

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MALLAS DE METAL EXPANDIDO SOMETIDAS A TRACCIÓN

Gabriela Martínez¹, Carlos Graciano¹, Euro Casanova¹, Orlando Pelliccioni¹

¹ *Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Apdo. 89000, Caracas 1080-A, Venezuela.*

E-mail: gabrielamb@usb.ve

RESUMEN

En la actualidad se buscan configuraciones estructurales, nuevas o ya existentes, livianas y resistentes que puedan absorber grandes cantidades de energía por deformación plástica. En este sentido las mallas de metal expandido se presentan como una alternativa. En este trabajo se estudia el comportamiento estructural de mallas de metal expandido sometidas a tracción. Las mallas de metal expandido se forman mediante un proceso de corte y estirado produciendo celdas en formas de diamante. Estas celdas se definen mediante los dos ejes del rombo. Este estudio se realiza en dos etapas: experimental, en la que se generan y ensayan probetas orientadas en diferentes direcciones con respecto al eje mayor; y numérica, donde se generan modelos computacionales que reproducen los ensayos experimentales. Los resultados numéricos se contrastan con los resultados experimentales. Se presentan curvas carga-desplazamiento para cada configuración, probando la notable influencia de la orientación del eje mayor de las celdas en la respuesta estructural de las mismas.

Palabras clave: Láminas de Metal Expandido, Absorción de Energía.

BEHAVIOUR OF ESTRUCTURAL MESHES OF EXPANDED METAL UNDER TRACTION LOADS

ABSTRACT

Currently, there is a need for new structural configurations that are able to absorb large amounts of energy by plastic deformation. In this regard, expanded metal sheets are an alternative. In this paper, the structural behavior of expanded metal sheets subjected to tensile loading is investigated in depth. Expanded metal sheets are fabricated by a cutting and slitting process producing a diamond like cell. These cells are defined by two axes. This paper is conducted in two phases: the first one, generating and testing experimental models in different directions with respect to the major axis; and the second one, generating computational numerical models which reproduce the experimental tests. The numerical results were contrasted with the experimental results. Load-displacement curves for each configuration are presented, showing the significant influence of the major axis orientation in the structural response of the model.

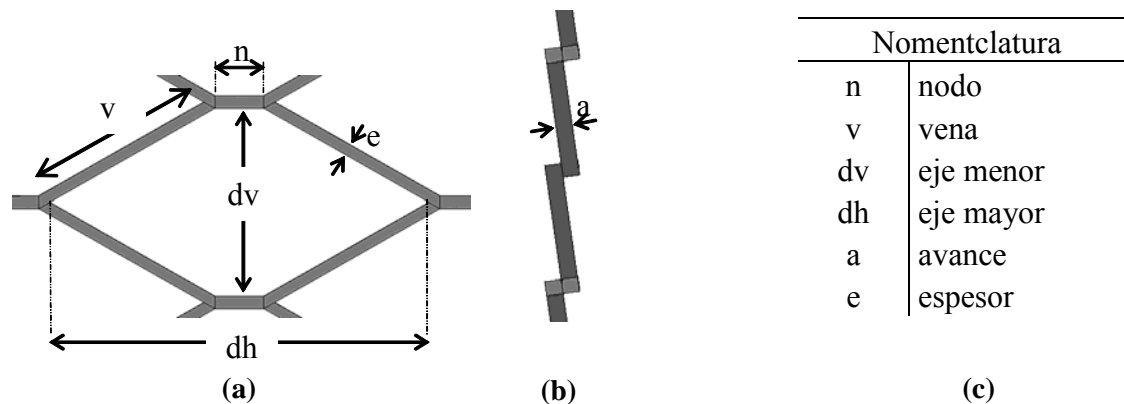
Keywords: Expanded Metal Sheets, Energy Absorption.

1. INTRODUCCIÓN

El metal expandido es un material en forma de malla fabricado a partir de una lámina de metal lisa, sometida a un proceso de conformado de corte-estirado que da como resultado un modelo de celda en forma de diamante (Figura 1). Los procesos de corte y deformación plástica producidos en esta lámina permiten generar un área final de hasta diez (10) veces su tamaño inicial y reducir su peso por metro cuadrado hasta en un 80% en comparación con las láminas sólidas (Sánchez y Graciano, 2005). Debido a que el proceso de manufactura de estas láminas es generalmente económico y las mismas pueden ser

cortadas fácilmente, es común encontrar este tipo de mallas en diversas formas y aplicaciones (Mulder, 2005).

Este tipo de material ha sido utilizado desde hace más de 100 años. Entre los distintos usos se destaca el uso del metal como componente estructural (Storck, 1894; Gauffin y. Hellsten, 1985), como mecanismo disipador de energía (Carroll y otros, 2000; Bergey, 2003) e incluso como dispositivo biomédico para la reparación de fracturas óseas (Ersek, 1973). Sin embargo, sigue siendo muy limitado el conocimiento sobre el comportamiento estructural del material al ser sometido a diversos tipos de cargas y condiciones de contorno.



**Figura 1. Geometría de un diamante de la malla (celda),
(a) vista frontal, (b) vista lateral, (c) nomenclatura**

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar el comportamiento a tracción de las mallas de metal expandido, para ello se realizaron ensayos con este material en diferentes orientaciones. Una vez realizados los ensayos experimentales, se generaron modelos no lineales en elementos finitos para cada orientación. En el estudio numérico, se seleccionó el tipo de elemento más adecuado y se realizaron los estudios de convergencia pertinentes. Finalmente, los modelos computacionales fueron validados contra los resultados experimentales.

2. ENSAYOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los procedimientos utilizados para el estudio del comportamiento de mallas de metal expandido ensayadas en diferentes orientaciones con respecto al eje mayor de la celda (Figura 1). Con esto se pretende estudiar experimentalmente el comportamiento estructural de las mallas de metal expandido al ser sometidas a cargas de tracción en diferentes direcciones.

2.1 Materiales y Métodos

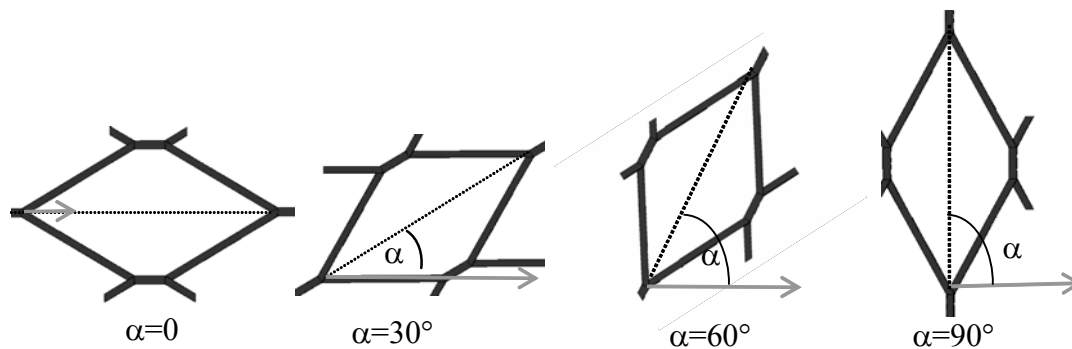
El metal expandido fue fabricado y suministrado por la empresa Maboca C.A. (www.maboca.com.ve) La Tabla 1, muestra la designación de las mallas de metal expandido utilizadas en este trabajo, cuyas dimensiones generalmente se presentan en láminas de 1,20 m x 2,44 m, en una amplia variedad de calibres. Las especificaciones comerciales del acero seleccionado se muestran en la misma Tabla.

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

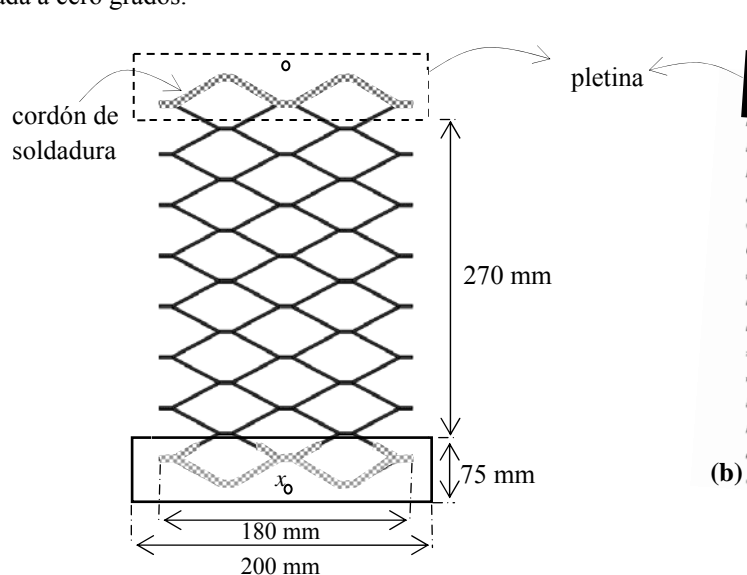
Tabla 1. Especificaciones técnicas del acero ASTM-A569.

Designación ASTM	Código	Símbolo	Nombre	Tamaño Interno del diamante [mm]		Medida de las venas [mm]		Calibre
				dh	dv	e	a	
ASTM-A569	0110791	H-26	2" Hierro Corriente	89.6	44.2	3.00	3.20	10

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

**Figura 2. Orientaciones estudiadas en los ensayos experimentales.**

Las mallas fueron soldadas en sus extremos sobre una pletina de acero rígida de dimensiones 200x100x3 [mm], esto con el fin de minimizar la concentración de esfuerzos en el punto de aplicación de las cargas, la altura libre promedio fue de 270 mm y el ancho libre varió entre 170 y 180 mm (Figura 3). La soldadura se realizó por arco eléctrico, con electrodos E6013 de 3/32" diámetro. Para ello se utilizó una máquina *Miller Electric MFG*, Modelo 250 AC/DC. La Figura 3 muestra esquemáticamente una probeta orientada a cero grados.

**Figura 3. Dimensiones de las probetas, vista frontal (a), vista lateral (b)**

Para asegurar la repetibilidad del ensayo, se fabricaron tres (03) muestras para cada orientación. A pesar de que una muestra más grande da mayor confianza, el número de probetas ensayadas es suficiente para conocer la tendencia de la solución, en términos de Energía Absorbida y Carga Media. La siguiente nomenclatura se escogió para identificar las probetas: modelo a ensayar, ángulo de orientación de la lámina de metal expandido y número del ensayo. Así T 00-01 indica que la probeta fue ensayada a tracción (T), en orientación cero grados (00) y fue la probeta número 1 (01). El tamaño de las probetas en función de las orientaciones se indica en la Tabla 2.

Todas las probetas se ensayaron a temperatura ambiente en la máquina de Ensayos Mecánicos Modelo MTS, de 25 toneladas de capacidad, que se encuentra en el Laboratorio “E” de la Universidad Simón Bolívar bajo condiciones de desplazamiento controlado y a una velocidad constante de 05 mm/min.

Tabla 2. Dimensiones promediadas de las probetas.

Denominación	Dim. de la pletina [mm]	Altura libre (mm)	Ancho de la malla (mm)
T 00-01	200x75x3	270	180
T 00-02	200x75x3	271	181
T 00-03	200x75x3	270	180
T 30-01	200x75x3	272	170
T 30-02	200x75x3	271	170
T 30-03	200x75x3	270	172
T 60-01	200x75x3	270	180
T 60-02	200x75x3	270	182
T 60-03	200x75x3	271	182
T 90-01	200x100x3	270	183
T 90-02	200x100x3	269	183
T 90-03	200x100x3	270	182

2.2 Resultados Experimentales

Como se mencionó anteriormente, para cada configuración se ensayaron tres muestras y se graficaron las curvas carga-desplazamiento de las mismas. Se verificó en la mayoría de las curvas obtenidas para un mismo tipo de ensayo, pequeñas variaciones en la respuesta de carga en función del desplazamiento. En forma similar a lo expresado por Abramowicz y Jones (1984), los efectos elásticos iniciales no fueron considerados importantes debido a que la energía plástica disipada en las probetas fue mucho mayor que la energía elástica de deformación. Se cuantificaron ciertos parámetros que caracterizan a los ensayos de materiales susceptibles a sufrir grandes deformaciones como lo son la energía total disipada (E_a) que se obtuvo mediante la integración del área bajo la curva Carga-Desplazamiento (Reyes y otros, 2002) y la carga media (P_m) que se obtuvo a través de la integración de la carga constante equivalente medida sobre la deformación de la sección (Zhang y otros, 2007). Las ecuaciones 1 y 2 muestran las expresiones de estos parámetros.

$$E_a = \int_0^d P(x) dx \quad (1)$$

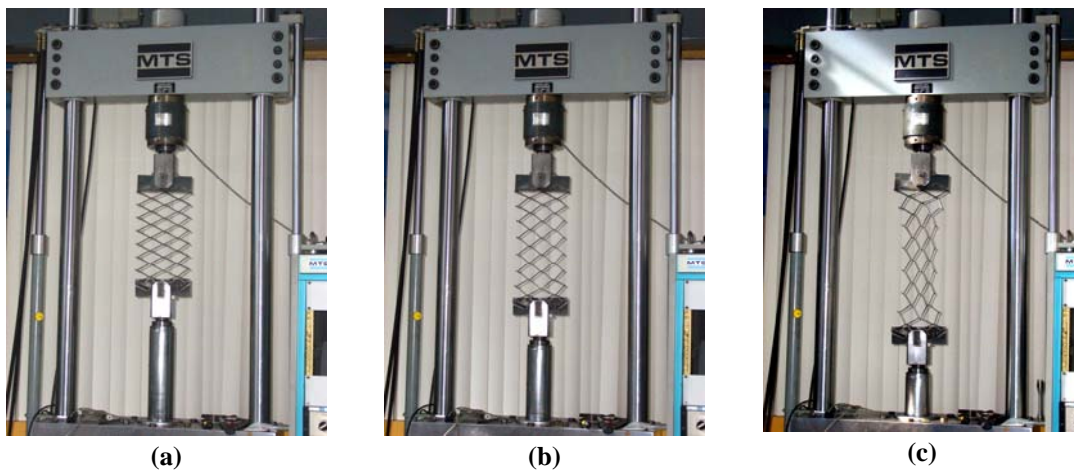
donde $P(x)$ representa el valor de la carga y d la longitud total de desplazamiento. La carga media se define como:

$$P_m = \frac{E}{d} = \frac{1}{d} \int_0^d P(x) \cdot dx \quad (1)$$

Estos parámetros se calcularon a partir de una curva equivalente, producto de promediar las curvas obtenidas experimentalmente.

2.2.1 Ensayo para $\alpha=0^\circ$

En este ensayo, la dirección de la carga es perpendicular al eje mayor (dh) de la malla (Figura 4 a). Se observa una variación significativa de la geometría durante el ensayo. La Figura 4 muestra: (a) el estado inicial, (b) la malla a 70 mm de elongación y (c) la forma de la malla a 190 mm de elongación.



**Figura 4. Ensayo de lámina de metal expandido $\alpha=0^\circ$,
(a) geometría inicial, (b) desplazamiento de 70 mm, (c) desplazamiento de 190 mm.**

La Figura 5 muestra la respuesta carga desplazamiento para las tres probetas ensayadas así como la curva carga desplazamiento promedio (T 00-prom). Se observa que todas las curvas exhiben una transición suave de la zona lineal de comportamiento del material al dominio plástico, pudiendo establecer esta transición a los 30 mm de elongación. A partir de este punto aumenta considerablemente la deformación sin producirse un aumento significativo de la carga. Luego de esta fase, una vez que las probetas alcanzan un desplazamiento aproximado de 150 mm, se observa un endurecimiento del material. El ensayo de la probeta T 00-01 fue interrumpido a los 207 mm, mientras que las otras dos probetas (T 00-02 y T 00-03) alcanzaron los 235 mm antes de producirse la primera rotura en un nodo de la probeta. Se observa que las mismas se deformaron adaptando su geometría e incrementaron su longitud (en dirección del eje menor del diamante) hasta 180% aproximadamente. La carga máxima medida previamente a la rotura fue de 178 kg. Los parámetros como energía total absorbida (E_a) y Carga media (P_m) se calculan a partir de la curva promediada de los tres ensayos, siendo la energía absorbida de 190,61 J y la carga promedio de 84,48 kg.

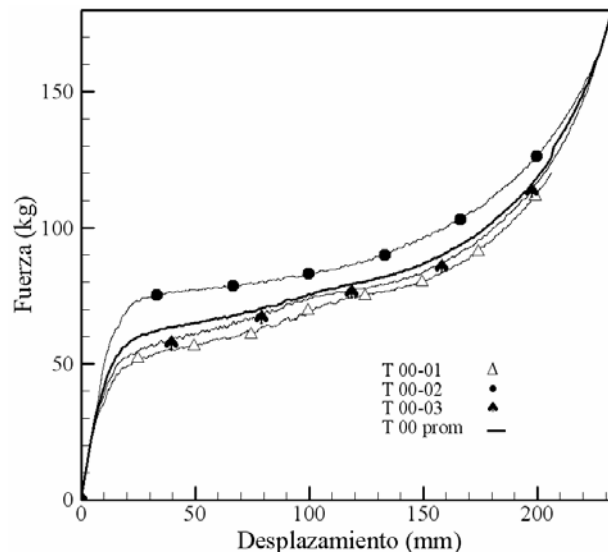
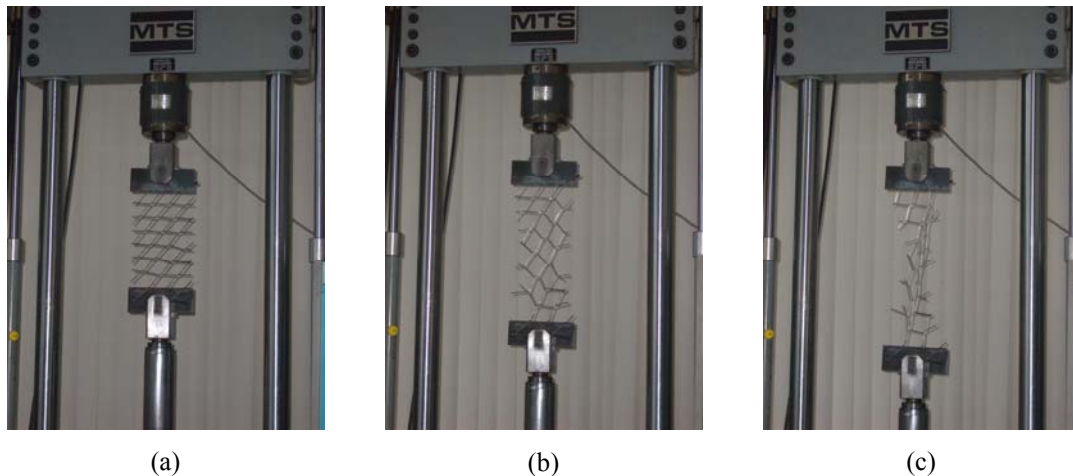


Figura 5. Curvas experimentales carga desplazamiento de las probetas ($\alpha=0^\circ$) y curva promediada.

2.2.2 Ensayo para $\alpha=30^\circ$

Las probetas con una inclinación de 30° se caracterizan por poseer una de las aristas del diamante perpendiculares a la dirección de la carga aplicada (Figura 6 a). Las Figura 6 muestra la secuencia de desplazamientos durante el ensayo en: (a) 0 mm, (b) 70 mm de elongación y (c) 180 mm de elongación.



**Figura 6. Ensayo de lámina de metal expandido $\alpha=30^\circ$,
(a) geometría inicial, (b) desplazamiento de 70 mm, (c) desplazamiento de 180 mm.**

La Figura 7 muestra las curvas carga desplazamiento. Se observa una diferencia considerable en estas curvas, debido a la dificultad de reproducir exactamente las condiciones de contorno en los extremos de las probetas con el cordón de soldadura. El número de celdas soldadas en las pletinas y el área efectiva de la soldadura se modificó en cada probeta ya que la configuración de la malla varió ligeramente durante el proceso de fabricación. En la figura 6(c) se observa que la pletina inferior sólo tiene soldada una celda, mientras que en la pletina superior se lograron soldar dos celdas.

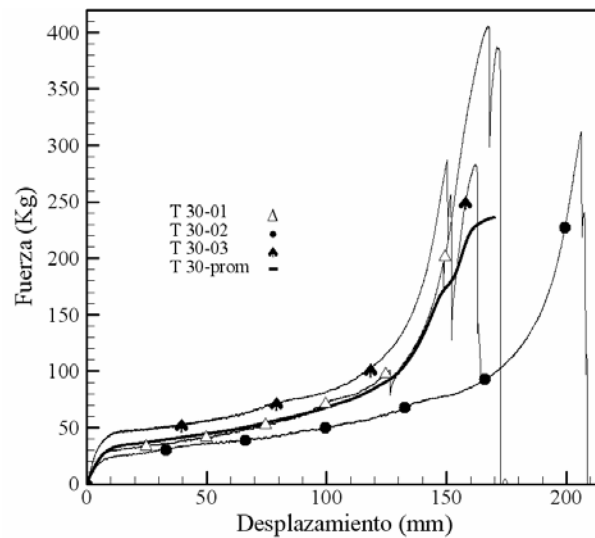
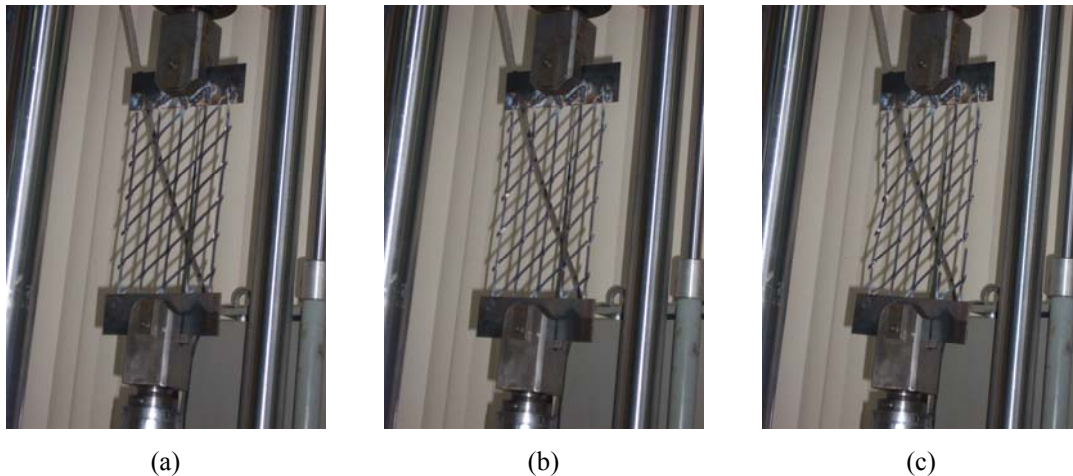


Figura 7. Curvas experimentales carga desplazamiento de las probetas ($\alpha=30^\circ$) y curva promediada

Al igual que en el grupo anterior, se obtuvo una curva carga desplazamiento promediada hasta el primer punto de rotura del material (en el resultado promedio). En este caso, la curva promediada se calculó hasta un desplazamiento de 170 mm. La energía acumulada hasta este punto es de 135.28 J y la carga media 81.12 kg. Además, se observa que las mismas se deformaron adaptando su geometría alargándose un 163% aproximadamente. Esta probeta, debido a la configuración de la malla, presenta una menor área efectiva de sección transversal, observándose que en la zona media de la probeta, solamente están actuando tres venas, mientras que en el caso anterior, durante toda la sección, el número de venas a través de las cuales fluye la carga es cuatro.

2.2.3 Ensayo para $\alpha=60^\circ$

Las probetas con una inclinación de 60° se identifican por poseer una de las aristas del diamante paralela a la dirección de la carga aplicada (Figura 8 a). Las Figura 8 muestra la secuencia de desplazamientos a: (a) 0 mm, (b) 5 mm de elongación y (c) 11 mm de elongación.



**Figura 8. Ensayo de lámina de metal expandido $\alpha=60^\circ$,
(a) geometría inicial, (b) desplazamiento de 5 mm, (c) desplazamiento de 11 mm.**

Se calculó una curva carga desplazamiento promediada con los resultados de las tres probetas (Figura 9), hasta el primer punto de rotura del material (en el resultado promedio). En este caso, la curva promediada se desarrolló hasta un desplazamiento de apenas 11 mm. A partir de un desplazamiento de 9 mm la probeta T 60-03 no es tomada en el promedio, pues se rompió un nodo perteneciente al cordón de soldadura. La energía acumulada de la curva promedio es de 132.97 J y una carga media de 1232.27 kg. La variación longitudinal de la geometría es de un 4.1%. Esta probeta, debido a su configuración posee mayor área efectiva de sección transversal, pues como se puede observar, el número de venas (alineadas con la dirección de la carga) es de cinco. La carga es transmitida prácticamente a través de las venas.

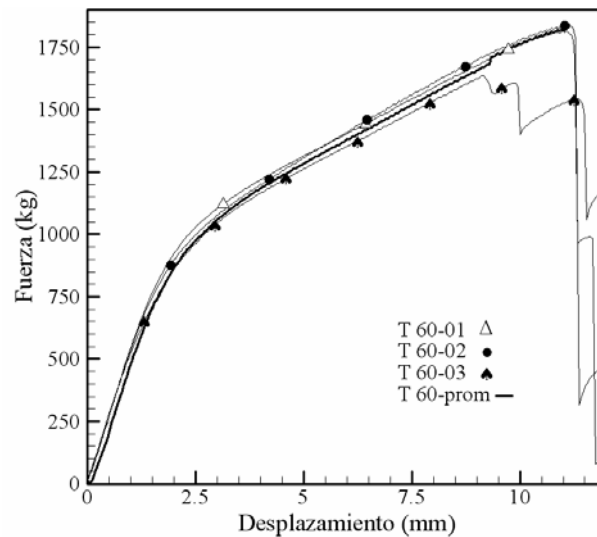


Figura 9. Curvas experimentales carga desplazamiento de las probetas ($\alpha=60^\circ$) y curva promediada.

2.2.4 Ensayo para $\alpha=90^\circ$

Las probetas con una inclinación de 90° se caracterizan por poseer el eje mayor del diamante alineado con la dirección de carga. (Figura 10 a). La Figura 10 muestra la secuencia redesplazamiento a: (a) 0 mm, (b) 5 mm de elongación y (c) 10 mm de elongación.

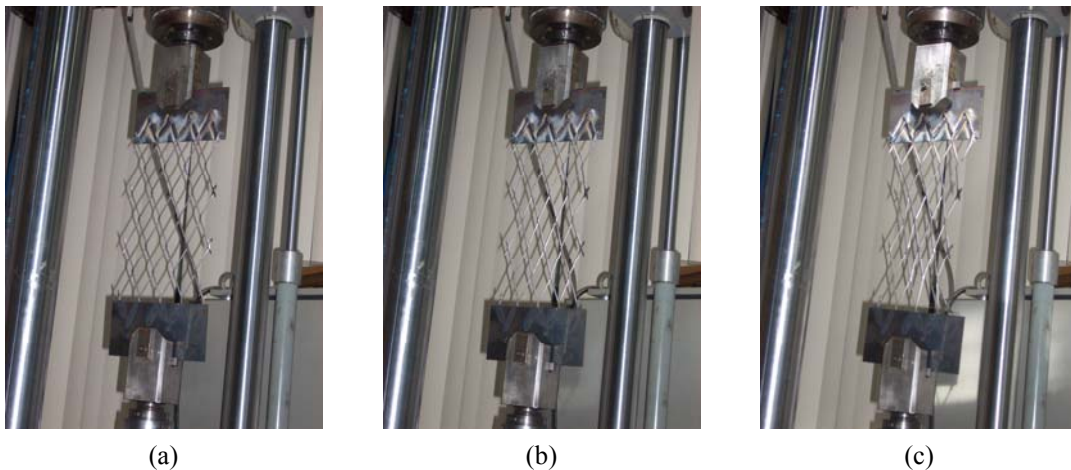


Figura 10. Ensayo de lámina de metal expandido $\alpha=90^\circ$, (a) geometría inicial, (b) desplazamiento de 5 mm, (c) desplazamiento de 10 mm.

La Figura 11 muestra las curvas carga desplazamiento a partir de las curvas obtenidas experimentalmente. La curva carga desplazamiento promediada, de nuevo se calcula hasta el primer punto de rotura el material (en el resultado promedio). La curva promediada se desarrolló hasta un desplazamiento de 9.5 mm. La energía acumulada hasta este punto es de 82.62 J y la carga media 886.84 kg. La variación longitudinal de la geometría es de un 3.5%.

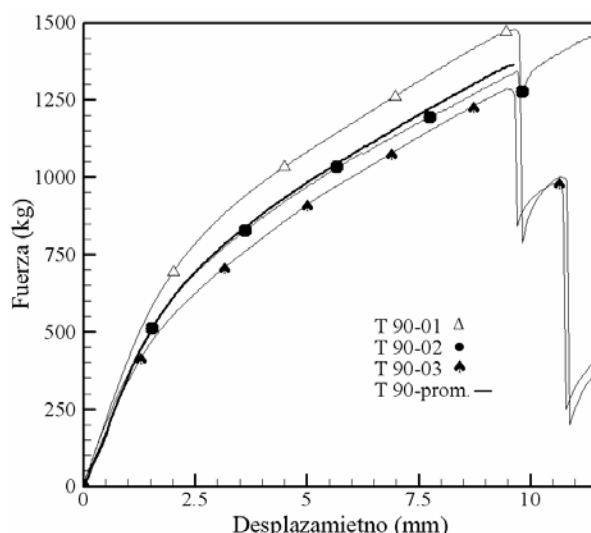


Figura 11. Curvas experimentales carga desplazamiento de las probetas ($\alpha=90^\circ$) y curva promediada.

3. ESTUDIOS NUMÉRICOS

3.1 Descripción del modelo de elementos finitos

Se realizó un análisis *cuasi-estático* de las mallas ensayadas experimentalmente, para ello se desarrolló un modelo de elementos finitos para cada orientación, utilizándose el software *Ansys* (Ansys, 2002) tanto para el desarrollo del modelo como el cálculo y el postproceso. Se tomaron en cuenta ciertas no linealidades concernientes al modelo, como la no linealidad geométrica (para ello se resolvió el modelo tomando en cuenta las grandes deformaciones en las opciones de solución) y la no linealidad en el comportamiento del material, para lo cual se definió una curva multilínea elástica obtenida de Sánchez (2005). Los valores de dicha curva se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Relación esfuerzo (σ) deformación (ϵ_p) del material simulado.

σ (N/mm ²)	370	400	440	483	502	502
ϵ_p	0,0018	0,0023	0,0028	0,0042	0,0050	0,0500

Las dimensiones de los diferentes modelos coinciden con las dimensiones de los modelos experimentales. Cada malla fue modelada utilizando elementos hexaédricos (solid 45) (Ansys, 2002). Estos elementos permiten modelar estructuras sólidas, están definidos por ocho nodos, poseyendo 3 grados de libertad por nodo (traslación), permitiendo comportamiento no lineal del material y grandes deformaciones, por lo que son idóneos para simular las mallas en cuestión. Después de un estudio de convergencia, se seleccionaron diferentes tamaños de elementos, quedando discretizada cada arista, nodo y avance según se muestra en la Figura 12.

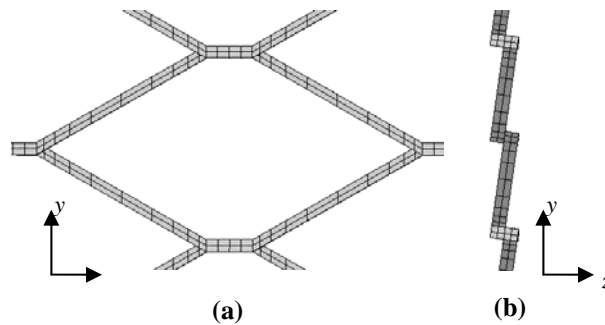


Figura 12. Modelo de celda elaborado con elementos finitos mostrando la discretización de la malla, (a) vista frontal y (b) lateral.

La malla fue anclada en un extremo, impidiendo el desplazamiento de los nodos en todas las direcciones. Se definió una ecuación de restricción cinemática en el extremo opuesto imponiendo un desplazamiento uniforme en la dirección longitudinal de 1 mm en cada paso. Para cada modelo se impuso un desplazamiento total igual al desplazamiento total promedio obtenido en los ensayos experimentales. Las condiciones se muestran esquemáticamente en la Figura 13.

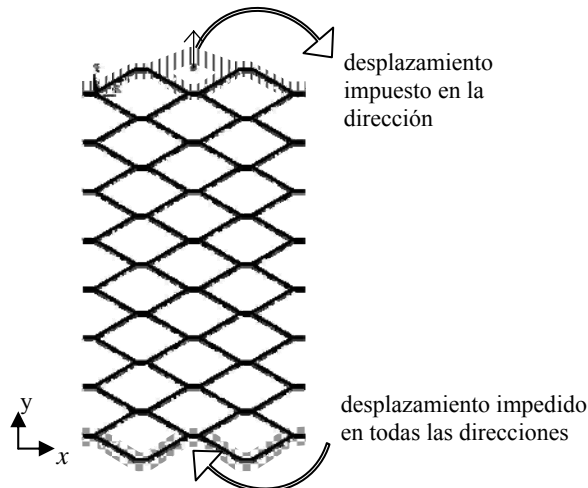


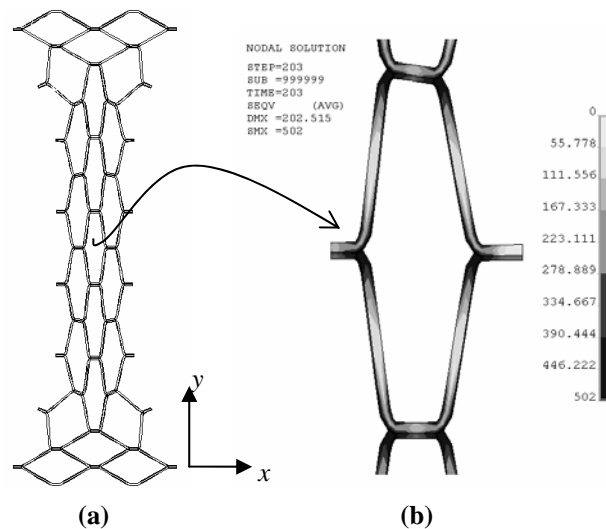
Figura 13. Esquema indicativo de las condiciones de contorno.

3.2 Resultados numéricos

A continuación se muestran los resultados numéricos para cada configuración:

3.2.1 Modelo para $\alpha=0^\circ$

El modelo analizado posee 3840 elementos. Para esta configuración el análisis *cuasi-estático* culminó después de 235 pasos de carga, imponiendo en cada uno un desplazamiento alineado con el eje principal Y de 1 mm. La geometría final del modelo numérico en función del desplazamiento final se muestra en la Figura 14 (a). La Figura 14 (b) muestra una ampliación de una de las celdas centrales del modelo, se observa la exagerada deformación de la celda, aumentando la longitud de la diagonal menor hasta casi dos veces su tamaño. La distribución de grises corresponde con el esfuerzo de von Mises. En esta también se observa una concentración de esfuerzos en las uniones entre los nodos y las venas que corresponde ampliamente con los resultados experimentales pues la rotura de la malla siempre se produce en esta zona.

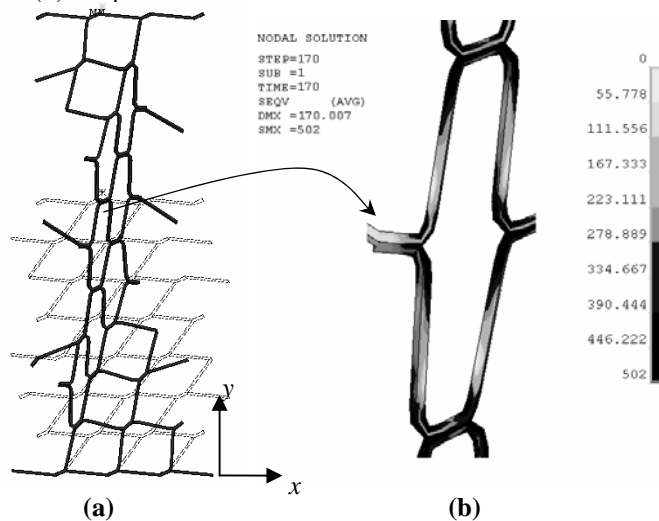


**Figura 14. (a) Desplazamiento final de la geometría,
(b) ampliación de una de las celdas mostrando distribución de esfuerzos de von Mises (MPa).**

Los valores de energía acumulada y carga media a los 235 mm son 235,9 J y 100,3 kg respectivamente.

3.2.2 Modelo para $\alpha=30^\circ$

El modelo caracterizado por la inclinación de la diagonal mayor en 30° está discretizado con 4588 elementos. El desplazamiento final es de 170 mm (que corresponde al desplazamiento final de la probeta promediada experimentalmente). La Figura 15 (a) muestra el desplazamiento inicial y a 170 mm de la probeta. En la Figura 15 (b) se aprecia la concentración de esfuerzos en la zona cercana al nodo.



**Figura 15. (a) Desplazamiento final de la geometría,
(b) ampliación de una de las celdas mostrando distribución de esfuerzos de von Mises (MPa).**

Los valores de energía acumulada y carga media a los 170 mm son 131,9 J y 79,1 kg respectivamente.

3.2.3 Modelo para $\alpha = 60^\circ$

El modelo está formado por 3440 elementos hexaédricos sometido a idénticas condiciones de contorno que los modelos anteriores. La Figura 16 (a) muestra el desplazamiento a los 11 mm. La Figura 16 (b) muestra la ampliación de una de las celdas. Esta probeta se caracteriza por concentrar los esfuerzos en las venas de la malla las cuales están alineadas con la dirección de la carga.

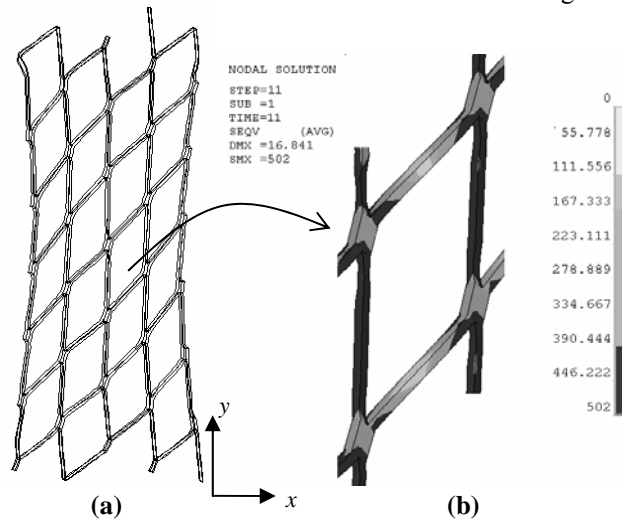


Figura 16. (a) Desplazamiento final de la geometría, (b) ampliación de una de las celdas mostrando distribución de esfuerzos de von Mises (MPa).

Los valores de energía acumulada y carga media a los 11 mm son 133,7 J y 1239 kg respectivamente.

3.2.4 Modelo para $\alpha = 90^\circ$

El modelo está formado por 3712 elementos hexaédricos sometido a idénticas condiciones de contorno que los modelos anteriores. La Figura 17 (a) muestra el desplazamiento a los 9.5 mm. La Figura 17 (b) de nuevo muestra una ampliación de uno de los nodos centrales.

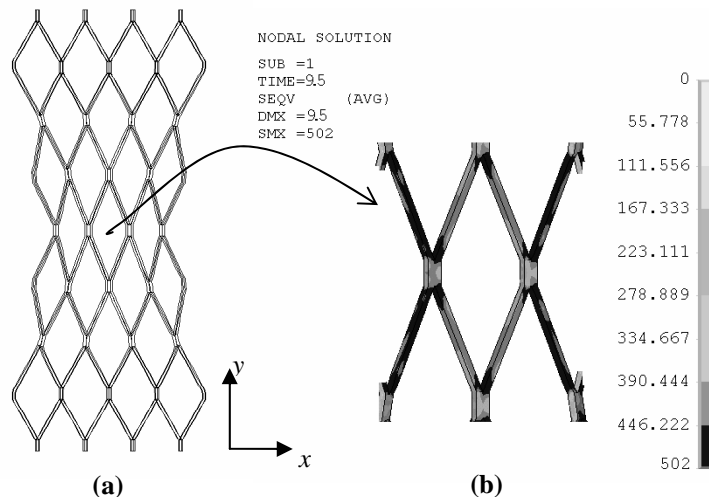


Figura 17. (a) Desplazamiento final de la geometría, (b) ampliación de una de las celdas mostrando distribución de esfuerzos de von Mises (MPa).

Los valores de energía acumulada y carga media a los 9.5 mm son 82,71 J y 887,5 kg respectivamente.

4. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Probeta orientada en $\alpha = 0^\circ$

La Figura 18 muestra las curvas carga-desplazamiento experimental y numérica para este tipo de configuración, se observa una zona elástica inicial similar en ambas curvas, la cual es en comparación con la zona plástica muy pequeña. Los resultados de ambas curvas son similares hasta un desplazamiento de 125 mm, a partir de este punto, las curvas se separan alcanzando en la zona de rotura del primer nodo de la probeta experimental una diferencia de aproximadamente 30%. Esto puede atribuirse a una caracterización inadecuada de la curva de comportamiento del material, pues la misma se realizó a partir de probetas de acero de la lámina antes de sufrir el proceso de corte y estirado con el que se realiza el metal expandido. Este procedimiento, inevitablemente, produce endurecimiento o mayor incremento de la carga del material en la zona adyacente al nodo, modificando las propiedades del mismo.

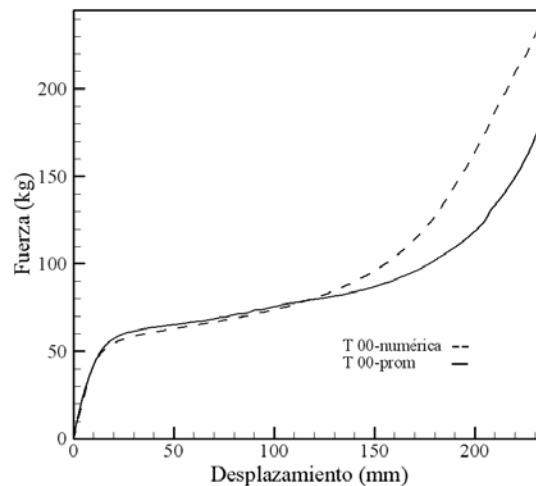


Figura 18. Comparación entre resultado experimental y resultado computacional ($\alpha = 0^\circ$).

4.2 Probeta orientada en $\alpha = 30^\circ$

La Figura 19 muestra las curvas carga-desplazamiento experimental promediada y numérica para las mallas orientadas a 30 grados. Al igual que en el caso anterior, la similitud de las mismas es notable hasta un desplazamiento de 120 mm, a partir de este punto las curvas se separan considerablemente, sin embargo, a diferencia del resultado anterior, la zona de endurecimiento (aumento brusco de la carga) de la curva experimental alcanza valores elevados más rápidamente que la curva numérica.

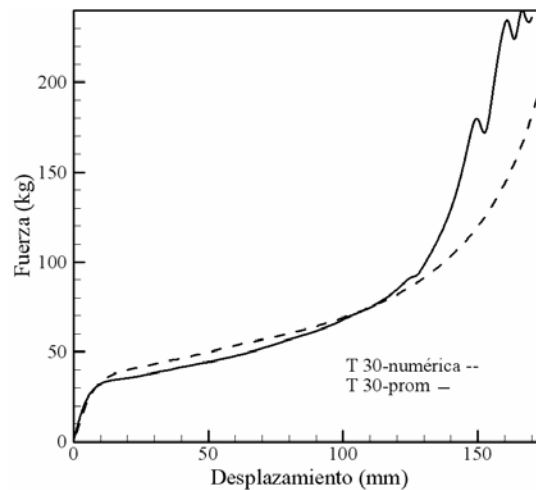


Figura 19. Comparación entre resultado experimental y resultado computacional ($\alpha=30^\circ$).

4.3 Probeta orientada en $\alpha=60^\circ$

A diferencia de los casos anteriores, la zona elástica del modelo computacional no se ajusta con tanta precisión al modelo experimental, sin embargo se observa una coincidencia mayor en la zona de endurecimiento previa a la primera rotura. La Figura 20 muestra ambas curvas.

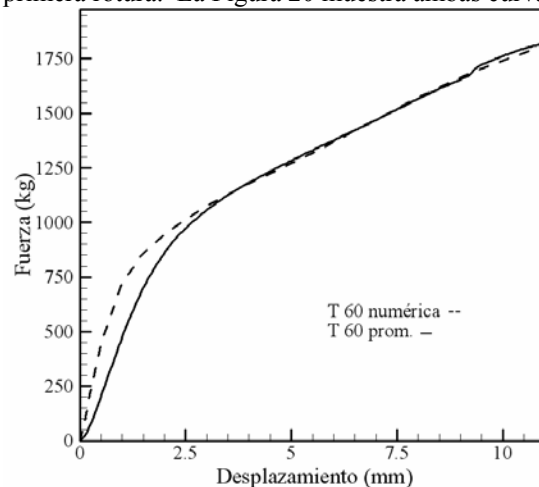


Figura 20. Comparación entre resultado experimental y resultado computacional ($\alpha=60^\circ$).

4.4 Probeta orientada en $\alpha=90^\circ$

La Figura 21 muestra las curvas carga desplazamiento promediada experimental y numérica para $\alpha=90^\circ$. La curva experimental posee valores menos elevados que la curva numérica durante la primera etapa (que corresponde a la zona de comportamiento elástico del material, para después ajustarse mucho mejor durante la fase de endurecimiento, esta diferencia en la primera etapa del ensayo experimental con relación al ensayo numérico se puede atribuir a cierta ortotropía del material, la cual fue medida por Sánchez (2005).

Finalmente, la Tabla 4 muestra valores comparativos entre los resultados numéricos y experimentales de Energía Absorbida (E_a) y Carga Media (P_m).

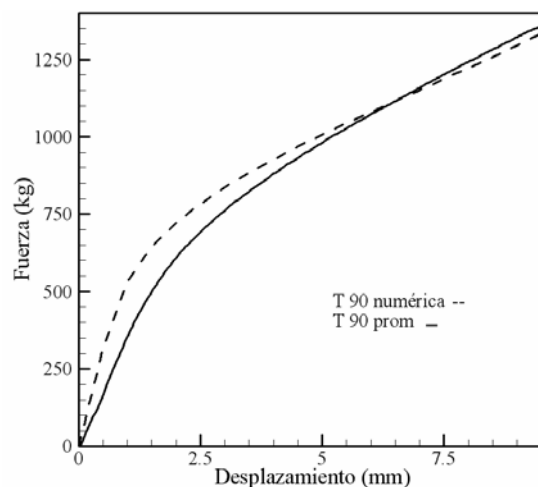


Figura 21. Comparación entre resultado experimental y resultado computacional ($\alpha=90^\circ$).

Tabla 4. Comparación de valores de energía absorbida (E_a) y carga media (P_m) entre los resultados experimentales y numéricos.

Ángulo		0°	30°	60°	90°
Parámetro	Energía de deformación (J)	190,6	135,28	132,97	82,62
	Carga Media (kg)	84,48	81,12	1232,27	886,84
Modelo Numérico	Energía de deformación (J)	231,9	131,9	133,7	82,71
	Carga Media (kg)	100,3	79,12	1239	887,5

La máxima energía absorbida se obtuvo para $\alpha=0^\circ$ ($E_a=190,6$ Js). Para esta configuración la carga media ($P_m=84,48$ kg) también fue baja en comparación con la correspondiente para los otros ángulos. Estos dos parámetros son buenos indicadores de la efectividad de esta orientación para aplicaciones que requieran disipación de energía por deformación plástica y que la carga transmitida sea la más baja posible como es el caso de colisiones entre vehículos o contra objetos colocados a un lado de las carreteras.

Los resultados numéricos y experimentales están bastante ajustados, a excepción del modelo correspondientes a $\alpha=0^\circ$ cuya diferencia es del 17%. Esta diferencia, entre el resultado numérico y el resultado computacional indica que para modelos que requieran una gran precisión, es importante tomar en cuenta el comportamiento anisotrópico del material.

De los resultados mostrados en la Tabla 4 se puede afirmar que si las celdas son orientadas a $\alpha=0^\circ$ se obtiene la energía absorbida es máxima. Esto se debe a que en esta dirección el desplazamiento de los nodos es el máximo posible, antes de que ocurra la fractura en alguno de los nodos de la malla.

5. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este trabajo demuestran la notable influencia de la orientación del eje mayor de las celdas de metal expandido en la respuesta estructural de las mismas. Este hecho se refleja claramente en los parámetros medidos: energía absorbida y carga media.

Además se puede concluir que la mejor configuración para aplicaciones que requieran una gran capacidad de absorción de energía es la correspondiente a $\alpha=0^\circ$.

Otro importante resultado de este trabajo es el desarrollo de un modelo por elementos finitos que permite simular apropiadamente el comportamiento de mallas de metal expandido.

En vista de los resultados obtenidos, como trabajo futuro se estudiará la importancia de tomar en cuenta la anisotropía del material en los modelos numéricos

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Decanato de Investigación de la Universidad Simón Bolívar por el apoyo prestado a través del proyecto N° S1-IN-CAI-013-06, y a la empresa de fabricación y suministro de láminas de metal expandido Maboca C.A.

7. REFERENCIAS

1. Sánchez, R. y Graciano, C. (2005). Determinación de las Propiedades Mecánicas de Láminas de Metal Expandido. En memorias del Séptimo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica celebrado en Ciudad de México del 12 al 14 de Octubre, México, pp 175.
2. UNITED STATES PATENT APPLICATION PUBLICATION, Expanded Metal. Inventor: Mulder, F.M. y Stewart, C.W., Estados Unidos de América, patente de invención 2005/0060858 A1. 2005-03-27.
3. UNITED STATES PATENT OFFICE, Concrete Block with Expanded Metal Reinforce Core. Inventor: Strock, A.C., Estados Unidos de América, patente de invención N° 512128. 1894-01-02.
4. UNITED STATES PATENT OFFICE, Structural Support. Inventor: Gauffin, H, Estados Unidos de América, patente de invención N° 4513551. 2003-04-30.
5. UNITED STATES PATENT OFFICE, Energy Absorbing Assembly. Inventor: Carrol, P; Cormier, M; Smith, D y Audi, F., Estados Unidos de América, patente de invención N° 6017084. 2000-01-25.
6. UNITED STATES PATENT OFFICE, Energy Absorbing Aircraft Seat, Inventor: Bergey, K., Estados Unidos de América, patente de invención N° 6561580B1. 2003-05-13.
7. UNITED STATES PATENT OFFICE, Method of repairing bone fractures with expanded metal. Inventor: Ersek, R.A., Estados Unidos de América, patente de invención N° 3710789. 1973-01-16.
8. MABOCA C.A. (2007, Agosto). Disponible en: <http://www.maboca.com.ve>
9. Abramowicz, W. y Jones, N. (1984). Dynamic Axial Crushing of Square Tubes International Journal of Impact Engineering, 2(2), 179-208.
10. Reyes, A.; Langseth, M. y Hopperstad, O.S. (2002). Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: experiments and numerical analyses,
11. International Journal of Mechanical Sciences, 44, 1965-1984.
12. Zhang, X.; Chen, G.; You, Z. y Zhang, H. (2005). Energy absorption of axially compressed thin walled square tubes with patterns, Thin Walled Structures, 45, 737-746.
13. Sánchez, R. (2005) Determinación de las Propiedades Mecánicas de Láminas de Metal Expandido. Tesis de Maestría, Universidad Simón Bolívar, Caracas-Venezuela.
14. ANSYS user's manual for revision 6.1 Swanson Analysis Systems, Inc; 2002.