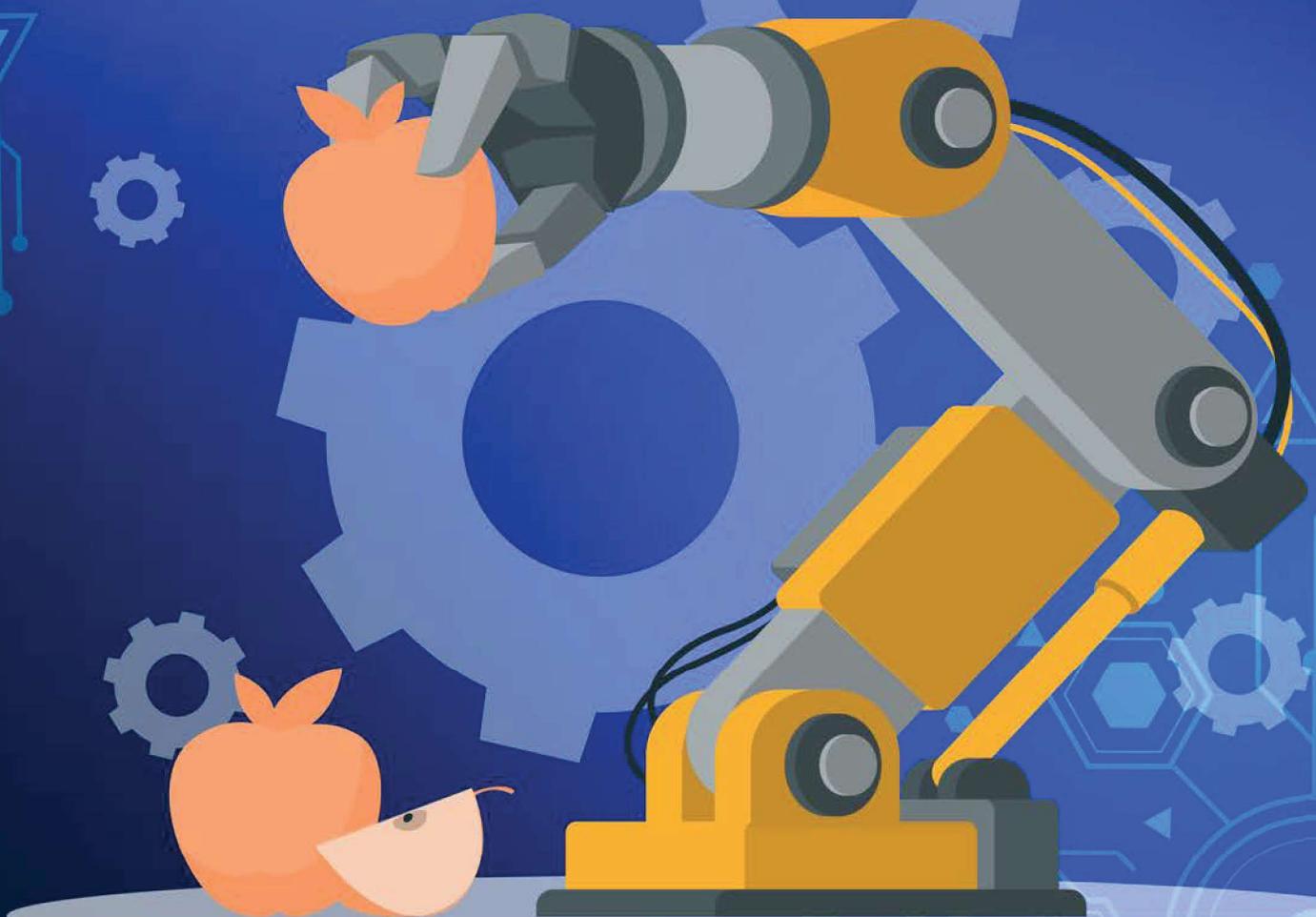


# TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Enero-Junio 2023

Vol. 6/ Núm. 1

ISSN: En trámite



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

**cenidet**<sup>®</sup>  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Evaluación numérica de la absorción de energía de perfiles de base cuadrada bajo cargas de flexión

Quirino Estrada\*, Dariusz Szwedowicz\*\*, Elva Reynoso\*, Jesús Silva Aceves\*, Lara Wiebe\*, Juan Misael Martínez\*

\*Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Ciudad Juárez, Chihuahua México ([quirino.estrada@uacj.mx](mailto:quirino.estrada@uacj.mx), [elva.reynoso@uacj.mx](mailto:elva.reynoso@uacj.mx), [jesilva@uacj.mx](mailto:jesilva@uacj.mx), [lara.wiebe@uacj.mx](mailto:lara.wiebe@uacj.mx), [al183089@alumnos.uacj.mx](mailto:al183089@alumnos.uacj.mx))

\*\*Departamento de Ingeniería Mecánica, TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México ([dariusz.sd@cenidet.tecnm.mx](mailto:dariusz.sd@cenidet.tecnm.mx))

Resumen: Los choques laterales representan una de las principales causas de decesos en pasajeros debido a la falla prematura por flexión de componentes estructurales. A partir de lo anterior el presente artículo evalúa la capacidad de absorción de energía de perfiles con base cuadrada a través de un ensayo de flexión de tres puntos. Durante el estudio se evaluaron siete configuraciones de perfiles cuadrangulares fabricados con aluminio 6063-T5 utilizando el software Abaqus. Para cada estructura se calcularon los principales indicadores de resistencia al impacto y se compraron con los obtenidos para un perfil cuadrado típico. Los resultados indicaron un aumento de la absorción de energía de los perfiles reforzados hasta en un 22.15%. Sin embargo, la mejor eficiencia de la fuerza de aplastamiento se calculó para la estructura CC con un valor de CFE de 0.76.

*Keywords:* Estructuras tubulares, sección cuadrada, método de elemento finito, flexión tres puntos.

### 1. INTRODUCCIÓN

El diseño estructural de los componentes automotrices y en general del chasis es de suma importancia desde que deben brindar rigidez, así como proteger a los ocupantes durante colisiones (Wang, D. et al., 2022). En este sentido es necesario absorber la mayor cantidad a través de la deformación plástica controlada (Ferdynus, M. et al., 2020). Por consiguiente, se han realizado esfuerzos para aumentar la eficiencia de la absorción de energía de perfiles estructurales sujetos a cargas axiales (Rogala, M. et al., 2021), flexionantes (Huang, Z. et al., 2020), (Zhang, X. et al., 2016), oblicuas (Tran, T. 2020), entre otras. Para el caso especial de perfiles a flexión, su estudio se ha incrementado desde que múltiples componentes automotrices tales como pilares B, barras de seguridad en puertas y estribos son sometidos a este tipo de cargas (Ghadianlou, A. et al., 2013). Li, Z. et al. (2021) evaluó el colapso a flexión de tubos de pared delgada rectangulares y su aplicación en el diseño estructural de automóviles. Durante el estudio los perfiles rectangulares propuestos se evaluaron experimental, teórica y numéricamente. Adicionalmente a través de un proceso de optimización se concluyó la efectividad de los perfiles propuestos para el diseño automotriz. Por su parte Xie, Z. (2020) compararon la resistencia a la flexión de perfiles cuadrados con diferentes refuerzos internos. Como conclusión se incrementó la capacidad de flexión de todos los perfiles respecto a un perfil cuadrado típico. En otro trabajo Estrada, Q. et al. (2022) evaluaron el efecto de platos de reforzamiento en perfiles, así como el efecto de la relación de aspecto. El mejor desempeño de CFE se obtuvo al aplicar refuerzo horizontal a un perfil elíptico. Estrada, Q. et al. (2021)

evaluaron el efecto de las restricciones de sujeción de los extremos de perfiles cuadrados. Los resultados mostraron un impacto directo del modo de empotramiento, fuerza de ensamble y longitud de las almohadillas de sujeción en la absorción de energía. El mejor desempeño de CFE (0.78) se obtuvo al colocar almohadillas externas en los extremos del perfil. Por su parte Fu, X. et al. (2022) evaluaron el colapso a flexión de tubos arqueados. La evaluación de los perfiles se realizó a través de una prueba de flexión de tres puntos. Como resultado se determinó la efectividad de los tubos arqueados al incrementar hasta cinco veces la absorción de energía respecto a un tubo recto. Tal y como se ha demostrado, el estudio de perfiles estructurales a flexión se ha incrementado. Sin embargo, los estudios relacionados a este tipo de cargas son menores respecto al análisis axial. Por tanto, el presente artículo evalúa el efecto del reforzamiento de perfiles cuadrados de forma numérica utilizando el software Abaqus. Para tal objetivo diversas configuraciones de refuerzos fueron propuestas y evaluadas a través de un ensayo de flexión de prueba de tres puntos.

### 2. INDICADORES DE RESISTENCIA AL IMPACTO

La evaluación de los perfiles estructurales se realizó a través del estudio de las curvas fuerza vs desplazamiento a partir de las cuales se obtuvieron los indicadores de resistencia al impacto tales como: carga pico (Pmax), absorción de energía (Ea), fuerza promedio (Pm), absorción de la energía específica (SEA) y eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE). Un valor de CFE es óptimo cuando es igual a 1 (Tang, T. et al 2016). Detalles de los indicadores se muestran en la Figura 1.

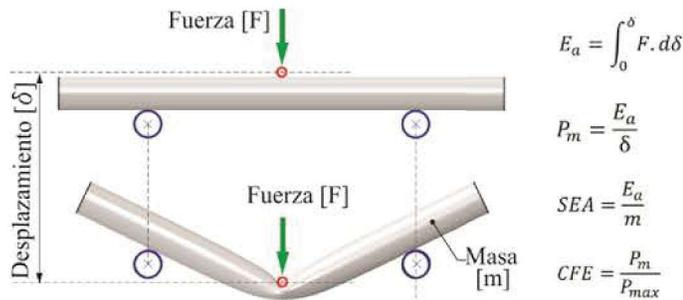


Fig. 1. Indicadores de absorción de energía y nomenclatura, donde F es la fuerza y  $\delta$  el desplazamiento.

### 3. MODELO DISCRETO DE UNA PRUEBA DE FLEXIÓN DE TRES PUNTOS: VALIDACIÓN

La exactitud de los resultados numéricos del presente artículo debe de garantizarse. Por tanto, se desarrolló un primer modelo discreto de una prueba de flexión de tres puntos y se validó experimentalmente. El modelo consta de un perfil cuadrado de 38.3 mm x 38.3 mm de lado, una longitud de 400 mm y un espesor de 1.4 mm. El perfil cuadrado se modeló con elementos S4R con propiedades elastoplásticas para aluminio 6063-T5 definidas con módulo de Young de 66.94 MPa, coeficiente de Poisson de 0.33, densidad de 2700 kg/m<sup>3</sup> y esfuerzo de fluencia se 158.79 MPa (Vergara, J. et al., 2019). Los elementos del banco de flexión, soportes y punzón se modelaron con elementos rígidos R3D4. Las condiciones de contacto se modelaron con un coeficiente de fricción de 0.3. Con el objeto de optimizar y en congruencia con el análisis de convergencia de malla se obtuvo un tamaño de elemento de 5 y 2.5 mm para la región central. Detalles del modelo discreto se muestran en la Figura 2.

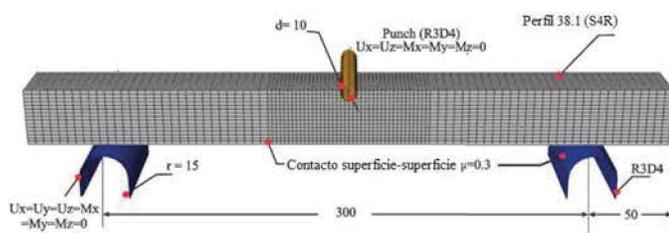


Fig. 2. Modelo discreto: ensayo de flexión de tres puntos.

Los resultados experimentales y numéricos se muestran en las Figuras 3 y 4 para la fuerza curva vs desplazamiento y el modo de colapso a flexión, respectivamente. La Figura 3, muestra en ambos modelos un aumento súbito de la fuerza hasta alcanzar un valor cercano a 5.7 kN, posteriormente un decaimiento suave hasta estabilizarse en un valor de 3 kN. Por su parte la congruencia en el modo de deformación entre modelos se observa en la Figura 4.

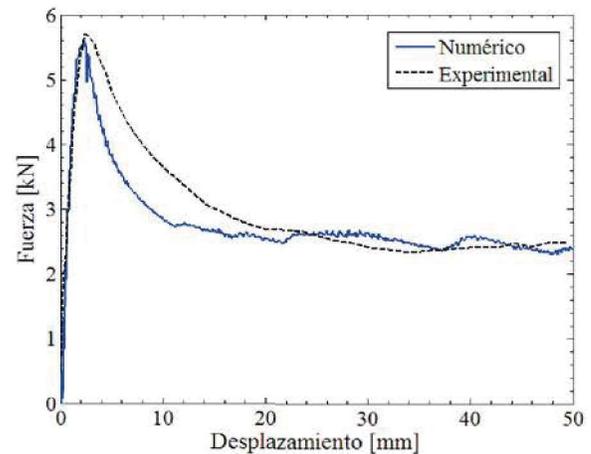


Fig. 3. Fuerza de flexión vs desplazamiento.

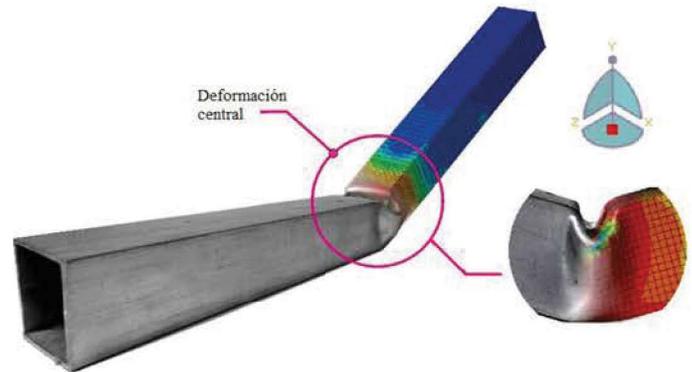


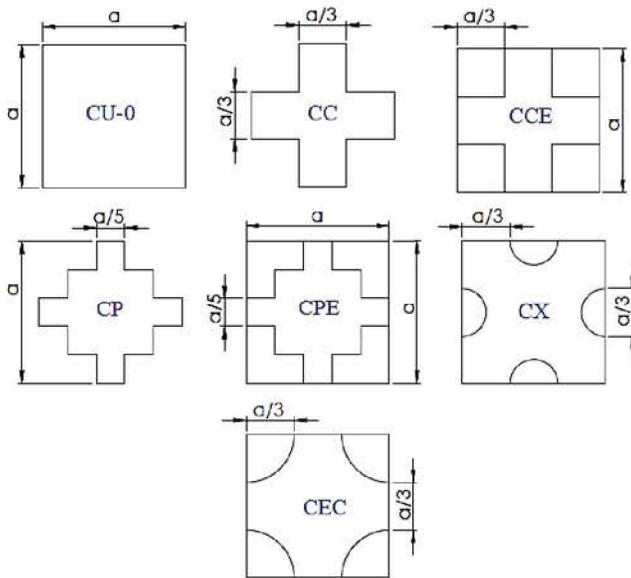
Fig. 4. Comparación del modo de colapso a flexión.

La validación del modelo discreto se corroboró desde que se calculó una diferencia menor del 5% entre ambos modelos para la carga pico y fuerza promedio. Por tanto, es posible continuar con el análisis paramétrico solo en forma computacional de los perfiles cuadrados con refuerzo.

### 4. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE PERFILES DE BASE CUADRADA CON REFUERZOS

El presente artículo plantea reforzar perfiles estructurales cuadrados con el objeto de incrementar la eficiencia en la absorción de energía. Para tal objetivo se presentan siete estructuras con diferentes configuraciones de reforzamiento incluyendo un perfil cuadrado típico (CU-0). Los perfiles se evaluaron a través de un ensayo de flexión de tres puntos a 2 mm/min. La prueba se realizó con un desplazamiento final de 80 mm. En todos los casos los perfiles fueron fabricados con aluminio 6063-T5 y presentan una misma masa igual a 0.288 gr y longitud de 400 mm. Por tanto, ajustes en los espesores de estos fueron considerados. Un resumen de las características de los perfiles evaluados se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructuras evaluadas, donde a igual a 38.3 mm



Código	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Masa (kg)
CU-0	1.40	400	0.288
CC	1.40	400	0.288
CCE	0.83	400	0.288
CP	1.40	400	0.288
CPE	0.77	400	0.288
CX	0.92	400	0.288
CEC	0.92	400	0.288

### 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS REFORZADAS

La Figura 5 presenta el comportamiento de la fuerza de flexión. Adicionalmente se presenta los resultados para un perfil simple cuadrado (CU-0). En todos los casos se presenta similitud en la forma de la curva. Sin embargo, en algunos casos se observó una forma exponencial suave de la fuerza, especialmente para los perfiles CC y CP. Los valores de Pmax están dentro del rango de 5.8 a 3.2 kN.

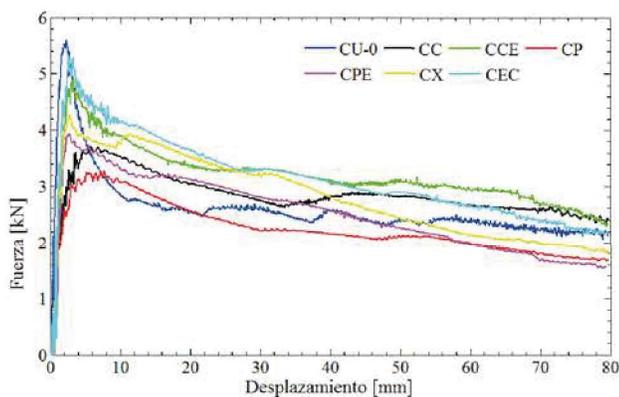


Fig. 5. Comparación de curvas esfuerzo-deformación.

A partir de la integración del área bajo la curva fuerza-desplazamiento se calculó la energía absorbida ( $E_a$ ) por deformación plástica de los perfiles. La Figura 6 muestra la comparación de  $E_a$  obtenido. Descartando el valor de  $E_a$  para los perfiles con base de cruz fractal (CP y CPE) todos los perfiles exhibieron un aumento de  $E_a$  respecto a un perfil simple (CU-0). Los valores de energía absorbida están comprendidos entre 175 J a 250 J aproximadamente.

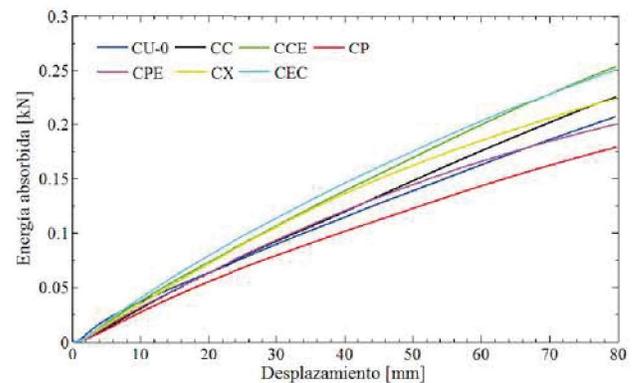


Fig. 6. Energía absorbida por perfiles estructurales.

Tal y como se ha indicado la absorción de energía se obtiene por la deformación plástica de las estructuras. En este sentido los refuerzos definieron la forma de colapso de los perfiles. Las Figuras 7 y 8 muestran el modo de deformación el cual es principalmente caracterizado por la formación de una indentación central con lóbulos exteriores. Para los casos de perfiles no delimitados por un cuadrado (CX y CP), la deformación de lóbulos exteriores aumentó.

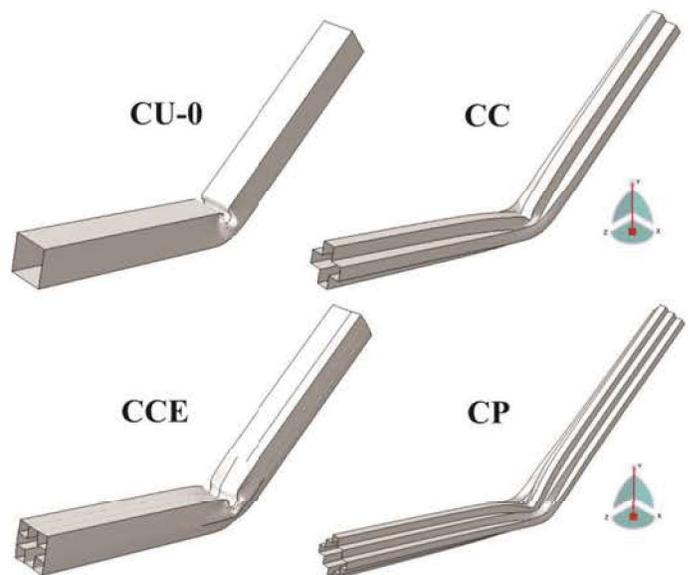


Fig. 7. Modo de colapso final de perfiles evaluados I.

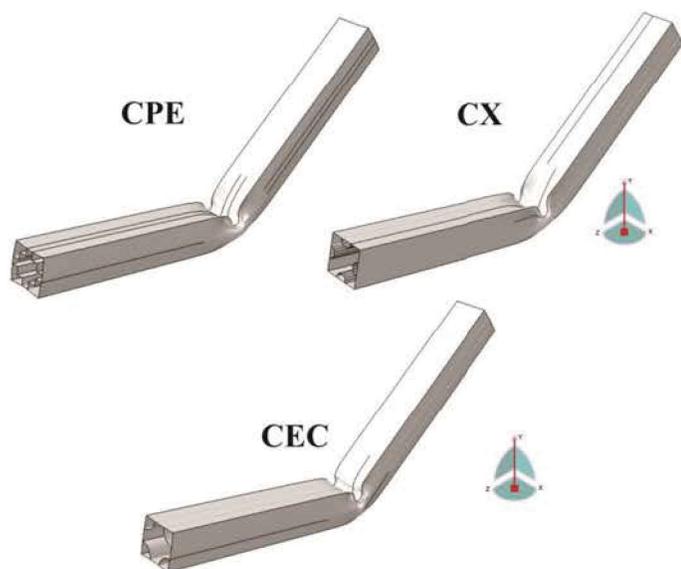


Fig. 8. Modo de colapso final de perfiles evaluados II.

La cuantificación del desempeño mecánico de los perfiles estructurales se realizó a través del cálculo de los indicadores de resistencia al impacto (ver Fig. 1). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2. En todos los casos los resultados presentados son comparados para un perfil sin refuerzo (CU-0). La máxima resistencia a la flexión se obtuvo con el perfil reforzado con semicírculos en las esquinas (CEC) con 5.35 kN y la menor fue para el perfil fractal (CP) con 3.26 kN. Considerando la fuerza promedio (Pm) el mejor desempeño se calculó para la estructura en forma de cruz (CCE) con un valor de 3.16 kN. Respecto a la absorción de energía (Ea) y sin considerar los perfiles CP y CPE las estructuras reforzadas mejoraron la Ea en un rango de entre 8.28-22.15%. Físicamente esto demuestra una mayor deformación plástica. La mayor Ea se obtuvo para el perfil en forma de cruz encapsulado en un cuadrado (CCE) con 252.89 J. Este valor fue confirmado al calcularse también para este perfil la mayor absorción de energía específica (SEA) con 0.878 J/gr.

Tabla 2. Resultados para perfiles evaluados

Código	Pmax (kN)	Pm (kN)	Ea (J)	SEA (J/gr)	CFE
CU-0	5.63	2.58	207.02	0.718	0.458
CC	3.72	2.82	225.83	0.784	0.760
CCE	4.91	3.16	252.89	0.878	0.643
CP	3.26	2.23	178.97	0.621	0.684
CPE	3.93	2.49	199.43	0.692	0.633
CX	4.27	2.80	224.18	0.778	0.655
CEC	5.35	3.09	247.50	0.859	0.577

El parámetro de eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) representa uno de los más importantes indicadores de resistencia al impacto. En este sentido la CFE relaciona la carga pico con la fuerza promedio. El valor óptimo esperado es igual a 1 lo cual

indicaría que la fuerza pico se mantendría a lo largo del proceso de flexión sin decaer. En este sentido todas las estructuradas evaluadas presentaron una mejora en el valor de CFE respecto al perfil tipo CU-0 en un rango de 25.98-65.93%. El valor más bajo de CFE igual a 0.577 se calculó para la estructura reforzada con semicírculos en las esquinas (CEC). El mejor desempeño se obtuvo con la estructura con refuerzo en forma de cruz CC con un valor de CFE igual a 0.76. Tal valor indica una menor diferencia entre los valores de Pmax y Pm. Físicamente la estructura absorbe gran cantidad de energía y al momento del impacto se reduce considerablemente la aceleración. Por tanto, la geometría en forma de cruz sin cuadrado exterior (CC) se recomienda para su implementación en el diseño de componentes automotrices sujetos a cargas de flexión como por ejemplos barra de seguridad en puertas.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se diseñó y evaluó numéricamente a través de una prueba de flexión de tres puntos siete perfiles de base cuadrada con diferentes configuraciones de reforzamiento. A partir del análisis numérico realizado se concluye lo siguiente:

1. Los refuerzos en el perfil cuadrado determinaron el modo de colapso de las estructuras. Por tanto, definen parámetros tales como resistencia a la flexión y energía absorbida.
2. Se obtuvo una mayor resistencia a la flexión cuando se refuerza el perfil cuadrado respecto a los perfiles fractales simples (CC y CP).
3. Respecto a la energía absorbida (Ea) y considerando que todas las estructuras presentan la misma masa (288gr), y a excepción de las estructuras fractales (CP y CPE), todas las estructuras con refuerzo presentaron un incremento en Ea y en la absorción de energía específica (SEA) de entre 8.28-22.15%.
4. Todas las estructuras propuestas presentaron un incremento de la eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE) respecto a una estructura cuadrada típica (CU-0). La mejora de CFE fue de entre 25.98-65.93%.
5. El mejor desempeño de CFE se calculó para el perfil en forma de cruz (CC) con un valor máximo de 0.76. Por tanto, tal geometría debería considerarse para el diseño de estructuras automotrices sujetas a flexión.
6. Los resultados obtenidos pueden ser válidos para análisis dinámicos si se considera la insensibilidad al endurecimiento por velocidad del aluminio 6063-T5.

## REFERENCIAS

- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Tran, T., Rodriguez-Mendez, A., Elias-Espinosa, M., Gómez-Vargas, O. A., & Partida-Ochoa, G. (2022). Bending crashworthiness of elliptical

- tubes with different aspect ratio and stiffeners. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(9), 6661-6680.
- Estrada, Q., Vergara-Vázquez, J., Szwedowicz, D., Rodríguez-Mendez, A., Gómez-Vargas, O. A., Partida-Ochoa, G., & Ortiz-Domínguez, M. (2021). Effect of end-clamping constraints on bending crashworthiness of square profiles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 3115-3134.
- Ferdynus, M., Rozylo, P., & Rogala, M. (2020). Energy absorption capability of thin-walled prismatic aluminum tubes with spherical indentations. *Materials*, 13(19), 4304.
- Fu, X., Zhang, X., & Yu, Q. (2022). Bending collapse of optimal arched thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 180, 109828.
- Ghadianlou, A., & Abdullah, S. B. (2013). Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts. *Thin-Walled Structures*, 67, 25-33.
- Huang, Z., & Zhang, X. (2020). Crashworthiness and optimization design of quadruple-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes under transverse bending. *Composite Structures*, 235, 111753.
- Li, Z., Tian, Y., Bai, J., & Zuo, W. (2021). Bending collapse of treble rectangular thin-walled tubes and its application in conceptual design for automobile crashworthiness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(5), 1269-1284.
- Rogala, M., Ferdynus, M., Gawdzińska, K., & Kochmański, P. (2021). The Influence of Different Length Aluminum Foam Filling on Mechanical Behavior of a Square Thin-Walled Column. *Materials*, 14(13), 3630.
- Tang, T., Zhang, W., Yin, H., & Wang, H. (2016). Crushing analysis of thin-walled beams with various section geometries under lateral impact. *Thin-Walled Structures*, 102, 43-57.
- Tran, T. (2020). Study on the crashworthiness of windowed multi-cell square tubes under axial and oblique impact. *Thin-Walled Structures*, 155, 106907.
- Vergara, J. (2019). Disipación de energía por deformación plástica en estructuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas a flexión. *Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada*
- Wang, D., Li, S., & Xie, C. (2022). Crashworthiness optimisation and lightweight for front-end safety parts of automobile body using a hybrid optimisation method. *International Journal of crashworthiness*, 27(4), 1193-1204.
- Xie, Z. (2020, July). A comparison of bending resistance of square thin-walled tubes with different internal reinforcements. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 892, No. 1, p. 012118). IOP Publishing.
- Zhang, X., Zhang, H., & Wang, Z. (2016). Bending collapse of square tubes with variable thickness. *International Journal of Mechanical Sciences*, 106, 107-116.