

Disipación de energía por deformación plástica en estructuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas a flexión

Julio C. Vergara*. Dariusz Szwedowicz*. Quirino Estrada**.
Ulises Jaen*. Miguel Domínguez*. Saulo Landa*.

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. Palmira S/N, C.P. 62490 Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos.
e-mail. julio.vergara17ma, d.sz, migueldominguez16m, ulises.jaen19me, saulojesuslandaf@cenidet.edu.mx}

** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Av. Plutarco Elías Calles Num. 1210, C.P 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. e-mail: quirino.estrada@uacj.mx

Resumen: En el siguiente trabajo se estudia el comportamiento de la disipación de energía empleando perfiles de pared delgada bajo cargas a flexión. Se utiliza un perfil de sección cuadrada de aluminio 6063-T5, con el cual se desarrolló el modelo discreto utilizando el software Abaqus/Explicit. Inicialmente se presenta el análisis paramétrico de la variación de la sección transversal utilizando una sección triangular, cuadrada, circular y hexagonal, para posteriormente realizar el análisis de perfiles de sección compuesta la cual presenta una mejor disipación de energía de alrededor de un 42%.

Keywords: Impacto lateral, prueba de tres puntos, perfiles de pared delgada, disipación de energía.

1. INTRODUCCIÓN

La colisión por impacto lateral es uno de los desafíos de seguridad más difíciles que enfrenta la industria automotriz en la actualidad, (Townsend, J., Kaczmar, M., & Mohamed, E.-S, 2002). El uso de perfiles de pared delgada como dispositivos de absorción de energía, aplicados a la seguridad y protección de los pasajeros, requiere satisfacer dos condiciones: reducción de la carga máxima y la maximización de la disipación de energía, (Szwedowicz et al, 2014). En los casos de los impactos laterales en los vehículos, la prueba de flexión a tres puntos caracteriza el impacto lateral, inicialmente Alexander, (1960), inicio los estudios de flexión en los cuales obtiene una fórmula para calcular la fuerza de aplastamiento en perfiles de pared delgada. Wierzbicki & Abramowicz, (1983), Abramowicz & Jones, (1986), estudiaron los efectos de la disipación de energía por deformación plástica de manera estática y dinámica. El uso de los perfiles de pared delgada en los impactos laterales presentados en la industria automotriz ha utilizado diversas variaciones con el cambio de material (Lim & Lee, 2002), multicelulares (Z. Wang, Li, & Zhang, 2016), espumas metálicas (Fang, Gao, Sun, Zhang, & Li, 2014), sección compuesta (Fu & Liu, 2019). Asimismo se han desarrollado diversos estudios realizando diversas aplicaciones; Husin, Lile, & Yaacob, (2012), estudiaron el efecto de la barra de seguridad de un automóvil empleando un perfil circular mediante el software de LS-DYNA, las variables consideradas dentro del estudio fueron el diámetro y el espesor. Ghadianlou & Abdullah, (2013), realizo el estudio

de la barra de seguridad considerando diferentes materiales (Aluminio, magnesio y acero), así como variación geométrica (perfiles multicelulares y perfiles de sección compuesta), los resultados mostraron un mejor comportamiento con el uso de perfiles de acero con perfiles multicelulares. Ghadianlou, (2012), desarrollo el análisis del daño presentado de una puerta considerando una prueba de la Estándar Federal de Seguridad de Vehículos Motorizados (FMVSS por sus siglas en inglés) No. 214, se realizaron modificaciones geométricas en la barra de seguridad utilizando perfiles de sección multicelular, los resultados presentaron un mejor comportamiento en el perfil de tres células en sentido horizontal. Estrada et al. (2018), analizo una barra de seguridad empleando un perfil de aluminio EN AW-7108T6, utilizando criterios de falla, así como el uso de perfiles multicelulares.

El siguiente artículo se presenta el análisis numérico de la disipación de energía en perfiles de pared delgada de aluminio 6063-T5. La validación del modelo discreto se realizó con una prueba de flexión de tres puntos, continuando con el estudio paramétrico; iniciando con la variación de la sección transversal para posteriormente evaluar los perfiles de sección compuesta.

2. INDICADORES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.

Para estudiar el comportamiento de los perfiles de pared delgada y conocer la absorción de energía que se origina por el colapso plástico se emplea el término resistencia al impacto (*Crashworthiness*) (Jones, 2011). Los parámetros que representan la disipación de energía se presentan en a siguientes ecuaciones (Sun, 2015). La energía de absorción E_A , es

representada por la energía cinética del impacto que es absorbida por la estructura, la cual se presenta por el trabajo realizado por la fuerza de aplastamiento F . δ_f y δ_i refiere al desplazamiento final e inicial respectivamente.

$$E_A = \int_{\delta_i}^{\delta_f} F ds \quad (1)$$

Se denomina absorción específica de energía (SEA) a la energía absorbida E_A por cierta masa unitaria [m] de la estructura que es sometida al aplastamiento.

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

La eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE , por sus siglas en inglés) es la relación entre la fuerza de aplastamiento promedio (P_m) y la fuerza máxima de aplastamiento (P_{max}), la CFE se determina por.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (3)$$

La CFE es el parámetro que permite evaluar el rendimiento de absorción de energía en un elemento estructural. Idealmente un valor igual a 1 de CFE produce una curva fuerza-deformación constante, (Estrada et al., 2016). La fuerza promedio es definida por la relación de la energía absorbida (E_A) en función del desplazamiento (δ).

$$P_m = \frac{E_A}{\delta} \quad (4)$$

3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

Para conocer las propiedades reales del material y con la finalidad de obtener información necesaria para el modelo discreto se realizaron pruebas a tensión, para ello se usaron probetas estandarizadas con base a la especificación ASTM E8. El desarrollo de la prueba de tensión se realizó utilizando la máquina universal Shimadzu AG-X plus 100kN empleando una velocidad de 2 mm/min , además del uso de un extensómetro Épsilon 3542-050M-050-ST (longitud calibrada de 50 mm), el montaje de la probeta y el extensómetro se muestra en la figura 1.



Fig. 1. Prueba de tensión de perfil 6063-T5.

Los resultados obtenidos de las pruebas de tensión permiten obtener los parámetros mecánicos, los cuales se presentan en la tabla 1, mientras que el comportamiento mecánico del aluminio 6063-T5 se representa en la curva de esfuerzo-deformación (ver figura 2).

Tabla 1. Parámetros mecánicos del aluminio 6063-T5.

Material	Módulo de Young (E) [GPa]	Módulo de cedencia (Sy) [MPa]	Coefficiente de Poisson (ν)	Densidad (ρ) (kg/m ³)
Al 6063-T5	66.94	158.79	0.33	2700

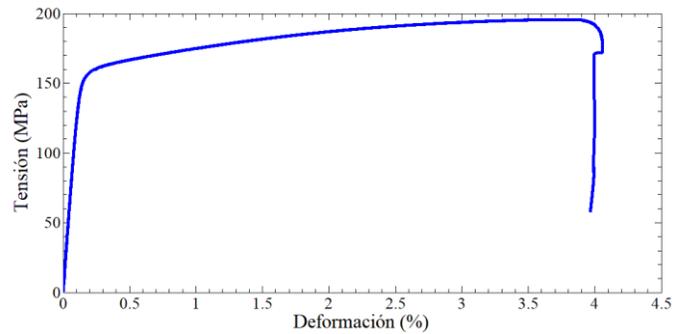


Fig. 2. Curva de esfuerzo-deformación de aluminio 6063-T5.

4. VALIDACION DE MODELO DISCRETO.

Los impactos laterales son representados por una prueba de flexión a tres puntos, de esta manera se realizó la prueba experimental la cual permitió obtener la validación del modelo discreto.

4.1 Prueba experimental

La prueba de flexión a tres puntos se realizó utilizando un perfil cuadrado de $38.3 \times 38.3 \text{ mm}$, con una longitud de 500 mm , con un claro de 300 mm y una masa de 0.290 kg con un espesor de 1.4 mm . Durante la prueba se utilizó la máquina universal modelo Shimadzu AG-X plus 100kN considerando una velocidad en el indentador 6 mm/min , con un desplazamiento de 50 mm , la prueba experimental se muestra en la Figura 3.



Fig. 3. Prueba de flexión de tres puntos.

4.2. Descripción del modelo discreto

El modelo discreto se realizó usando el software Abaqus/Explicit, las condiciones de la frontera se muestran en la figura 4. El modelo discreto considera el perfil como un material deformable utilizando elementos S4R, mientras que los soportes y el indentador se consideraron como componentes discretamente rígidos utilizando elementos R3D4. Se utilizó un coeficiente de fricción de $\mu = 0.3$ (Tang, Zhang, Yin, & Wang, 2016) entre las superficies del perfil y los soportes así como en el indentador (Surface to Surface) y un contacto general (General Contact) de $\mu = 0.15$, (Estrada et al., 2018) entre todos los elementos que integran el modelo, se consideró un tamaño de malla de 2.5 mm.

La validación del modelo discreto se realiza utilizando la carga pico (P_{max}) y la energía de absorción (E_a). Los resultados obtenidos se presentan en la figura 5. Mientras que los estados finales de deformación del perfil se presentan en la figura 6.

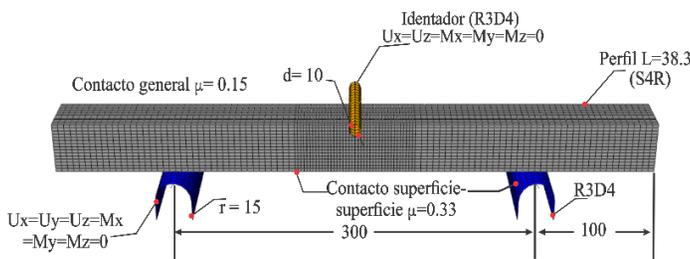


Fig. 4 Modelo discreto.

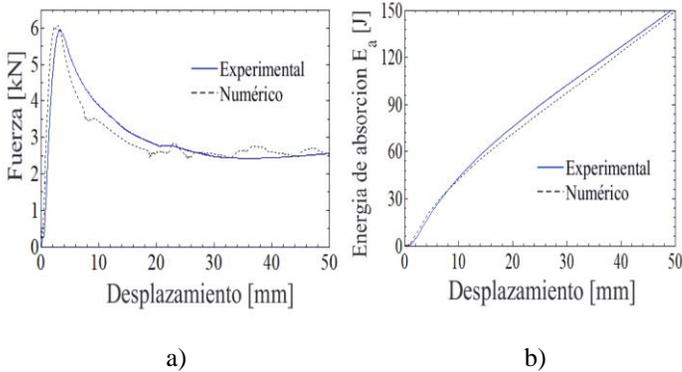


Fig. 5 Validación de modelo discreto donde, a) curva fuerza-desplazamiento, b) curva energía de absorción -desplazamiento.

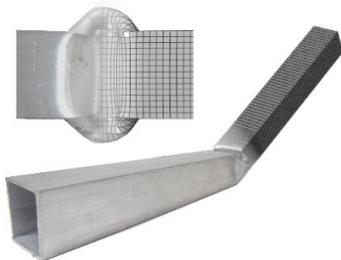


Fig. 6 Estado final de deformación del perfil.

La comparación de los resultados obtenidos de manera numérica como experimental presentan una diferencia menor al 5%, de esta se manera se valida el modelo discreto permitiendo continuar con el análisis paramétrico.

5. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

5.1 Análisis de variación de sección transversal

Al obtener la validación del modelo discreto se realiza el estudio de la variación de la sección transversal, las secciones evaluadas son: triangular, hexagonal y circular, tomando como referencia la geometría cuadrada. Las dimensiones y características de las secciones se presentan en la tabla 2, considerando una masa igual en todas las secciones evaluadas.

Tabla 2. Variación de sección transversal.

Modelo	Sección	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Masa (kg)
S-T	Triangular	1.4	500	0.290
S-C-1	Cuadrado	1.4	500	0.290
S-H	Hexagonal	1.4	500	0.290
S-C	Circular	1.4	500	0.290

Al someter las secciones a condiciones de flexión de tres puntos, se obtuvieron las curvas de fuerza- desplazamiento, presentadas en la figura 7, los resultados obtenidos son similares a los presentados por Estrada et al. (2018).

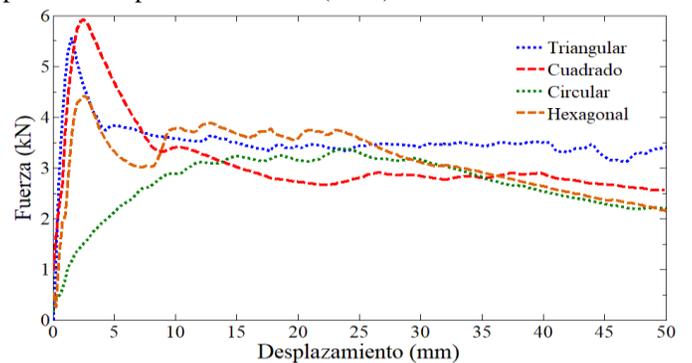


Fig. 7. Curva fuerza-desplazamiento de perfiles de diferente sección transversal.

En la figura 7, se observa el comportamiento de las secciones evaluadas, en el caso del perfil triangular (S-T), cuadrado (S-C-1), y hexagonal (S-H), presentan una recta al inicio de la prueba la cual se debe a la zona elástica del material, llegando hasta la carga máxima donde indica la transición de la zona elástica a la zona plástica, a partir de este punto inicia una fase en la cual el perfil presenta una resistencia a la carga de manera plástica, comportándose de manera decreciente conforme avanza el

desplazamiento. En el caso del perfil circular (S-C), presenta un comportamiento similar iniciando con una parte elástica, mientras que la línea de bisagra se presentara al ángulo de rotación, el cual es menor en función de los perfiles poligonales, de esta forma se presenta un cambio de sección lo cual permite moderar la carga máxima, después de este punto la carga inicia su disminución en función del desplazamiento.

Los estados finales de deformación se muestran en la figura 8, mientras que los parámetros de disipación de energía de los perfiles evaluados se presentan en la Tabla 3.

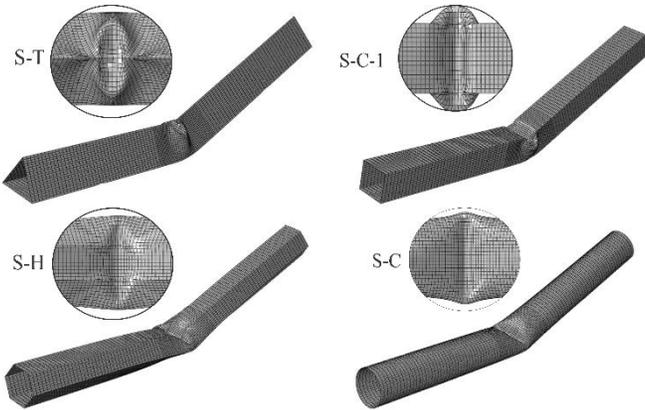


Fig. 8. Estados finales de deformación de perfiles de variación geométrica.

Tabla 3. Valores disipación de energía de análisis de sección transversal.

Sección	P_{max} [kN]	P_m [kN]	E_a [J]	SEA [J/kg]	CFE [-]
S-T	5.55	3.52	175.88	606.48	0.51
S-C-1	5.97	3.10	154.95	534.31	0.52
S-H	4.42	3.15	157.58	543.38	0.71
S-C	3.37	2.70	134.76	464.29	0.80

En los resultados se observa que el valor máximo de la carga pico (P_{max}) se presenta en la sección S-C-1 (5.97 kN), esto es debido a que el aumento de la carga máxima está influenciado por la sección transversal del perfil, en el caso de la sección cuadrada presenta mayor rigidez, la cual es manifestada como la resistencia generada por las protuberancias formadas en las esquinas. En el caso de los perfiles S-T, S-H, la carga máxima se redujo debido a la menor generación de protuberancia. De los resultados obtenidos se puede determinar que el perfil S-C muestra una mejor disipación de energía al obtener un mejor valor de CFE (0.80), lo cual equivale a un mejoramiento de un 35% con respecto al perfil cuadrado. Siendo el perfil circular el perfil con mejor disipación de energía.

5.2 Análisis de perfiles de sección compuesta.

Con base a los resultados mostrados en la sección 5.1 permite utilizar el perfil circular, como geometría base para el desarrollo de los perfiles de sección compuesta, los perfiles compuestos

analizados se muestran en la tabla 4, en las cuales se considera una misma masa en todas las secciones.

Tabla 4. Perfiles de sección compuesta.

Modelo	Díametro (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Masa (kg)
S-CT	48.8	0.772	500	0.290
S-CC	48.8	0.738	500	0.290
S-CH	48.8	0.716	500	0.290

El comportamiento de los perfiles de sección compuesta se presenta en la curva fuerza-desplazamiento (Ver, figura 9). Los parámetros de disipación de energía se muestran en la tabla 5.

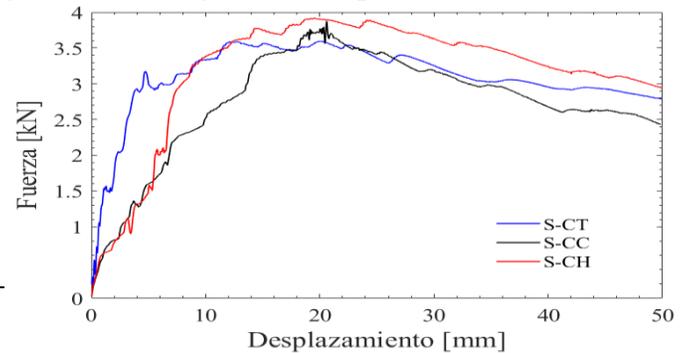


Fig. 9. Curva fuerza-desplazamiento de perfiles de sección compuesta

Tabla 5. Valores disipación de energía de perfiles de sección compuesta

Sección	P_{max} [kN]	P_m [kN]	E_a [J]	SEA [J/kg]	CFE [-]
S-CT	3.59	3.09	154.29	532.03	0.86
S-CC	3.87	2.73	136.43	470.45	0.70
S-CH	3.92	3.17	158.29	545.83	0.81

Con base en la figura 9, se observa el comportamiento de la carga pico (P_{max}), la cual se mantiene en todos los perfiles debido al uso de la sección circular, como sección base. En el caso del perfil S-CC presenta una reducción en la disipación de energía, la cual se debe por la reducción en el espesor del perfil, que se ve reflejado en baja capacidad de carga aun cuando se insertó refuerzo en la parte en el interior de la sección circular. En el caso de los perfiles S-CH y S-CT presentan una mejor disipación de energía lo cual representa una mayor resistencia a la formación de línea de bisagras, líneas estacionarias y de movimiento, lo anterior se debe a los refuerzos colocados, siendo el perfil S-CH el que presenta una mayor energía de absorción, sin embargo el perfil S-CT presenta una mejor disipación de

energía debido a un mejor valor de CFE (0.86). Con base a los criterios de resistencia al impacto un valor cercano a 1 representa un sistema óptimo.

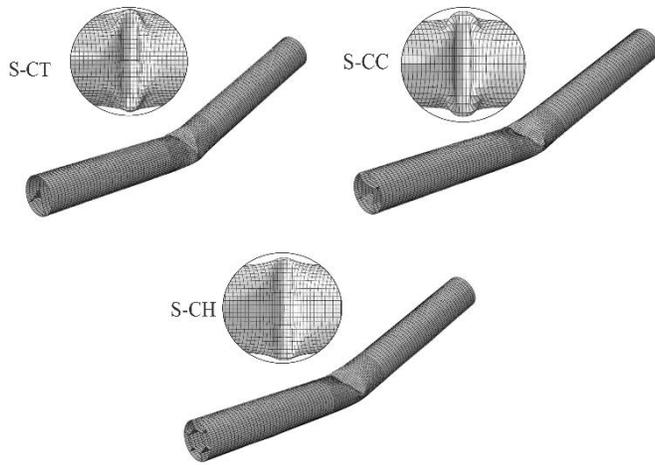


Fig. 8. Estados finales de deformación perfiles de sección compuesta

Los resultados obtenidos permiten realizar una comparación entre los perfiles analizados en este trabajo, observando los valores de CFE, se determinó que el perfil SC-T brinda una mejor disipación de energía en comparativa con los perfiles SC-C y SC-H con 0.18% y 0.13% respectivamente. Evaluando el comportamiento del perfil SC-T y el perfil inicial de análisis S-C-1, se observa una mejora de 7.5% y 35% en la disipación de energía respectivamente en comparación con el perfil base S-C.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se corroboró el uso de secciones de perfil compuesto como elementos que mejoran las capacidades de absorción de energía, asimismo se puede determinar que:

1. Se corroboró el modelo discreto desarrollado en el software Abaqus/Explicit; obtuvo una validación con una diferencia menor al 5% con respecto a los resultados experimentales.
2. Al realizar el análisis paramétrico de la variación de la sección transversal se determinó que el perfil S-C, considerando los valores de CFE mejora la disipación de energía de alrededor del 35% en comparación con el perfil S-C-1.
3. Los resultados obtenidos de CFE de la evaluación de los perfiles de sección compuesta indican que el perfil S-CT presenta una mejor disipación de energía, con un 7.5% con respecto al perfil S-C y un 42.5% con respecto al perfil S-C-1.

7. REFERENCIAS

- Abramowicz, W., & Jones, N. (1986). *Dynamic progressive buckling of circular and square tubes*. International Journal of Impact Engineering, 4(4), 243–270.
- Alexander, J. M. (1960). *An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading*. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 13(1), 10–15.
- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Gutierrez-wing, E., Silva-Aceves, J., Rodriguez-Mendez, A., Elias-Espinosa, M., ... Bedolla-Henandez, J. (2018). *Energy absorption of single and multi-cell profiles under bending load considering damage evolution*.
- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Baltazar, M., Cortes, C., Majewski, T., & Estrada, C. A. (2016). *The performance of energy absorption in structural profiles with different discontinuities*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 84(5–8), 1081–1094.
- Estrada, Q., Szwedowicz, D., Silva-Aceves, J., Majewski, T., Vergara-Vazquez, J., & Rodriguez-Mendez, A. (2017). *Crashworthiness behavior of aluminum profiles with holes considering damage criteria and damage evolution*. International Journal of Mechanical Sciences, 131–132(May), 776–791.
- Fu, J., Liu, Q., Liufu, K., Deng, Y., Fang, J., & Li, Q. (2019). *Design of bionic-bamboo thin-walled structures for energy absorption*. Thin-Walled Structures, 135, 400–413.
- 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.
- Ghadianlou, A. (2012). *Low-speed crash optimization of vehicle side door beam under pole side impacts*, LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal.
- Husin, R. S. R., Lile, N. L. T., & Yaacob, S. (2012). *Optimization of Circular Side Door Beam for Crashworthiness Analysis*. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2(3), 256.
- Jones, N. (2011). *Structural impact*. Cambridge university press.
- Lim, T. S., & Lee, D. G. (2002). *Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes*. Composite Structures, 56(2), 211–221.
- Sun, G., Tian, X., Fang, J., Xu, F., Li, G., & Huang, X. (2015). *Dynamical bending analysis and optimization design for functionally graded thickness (FGT) tube*. International Journal of Impact Engineering, 78, 128–137.
- Szwedowicz, D., Estrada, Q., Cortes, C., Bedolla, J., Alvarez, G., & Castro, F. (2014). *Evaluation of energy absorption performance of steel square profiles with circular discontinuities*. Latin American Journal of Solids and Structures, 11(10), 1744–1760.
- 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.

Townsend, J., Kaczmar, M., & Mohamed, E.-S. (2002). *Modular door system for side impact safety of motor vehicles.* Proceedings of 17th international technical conference on the enhanced safety of vehicles., 1–6.

Wierzbicki, T., & Abramowicz, W. (1983). *On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures.* Journal of Applied Mechanics, 50(4a), 727.

Zhang, X., Zhang, H., & Wang, Z. (2016). Bending collapse of square tubes with variable thickness. International Journal of Mechanical Sciences, 106, 107–116.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

a

**Julio Cesar Vergara, Dariusz Szwedowicz, Quirino Estrada, Ulises
Jaen, Miguel Domínguez and Saulo Landa**

POR LA PRESENTACIÓN DEL ARTÍCULO TITULADO:
**“DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN
ESTRUCTURAS DE PARED DELGADA DE SECCIÓN
COMPUESTA BAJO CARGAS A FLEXIÓN”, DURANTE LA
3ra JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA.**

CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO, NOVIEMBRE 14 Y 15, 2019.

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA



DR. NOÉ ALEJANDRO CASTRO SÁNCHEZ
COORDINADOR GENERAL DE LA JORNADA

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

S. E. P.
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

