

COMPORTAMIENTO DE SÓLIDOS CELULARES SOMETIDOS A COMPRESIÓN UNIAXIAL

Adriana Pernich¹, Fernando G. Flores² y Luis A. Godoy³

Departamento de Estructuras, F.C.E.F. y N
Universidad Nacional de Córdoba
Casilla de correos 916, (5000) Córdoba - Argentina

RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento de estructuras celulares a los efectos de obtener los valores de los parámetros macroscópicos que definen a un sólido equivalente. Estos parámetros son obtenidos a partir de las respuestas calculadas para cada geometría comparandolos entre sí. En base a la comparación se selecciona el tamaño óptimo de panal para obtener una adecuada caracterización macromecánica a partir de un ensayo de compresión unidimensional.

ABSTRACT

The behavior of cellular structures are studied in order to obtain the values of the macroscopic parameters for an equivalent solid. These parameters are obtained from the response calculated for each geometry, and a comparison is drawn among them. The optimum honeycomb size is then selected from the aforementioned comparison so as to obtain an adequate macro-mechanical characterization from the one-dimensional compression tests.

INTRODUCCIÓN

Los materiales celulares (sean naturales o fabricados por el hombre) son ampliamente utilizados en ingeniería dada su alta relación resistencia-peso lo que los hace muy importantes desde el punto de vista económico. A pesar de que presentan un conjunto de características físicas muy interesantes tanto desde el punto de vista científico como tecnológico son de los menos estudiados.

La mayoría de los trabajos en este área Ref. [3][4][5][8][9] están enfocados a comprender los mecanismos de deformación y de colapso que presentan estos materiales, considerando principalmente las características geométricas y el tipo de material del cual están formados, y la correlación de estos con los distintos regímenes que se presentan en las curvas experimentales.

¹Becaria Se.C.yT. - Universidad Nacional de Córdoba - F.O.M.E.C.

²Investigador Adjunto de CONICET y Profesor Titular Universidad Nacional de Córdoba.

³Investigador Principal de CONICET y Profesor Titular Universidad Nacional de Córdoba.

Lo anterior ha motivado estudiar numéricamente el comportamiento macromecánico de un material celular similar a un panal de abeja para obtener los parámetros que permitan caracterizarlo dentro de la mecánica de los medios continuos. Se trata de apreciar cuanto afecta a las propiedades macroscópicas el tamaño del panal modelado y cual debe ser el tamaño mínimo de panal a modelar para obtener una adecuada caracterización. Para ello se utilizan cuatro geometrías, comparando los valores de los parámetros macroscópicos que se calculan a partir de las respectivas respuestas. Se ha utilizado un programa comercial [1] para llevar a cabo el presente estudio. Una descripción más detallada de los resultados aquí presentados así como otros aspectos complementarios pueden verse en [7].

MODELO NUMÉRICO

Las geometrías que se utilizan son una unidad estructural compuesta por tres paredes con la forma de una "Y" (Figura 1.a) y tres panales que difieren en el número de celdas hexagonales (prismas de sección hexágona regular) que los componen (Figuras 1.b, 1.c y 1.d). Las dimensiones de las celdas y la distribución de los espesores es mantenida para hacer posible la comparación, siendo el tamaño de la celda (distancia entre paredes paralelas) es $9.53mm$, el espesor de las paredes verticales de $0.290mm$ y el de las restantes $0.145mm$. Todas las geometrías conservan tres planos de simetría, cada uno de los cuales es perpendicular a uno de los ejes coordenados.

El material que forma las paredes es una aleación de aluminio (Al-5052-H39) cuyas propiedades se indican en la Tabla 1, el cual se considera elastoplástico regido por el criterio de fluencia de von Mises con endurecimiento por deformación de tipo isotrópico.

Módulo de Young	$E = 6.9 \cdot 10^{10}$ Pa
Relación de Poisson	$\nu = 0.28$
Tensión de fluencia uniaxial	$\sigma_Y = 2.92 \cdot 10^8$ Pa
Tensión en rotura	$\sigma_u = 3.32 \cdot 10^8$ Pa
Deformación uniaxial a rotura	$\varepsilon_{max} = 6.5\%$
Densidad	$\rho = 2710$ Kg/m ³

Tabla 1: propiedades de la aleación de aluminio

Se simula un ensayo de compresión unidimensional considerando dos respuestas: elástica o elastoplástica, para poder distinguir el tipo de comportamiento que presenta. Para cada geometría se obtienen las trayectorias de equilibrio elástica y elastoplástica hasta una deformación máxima del orden del 20%. El programa utilizado emplea el algoritmo conocido como plano normal actualizado (o método de Riks) para el seguimiento de la trayectoria de equilibrio.

Las condiciones de borde que se imponen son:

- todos los nodos que pertenecen al plano medio en la dirección z se les restringen los desplazamientos en la dirección z para simular un estado de tensión plana; a la unidad estructural
 - a los nodos que pertenecen a la arista inferior de la pared vertical se les restringen los desplazamientos en las direcciones x e y ;
 - a los nodos que pertenecen a las aristas superiores de las paredes inclinadas se les impone tener el mismo desplazamiento en la dirección y ;
 - cada par de nodos simétricos, respecto del plano perpendicular al eje x , tienen desplazamientos en la dirección x del mismo valor absoluto pero direcciones opuestas, lo mismo ocurre para los giros respecto del eje z para cada par;
- y las impuestas a los panales:

- condición de contacto mecánico en los nodos que pertenecen a las paredes externas de las celdas que se encuentran en los vértices inferiores del panel para simular contacto sin fricción con el plato inferior de la máquina de ensayo;

- condición de contacto mecánico en los nodos que pertenecen a las paredes de las celdas que se encuentran en los vértices superiores del panel para simular contacto sin fricción con el plato superior de la máquina de ensayo;

A partir de las trayectorias de respuesta macroscópicas se calculan el módulo de Young, la relación de Poisson la tensiones de inicio de fluencia, máxima y de plateau y la deformación correspondiente a la tensión máxima.

En la Fig. 1 se muestran las mallas utilizadas y en la Tabla 2 las características de cada una.

mall	L_1	L_2	L_3	Nro. nodos	Nro. elementos
CTRI	$9.530 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$8.253 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$1.600 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	65	48
C23	$1.906 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$2.751 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$1.600 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	460	384
C45	$3.812 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$4.402 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$1.600 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	1335	1136
C69	$6.671 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$7.703 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$1.600 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	3775	3248

Tabla 2: Dimensiones de las mallas

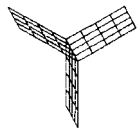


Figura 1.a: Modelo CTRI



Figura 1.b: Modelo C23

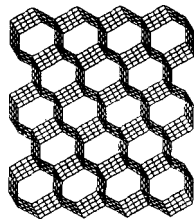


Figura 1.c: Modelo C45

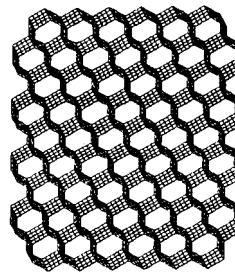


Figura 1.d: Modelo C69

PARÁMETROS MACROSCÓPICOS

Los parámetros macroscópicos se obtienen a partir de las respuestas de cada una de las geometrías. La forma en que se calculan estos parámetros es:

* El **módulo de Young** o **módulo elástico longitudinal** se define como el cociente entre la tensión de equilibrio y la deformación, ambas en la misma dirección. Se expresan como:

$$E_1^* = \frac{\sigma_1^*}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

siendo:

σ_1^* : tensión de equilibrio del panel calculada en dirección i

ε_i : deformación del panel calculada en dirección i

donde:

$$\sigma_1^* = \frac{P_{tot1}}{L_{02}L_{03}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta_1}{L_{01}} \quad y \quad \varepsilon_2 = \frac{\delta_2}{L_{02}} \quad (3)$$

- P_{tot1} : carga total con dirección x aplicada al panel
- L_{01} : dimensión original del panel en la dirección del eje x
- L_{02} : dimensión original del panel en la dirección del eje y
- L_{03} : dimensión original del panel en la dirección del eje z
- δ_1 : desplazamiento relativo total en dirección x
- δ_2 : desplazamiento relativo total en dirección y
- $A = L_{02}L_{03}$: área de la sección transversal del panel, perpendicular a la dirección de carga

* La **relación de Poisson** se define como el cociente entre la deformación transversal y la deformación longitudinal. Se expresa como:

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad y \quad \nu_{21} = \frac{-\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (4)$$

- ε_1 : deformación en la dirección x
- ε_2 : deformación en la dirección y

* La **tensión límite elástica inferior** es la tensión que corresponde al inicio de comportamiento no lineal de la respuesta tensión- deformación.

* La **tensión límite elástica superior** es la máxima tensión que se obtiene en la respuesta tensión-deformación.

* La **tensión residual o tensión del plateau** es la tensión a la cual se estabiliza la respuesta tensión-deformación despues de haber superado el punto límite elasto - plástico.

RESULTADOS NUMÉRICOS

En la Fig. 14 se presentan las trayectorias elásticas para las cuatro geometrías observándose que con la correspondiente a CTRI se sobreestima la rigidez elástica mientras que con la C23 se la subestima, en ambos casos respecto de las C45 y C69 casi concordantes. Utilizando la respuesta de la geometría C45 para estimar los valores de los parámetros elásticos, se obtienen buenos resultados, lo cual se refleja en la poca diferencia entre los valores correspondientes a C45 y C69 de la Tabla 3.

Para la geometría C69 se cuenta con resultados experimentales de una geometría similar en Ref. [2]. De la comparación entre la curva experimental y elastoplástica correspondiente a C69 se observa una razonable concordancia en el tramo inicial, lo cual haría que la estimación de los parámetros elásticos sea razonable Fig. 15.

En la Fig. 15 se observa que con la trayectoria elastoplástica de la configuración CTRI se sobreestima tanto la rigidez elástica como el valor de la tensión de fluencia equivalente del panel mientras que con la C23 se subestima la rigidez inicial, similarmente a lo que se observa en la Fig.14 con las trayectorias elásticas.

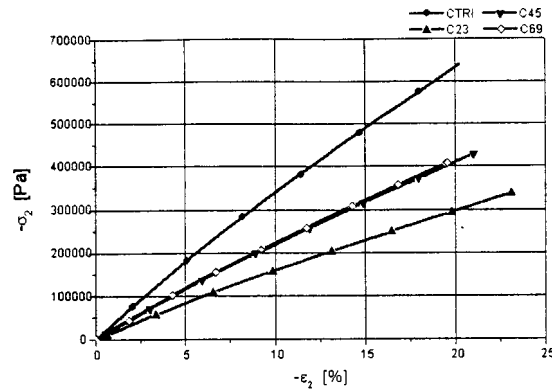


Figura 14: Comparación de las trayectorias elásticas

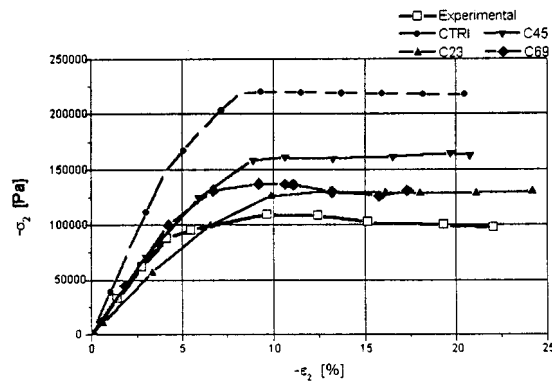


Figura 15: Comparación de las trayectorias elastoplásticas y experimental

Las rigideces iniciales que corresponden a las configuraciones C45 y a la C69 son muy similares en el rango elástico y puede utilizarse la respuesta de la C45 para estimar los valores del módulo de Young y de la relación de Poisson, pero se sobreestima en un 17.61% más la tensión de fluencia del panel, respecto de la configuración C69 (que ya sobreestima este valor en un 13.15% respecto del valor experimental).

Como se observa en la Tabla 3, la relación de Poisson toma valores inaceptables ($\nu_{21} > 0.5$) en el marco de la mecánica del continuo por violar la condición termodinámica que limita el rango de valores admisibles a ($-1 < \nu < 0.5$) para el mismo.

Las trayectorias elastoplásticas coinciden cualitativamente con las curvas de los ensayos, confirmando un comportamiento del tipo punto límite.

	CTRI	C23	C45	C69	Exp. Ref.[2]	
E_0^*	3867296	1767450	2462568	2472616	2416667	
ν_{21}	-	0.35 / 0.53	0.26 / 0.69	0.61 / 0.77	-	(1)
ν_{21}	-	0.25 / 0.46	0.24 / 0.61	0.68 / 0.82	-	(2)
σ_y	111479	56596	71037	99679	88095	
σ_{\max}	219611	130204	161113	136990	108333	
$\varepsilon_{\sigma_{\max}}$	9.24 %	13.12	11.88	9.20	12.41	
$\sigma_{\text{plat.}}$	217732	129140	161914	129062	98095	

Tabla 3 : Parámetros de las distintas geometrías

CONCLUSIONES

Todos los modelos captan cualitativamente el comportamiento tipo punto límite. Comparando los valores de los parámetros obtenidos para las distintas geometrías con los correspondientes al ensayo experimental, se observa que el modelo C45 es el más pequeño cuyos resultados son cuantitativamente aceptables.

En lo referente al módulo de Young, las diferencias porcentuales respecto al valor calculado para la curva experimental son del 60% para CTRI, de -26.9% para C23, de 1.9% para C45 y de 2.3% para C69. Algunos de los valores de la relación de Poisson son termodinámicamente inadmisibles ($\nu_{ij} > 0.5$), lo cual sumado a que no se dispone de valores experimentales dificulta la selección del valor más adecuado para caracterizar el material. Los valores de las tensiones de fluencia resultan sobreestimados en un 26.5% para la geometría CTRI y en un 13.1% para la C69 y subestimado en 35.7% para la C23 y en 19.4% para la C45. Las tensiones de plateau resultan sobreestimadas en todos los casos siendo de un 122% para CTRI, de 31.6% para C23, de 65.1% para C45 y de 31.6% para C69.

También la tensión máxima resulta sobreestimada en 102.7% para CTRI, en 20.2% para C23, en 48.7% para C45 y en 26.4% para C69; las deformaciones correspondientes a la tensión máxima difieren respectivamente en 25.5%, 5.7%, -4.3% y 25.9%.

REFERENCIAS

1. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., "Abaqus User Manual - Version 5.7", 1080 Main Street, Pawtucket RI 02860-4847 U.S.A., 1997.
2. Scott D. Papka and Stelios Kyriakides, "In-plane compressive response and crushing of honeycomb", Journal of Mechanical Physics of Solids, 42(10), 1994, 1499-1532.
3. Lorna J. Gibson and Michael F. Ashby, "Cellular solids. Structure and properties -Second Edition", Cambridge University Press, The Edimburg Bulding, Cambridge CB2 2RU United Kingdom, 1997.
4. Zhang, J. and Ashby, M.F., "Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stresses", International Journal of Mechanical Sciences, 34(6), 1992, 491-509.
5. Lorna J. Gibson and Michael F. Ashby, "Cellular solids. Structure and properties -Second Edition", Cambridge University Press, The Edimburg Bulding, Cambridge CB2 2RU United Kingdom, 1997.
6. Zhang, J. and Ashby, M.F., "Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stresses", International Journal of Mechanical Sciences, 34(6), 1992, 491-509.
7. Pernich, A., "Deformación de sólidos celulares sometidos a tensiones de compresión", Tesis de la Maestría en Ciencias de Materiales Tecnológicos de la Universidad Nacional del Comahue, 2000.