3] Mamalis, A. G., Manolacos, D. E., Demosthenous, G. A., & Johnson, W. (1991). Axial plastic collapse of thin bi-material tubes as energy dissipating systems. International Journal of Impact Engineering, 11(2), 185–196.
[https://doi.org/10.1016/0734-743X\(91\)90005-Z](https://doi.org/10.1016/0734-743X(91)90005-Z)
- [4] Shin, K. C., Lee, J. J., Kim, K. H., Song, M. C., & Huh, J. S. (2002). Axial crush and bending collapse of an aluminum/GFRP hybrid square tube and its energy absorption capability. Composite Structures, 57(1–4), 279–287.
[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00094-6)
- [5] Steeves, C. A., & Fleck, N. A. (2004). Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: Analytical models and minimum weight design. International Journal of Mechanical Sciences, 46(4),

561–583.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.04.003>

[6] Steeves, C. A., & Fleck, N. A. (2004). Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: Experimental investigation and numerical modelling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(4), 585–608.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.04.004>

[7] Lee, S. H., Kim, C. W., & Choi, N. S. (2006). Bending collapse behaviors and energy absorption characteristics of aluminum-GFRP hybrid tube beams. *Key Engineering Materials*, 326-328 II, 1825–1828. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.326-328.1825>

[8] Zhang, X., Zhang, H., & Ren, W. (2016). Bending collapse of folded tubes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 117, 67–78.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.07.016>

[9] Huang, Z., Zhang, X., & Yang, C. (2020). Experimental and numerical studies on the bending collapse of multi-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes. *Composites Part B: Engineering*, 181, 107527. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107527>

[10] Daniel Lavayen-Farfan, Jose Butenegro Garcia, Maria Jesus L. Boada, Miguel Angel Martinez, Jorge Rodriguez Hernandez. Theoretical and experimental study of the bending collapse of partially reinforced CFRP-Steel square tubes. *Thin-Walled Structures* (2022).