

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES FABRICADOS CON MALLAS DE METAL EXPANDIDO

Carlos Graciano ^{1*}, Gabriela Martínez ²

1: PhD en Ing. Estructural; Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Sede Medellín, Medellín, Colombia.

2: Dr. en Ingeniería, Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Apdo. 89000, Caracas 1080-A. Caracas, Venezuela.

* Contacto: cagracionog@unal.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se presentan los avances en el estudio de la capacidad de absorción de energía de elementos estructurales fabricados con mallas de metal expandido, sometidas principalmente a compresión axial. El estudio contempla tres formas de abordaje: (1) Experimental, en la que se construyeron y ensayaron probetas orientadas en diferentes direcciones; (2) Analítica, donde se propone un modelo teórico basado en la mecánica de estructuras aporricadas utilizando una aproximación de comportamiento rígido-plástico; y finalmente (3) Numérica, donde modelos computacionales sometidos a cargas de compresión se generaron, evaluaron y analizaron utilizando el método del elemento finito.

Palabras Clave: *Metal Expandido, Absorción de Energía, Mecanismo de Falla, Carga última*

ABSTRACT

This work presents the progress in the study of the energy absorption capacity of structural elements made of expanded metal meshes, subjected mainly to axial compression. The study covers three approaches: (1) Experimental, in which test specimens oriented in different directions were built and experimentally tested; (2) Analytical, where a theoretical model based on the mechanics of frame structures is proposed using an approximation of rigid-plastic behavior; and finally (3) Numerical, where computer models subjected to compressive loads were generated, evaluated and analyzed using the finite element method.

Keywords: *Expanded Metal, Energy absorption capacity, Failure mechanism, Ultimate load*

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen muchas aplicaciones ingenieriles en las cuales se buscan materiales que sean resistentes, livianos y ecológicos. En este sentido, las láminas de metal expandido aportan una solución a esta búsqueda [1-3]. Mediante un proceso de corte y estirado las láminas lisas de metal se pueden estirar hasta obtener láminas de metal expandido de diez veces su longitud inicial, esto hace que el material sea liviano y los desperdicios de material son mínimos. En este trabajo se presentan los resultados de investigaciones tanto experimentales como numéricas dirigidas al estudio de la capacidad de absorción de energía de elementos estructurales fabricados

con mallas de metal expandido. En primer lugar se muestran los resultados de una investigación experimental orientada a la determinación de los mecanismos de colapso de tubos de sección cuadrada y circular, fabricados con estas mallas y sometidos a cargas de compresión axial. Los resultados demuestran que el mecanismo de falla de estos tubos depende de la orientación de las celdas de metal expandido, reconociéndose sin embargo dos mecanismos de falla bien diferenciados, uno controlado y estable de interés para aplicaciones que requieran un colapso gradual típico de aplicaciones que requieran absorción de energía por deformación plástica. El otro mecanismo es más inestable, típico de elementos estructurales sensibles a las imperfecciones geométricas iniciales. Una vez mostrados los mecanismos de falla, se presenta un modelo analítico para la determinación de la carga última de los tubos basado en la formación de rotulas plásticas en los nodos que unen las celdas de las mallas de metal expandido, los resultados obtenidos con esta correlación muestran una buena correlación con los obtenidos experimentalmente. Finalmente se presenta un estudio numérico, basado en el método de los elementos finitos, que permite la utilización de tubos concéntricos para aumentar la capacidad de absorción de energía utilizando las mallas de metal expandido.

2 ESTUDIO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y Métodos

El metal expandido fue fabricado y suministrado por la empresa Maboca C.A. La Tabla 1, muestra la nomenclatura de la malla de metal expandido utilizada en este trabajo, cuyas dimensiones generalmente se presentan en láminas de 1,20 m x 2,44 m, en una amplia variedad de calibres (Figura 1a). Las especificaciones comerciales del acero seleccionado se muestran en la misma tabla.

Tabla 1. Especificaciones de la geometría de la malla de metal expandido

Designación ASTM	Código	Símbolo	Denominación	Celda [mm]		Vena[mm]		Calibre
				l_1	l_2	t	w	
ASTM-A569	0110791	H-26	2" Hierro Corriente	89,6	44,2	3,00	3,20	10

Fuente: <http://www.maboca.com> (2007)

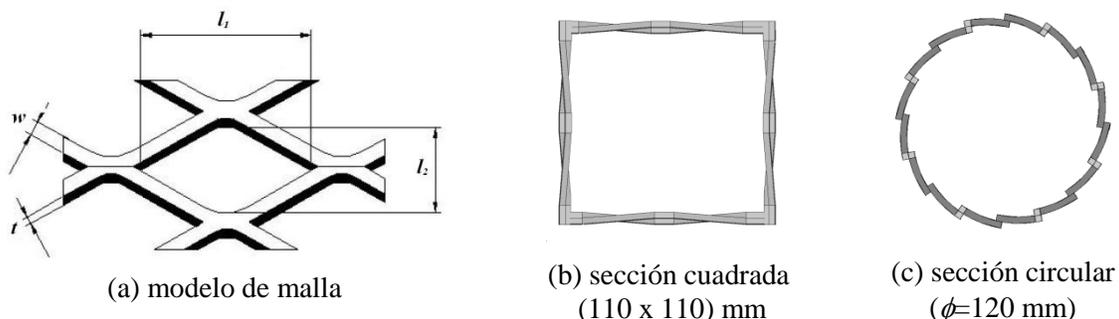


Figura 1. Geometría de las probetas

Se realizaron ensayos experimentales a fin de investigar el comportamiento de las mallas de metal expandido sometidas a compresión axial, se obtuvieron las curvas de carga-desplazamiento de dos (02) modelos con diferentes secciones transversales. El Modelo “A” con sección transversal cuadrada de 110x110 mm por lado (Figura 1b) y el Modelo “B”, de sección transversal circular con un diámetro exterior de 120 mm (Figura 1c).

Las orientaciones fueron estudiadas para los ángulos $\alpha=0^\circ$, 30° , 45° , 60° y 90° ; siendo el ángulo $\alpha=0^\circ$ la dirección definida cuando el eje mayor es paralelo al plano horizontal de referencia (Figura 2).

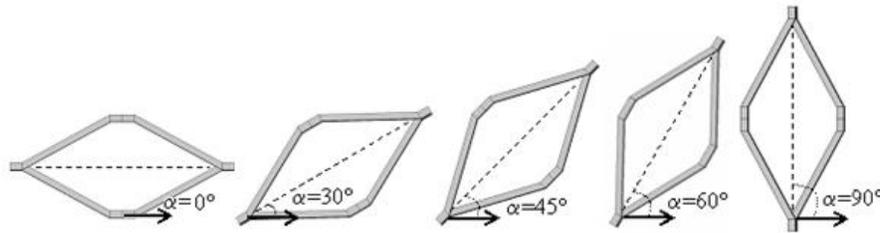


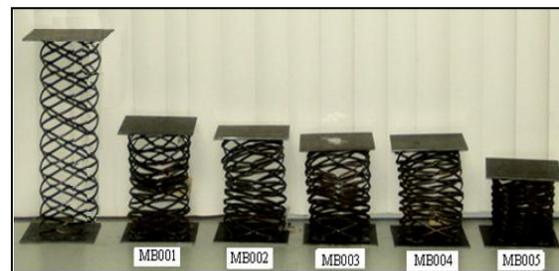
Figura 2. Orientaciones estudiadas en los ensayos experimentales

2.2 Resultados

De los experimentos se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento para las cinco (5) orientaciones de probetas ensayadas. Además, para describir los diversos mecanismos de colapso plástico generados en cada uno de los modelos estudiados, se analizaron parámetros de comportamiento estructural tales como la *energía absorbida*, la *carga media de colapso* y la *eficiencia estructural*, para caracterizar de manera integrada la capacidad de absorción de energía por deformación plástica de estos elementos. La Figura 3 muestra las deformaciones residuales para los tubos de sección circular con $\alpha=0^\circ$ y $\alpha=90^\circ$, respectivamente.



(a) sección cuadrada $\alpha=0^\circ$



(b) sección circular $\alpha=0^\circ$

Figura 3. Resultados experimentales para las probetas

Adicionalmente, la Figura 4 muestra las curvas carga desplazamiento para ambas configuraciones. Los resultados para el resto de las configuraciones se encuentran explicados ampliamente en [4]. Estos resultados demuestran que estos elementos estructurales pueden tener dos posibles aplicaciones dependiendo de la orientación del eje mayor del patrón de metal expandido. En una, con el eje mayor horizontal ($\alpha=0^\circ$), la respuesta es más estable y de interés para aplicaciones que requieran un colapso gradual y estable típico de aplicaciones que requieran de absorción de energía ($\alpha=90^\circ$). El colapso se caracteriza por la formación de rotulas plásticas

en los nodos. En la otra, la capacidad de carga es mayor y la respuesta es más inestable típica de elementos estructurales sensibles a imperfecciones geométricas iniciales.

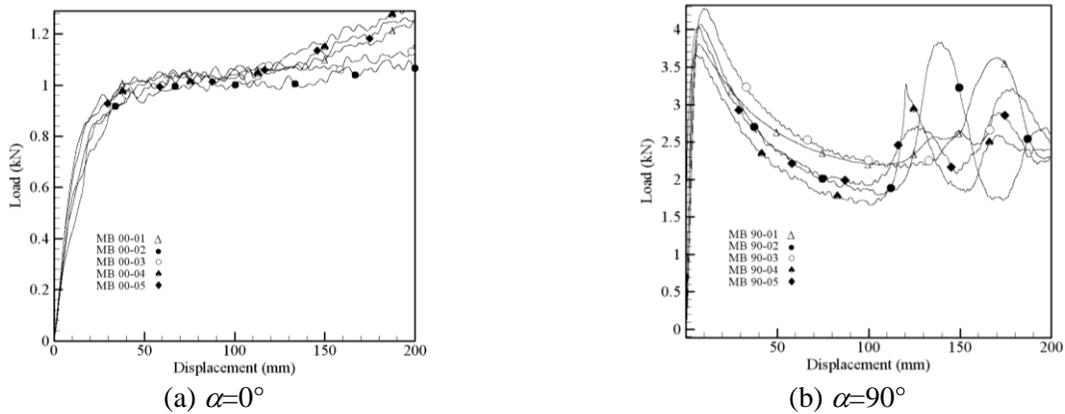


Figura 4. Curvas carga-desplazamiento para tubos de metal expandido

3 ESTUDIO ANALÍTICO

Hasta ahora se han mostrado los avances en la evaluación de las mallas de metal expandido a través de métodos experimentales. Sin embargo, se evidenció la necesidad de orientar la investigación al desarrollo de modelos analíticos que describan el comportamiento mecánico de este material. Esto permitirá al usuario hacerse una idea bastante aproximada de valores como la carga última sin la necesidad de elaborar un modelo experimental o numérico.

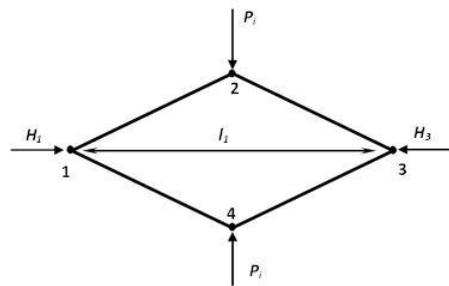


Figura 5. Modelo analítico de celda de metal expandido

Basados en esa premisa, Graciano et al. [5] propusieron un modelo analítico para el cálculo de la carga última y la energía de deformación por la acción de cargas compresivas. En el mencionado trabajo se presenta un modelo analítico basado en la mecánica de estructuras aperturadas utilizando una aproximación de comportamiento rígido-plástico (Figura 5). Cada una de las celdas que constituye la malla de metal expandido es comparada con un pórtico en cuyos nodos se forman rótulas plásticas.

Considerando una celda de metal expandido, la carga máxima es obtenida cuando se forman rótulas plásticas en los nodos 1 a 4 (Figura 5) de cada celda del segmento central del tubo. Por lo tanto, la carga de falla P puede calcularse mediante la siguiente expresión

$$P = \frac{N}{2} P_i \quad (1)$$

En la ecuación (1), N es el número total de nodos en una fila circunferencial en el segmento central del tubo; y P_i es la carga bajo la cual se forman cuatro rótulas plásticas en una sola celda

$$P_i = \frac{8M_P}{l_1} \quad (2)$$

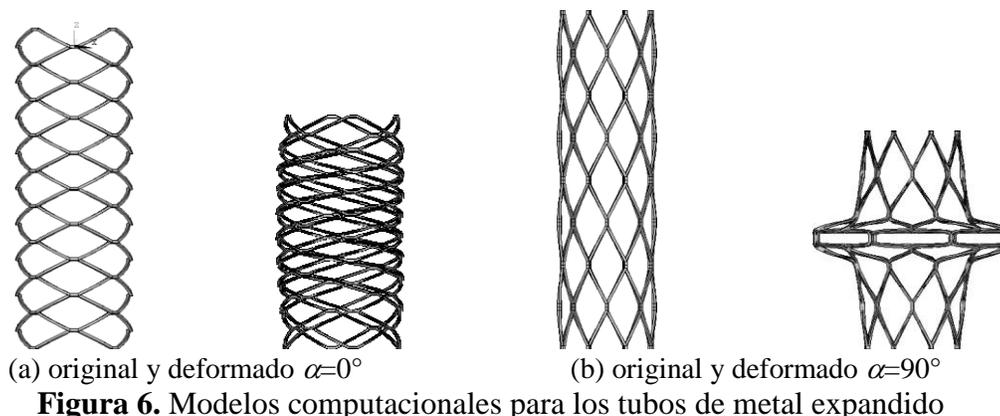
Sustituyendo la expresión para el momento plástico $M_P = S_y w t^2/4$ en la ecuación (2), obtenemos

$$P_i = \frac{2S_y w t^2}{l_1} \quad (3)$$

donde S_y es el esfuerzo de fluencia del material. Este valor de P_i representa una solución límite inferior para la carga máxima de una celda. Los resultados obtenidos [5] revelan que la aproximación rígido plástica es válida para estimar la carga última en elementos estructurales fabricados con mallas de metal expandido y la energía absorbida por deformación en los mismos. Asimismo, se puede concluir, con basamento en esta investigación, que la configuración geométrica de la celda individual determina el modo de colapso del elemento estructural.

4 EVALUACIÓN NUMÉRICA

Una vez generada la información que nos permite calibrar los modelos computacionales y habiendo establecido un modelo analítico para la determinación de la carga última, se procedió a realizar una detallada evaluación paramétrica de las geometrías circulares sometidas a compresión [5,6]. El fin último de esta evaluación numérica es determinar, de forma rápida y precisa, la capacidad de disipación de energía de diferentes configuraciones de metal expandido, tanto en forma individual como combinada. La Figura 6 muestra las dos geometrías estudiadas con los modelos computacionales desarrollados con el método de los elementos finitos.



Una vez validado el modelo numérico [7] se decidió llevar a cabo un estudio sobre la capacidad de absorción de energía de tubos concéntricos. La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos en este análisis.

Observando los resultados presentados en la Tabla 3, es importante resaltar que de acuerdo a la ecuación (1) y en base a los resultados obtenidos experimentalmente existe una relación lineal entre la carga última y el número de celdas.

Tabla 3. Resultados obtenidos con el modelo numérico para tubos concéntricos [7]

Modelo					
No. de Celdas	8	15	21	26	33
F_{total} (kN)	2120	3996	5616	6981	8945
$F_{teó}$ (kN) Ec.(1)	1929	3616	5063	6268	7955
E_{abs} (kJ)	0,31	0,59	0,83	1,03	1,32

5 CONCLUSIONES

De los estudios presentados en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

Elementos estructurales fabricados con mallas de metal expandido poseen un gran potencial en aplicaciones ingenieriles que requieran la absorción de energía por deformación plástica del material. El análisis rígido plástico basado en la formación de rótulas plásticas en los nodos es una herramienta válida para aproximar la carga última y la energía absorbida en elementos estructurales de metal expandido sometidos a compresión. El análisis explícito a través de MEF proporciona resultados consistentes y precisos para la relación carga-desplazamiento de probetas circulares de metal expandido. La orientación de la celda en el metal expandido es un factor determinante tanto para la respuesta estructural como para la carga última en las probetas estudiadas.

6 REFERENCIAS

1. Smith, D.; Graciano, C.; Martínez, G. "Recent Patents on Expanded Metal." Recent Patents on Material Science. Vol. 2(3), pp. 209-225, 2009.
2. Graciano, C.; Martínez, G. "Aplicaciones Estructurales de Láminas de Metal Expandido." Modalidad: Invitada. XVIII Jornadas de la Ingeniería Estructural en Colombia y VI Jornadas de Estructuras Metálicas. Bogotá, Colombia. Septiembre, 2009.
3. Graciano, C.; Rojas, S.; Martínez, G. "Toward the implementation of expanded metal in Load-carrying members." Memorias del III Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras. CD. Acapulco, México, Octubre, 2008.
4. Graciano, C.; Martínez, G.; Smith, D. "Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes." Thin-Walled Structures, Vol. 47, pp. 953-961, 2009.
5. Graciano, C.; Martínez, G.; Gutiérrez, A. "Failure mechanism of expanded metal tubes under axial crushing." Thin-Walled Structures, Vol. 51, pp. 20-24, 2012.
6. Graciano, C.; Gutiérrez, A.; Martínez, G. "Modelo analítico para la determinación de la resistencia última de estructuras de metal expandido sometidas a compresión axial." Memorias de VII Jornada de Estructuras Metálicas - Perfiles conformados en Frío o Lámina Delgada CD. pp. 1-8. Bogotá, Colombia, Noviembre, 2010.
7. Martínez, G.; Graciano C.; Teixeira P., "Energy Absorption of Axially Crushed Expanded Metal Tubes", Thin-Walled Structures, Vol. 71, pp. 134-146, 2013.