

Estructuras hexaquirales con coeficiente de Poisson negativo bajo carga uniaxial en el plano

Hexagonal chiral structures with negative Poisson's ratio under in-plane uniaxial loading

Oscar Gerardo Castro Ardila*

Gonzalo Fernando Casanova García**

Yesid Aguilar Castro***

Universidad del Valle (Colombia)

* Ingeniero Mecánico, Universidad del Valle (Colombia). Investigador, Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial GIMI, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle. oscar.gerardo.castro@correounivalle.edu.co

** Ingeniero Mecánico. Magíster en Ingeniería de la Universidad del Valle (Colombia). Profesor tiempo completo, Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial GIMI, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle. gonzalo.casanova@correounivalle.edu.co

*** Ingeniero Mecánico, Universidad del Valle (Colombia). Magíster en Metalurgia y Ciencia de Materiales de la Universidad Central de Venezuela y Doctor en Nuevos Materiales y sus Tecnologías, Universidad Politécnica de Valencia (España). Profesor tiempo completo, Grupo de Investigación en Materiales Compuestos y Grupo de Investigación en Tribología, Polímeros, Metalurgia de Polvos y Transformación de Residuos Sólidos, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. yesid.aguilar@correounivalle.edu.co

Correspondencia: Oscar Castro, Universidad del Valle, Calle 13 No 100-00, A.A. 25360 Cali, Colombia. Teléfono: +57 (2) 3212137

Origen de subvenciones: Esta investigación forma parte del proyecto "Comportamiento estático y dinámico de una estructura deformable con coeficiente de Poisson negativo: análisis experimental y numérico", financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle, Convocatoria Interna 2010 (Centro de Información 2620. Fecha de inicio: septiembre 19 de 2010. Fecha de finalización: marzo 16 de 2012).

Resumen

El estudio y las aplicaciones de estructuras deformables con formas celulares y relación de Poisson efectiva negativa son de interés en la actualidad para los sectores automotriz y aeroespacial, como también para la aplicación en componentes ópticos, biológicos, micro electrónicos, estructurales y termo mecánicos. Estas estructuras poseen baja densidad, alta rigidez a cortante en el plano y la capacidad de sufrir grandes deformaciones en el rango elástico del material constitutivo, comparada a una estructura sólida del mismo material. Este documento presenta un análisis numérico, utilizando el método de elementos finitos, del comportamiento estático en el plano de estructuras hexaquirales con coeficiente de Poisson efectivo negativo. Los resultados obtenidos sugieren un mejor control de los parámetros de las estructuras porque tienen en cuenta sus restricciones geométricas en aplicaciones reales, facilitando un diseño más flexible y confiable según el tipo de aplicación deseada.

Palabras claves: Estructura hexaquiral, módulo de elasticidad efectivo, coeficiente de Poisson efectivo negativo.

Abstract

Currently, the study and applications of morphing structures with cellular configurations and negative effective Poisson's ratio are of interest for the automotive and aerospace field, as also applications in optical, biological, microelectronic, structural and thermo-mechanical components. These structures have light weight, large shear stiffness and they resist large deformations in the elastic range of the constitutive material, if compared to a solid structure with the same material. This paper presents a numerical study of in-plane static behavior of hexachiral structure with negative effective Poisson's ratio, using the finite element method. The results obtained suggest a better control of the parameters of the structures because the geometrical restrictions of real applications are taken into account, making the design more flexible and reliable by the type of desired

Keywords: Hexagonal chiral structure, effective elastic modulus, negative effective Poisson's ratio

Fecha de recepción: 1 de diciembre de 2011
Fecha de aceptación: 4 de marzo de 2012

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras celulares en forma de panal se utilizan ampliamente en una variedad de aplicaciones de ingeniería por su bajo peso. La aplicación más común es en núcleos de paneles tipo sándwich utilizados en los sectores automotriz y aeroespacial, pero también se han implementado en componentes ópticos, biológicos, micro electrónicos, estructurales y termo mecánicos.

Las estructuras celulares compuestas por celdas hexaquirales son importantes en la actualidad porque su relación de Poisson efectiva (relación negativa entre las deformaciones globales de las estructuras ϵ_x y ϵ_y , y no del material que las constituye [1]) es negativa, lo que les provee la capacidad de deformarse ampliamente en el rango elástico del material y les proporciona alta resistencia a cortante en el plano, si se comparan con estructuras sólidas del mismo material [1]. Estas estructuras quirales reciben su nombre porque se componen de celdas con seis ligamentos unidos tangencialmente a un nodo [2]-[4], las cuales tienen simetría rotacional pero no de reflexión (ver figura 1).

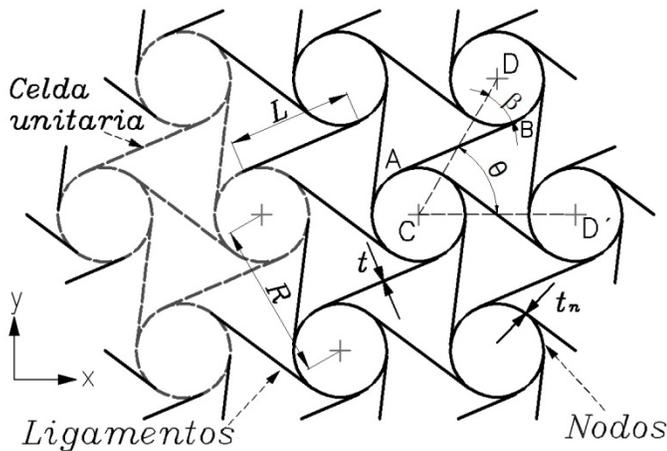


Figura 1. Parámetros geométricos de la estructura hexaquiral

La relación de Poisson negativa es un comportamiento característico de los materiales o estructuras que se expanden en todas las direcciones cuando la carga mecánica es de tracción y se comprimen en todas las direccio-

nes cuando la carga es de compresión. Este mecanismo de deformación es contrario al de los materiales con coeficientes de Poisson positivos, no obstante, puede ser estudiado utilizando las teorías clásicas de elasticidad [2]. En las estructuras hexaquirales (ver figura 1), la distancia entre los centros de los nodos se denota como R y la longitud de los ligamentos como L . El radio de los nodos se denomina r , el espesor de los ligamentos como t y el espesor de los nodos como t_n . El ángulo entre la línea CD , que conecta los centros de los nodos, y el ligamento AB se designa β . El ángulo entre las líneas que conectan los centros de los nodos se denota por θ y es igual a 60° . Las expresiones de la ecuación (1) describen las relaciones que definen la geometría celular [2], donde L , R y t varían generando diferentes configuraciones de la estructura.

$$\operatorname{sen}\beta = \frac{2r}{R} \qquad \tan \beta = \frac{2r}{L} \qquad (1)$$

La configuración hexaquiral como concepto estructural fue propuesta por Prall y Lakes [2], aunque su topología quiral y su comportamiento de Poisson negativo fue identificado por primera vez por Wojciechowski y Branka [5] e investigado en otros trabajos [6] - [8]. Las propiedades mecánicas de estas estructuras en el plano han sido estudiadas por Spadoni *et al.* [9] y Scarpa *et al.* [10]. También se ha encontrado que las estructuras hexaquirales facilitan el control de curvatura en perfiles aerodinámicos [11] - [15], sugieren su utilización para el diseño de novedosos meta-materiales fonónicos [13], [16], [17] y su aplicación para el sensado y la detección de impactos [18].

Utilizando la Teoría de Materiales Celulares CMT [1] (que permite el cálculo de las propiedades mecánicas de las estructuras celulares por medio de las teorías clásicas de Euler y Timoshenko al asumir los ligamentos como vigas), Prall y Lakes [2] demostraron que analíticamente las estructuras hexaquirales poseen un comportamiento isotrópico en el plano xy , lo que indica que los coeficientes de Poisson efectivos en las direcciones x y y , y los módulos de elasticidad efectivos (relación entre la fuerza aplicada sobre el área de sección de la estructura y su deformación global en la misma dirección [1]) en el plano, son iguales respectivamente ($u_{xy} = u_{yx}$ y $E_x = E_y$).

Además, se halló que las estructuras poseen teóricamente un coeficiente de Poisson efectivo igual a -1 [ver ecuación (2)], y que los módulos de elasticidad efectivos dependen del módulo de elasticidad del material E_s y de algunos parámetros geométricos de ellas como: t , L y r [ver ecuación (3)].

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = -1 \quad (2)$$

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{E_y}{E_s} = \sqrt{3} \frac{t^3 L^2}{L^3 r^2} \quad (3)$$

Estas propiedades se encontraron asumiendo redes infinitas en la que todos los nodos son rígidos y tienen seis ligamentos atados tangencialmente a ellos (condición hexaquiral). Sin embargo, en aplicaciones reales las redes están limitadas geométricamente, lo que implica que tienen un número finito de celdas unitarias; no todos los nodos cumplen con la condición hexaquiral y no todos los ligamentos están atados a nodos en sus extremos. Además, se desconocen las condiciones dimensionales que garantizan la rigidez de los nodos respecto a los ligamentos. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, el presente trabajo tiene como objeto predecir, mediante el método de elementos finitos, la influencia del número de celdas unitarias sobre las propiedades mecánicas de las estructuras hexaquirales, además del efecto del espesor de los nodos respecto al de los ligamentos y la relación de aspecto entre estos. La caracterización de este comportamiento facilitaría la selección de los parámetros geométricos de las estructuras hexaquirales de acuerdo con las propiedades mecánicas requeridas para su diseño en las diferentes aplicaciones.

2. METODOLOGÍA

Dimensionamiento de las estructuras a evaluar

Las configuraciones hexaquirales evaluadas se dimensionaron variando la cantidad de celdas unitarias, la relación entre el espesor de los nodos respecto al de los ligamentos t_n/t y la relación de aspecto entre estos L/R , como se presenta en la tabla 1 y la figura 2. El número mínimo de celdas

unitarias garantiza que al menos un nodo cumpla con la condición hexaquiral, y el máximo, que una mayor cantidad de nodos satisfagan esta condición sin un alto recurso computacional. Las relaciones t_n/t y L/R se seleccionaron de acuerdo con rangos dimensionales evaluados en estudios anteriores [2], [4], [11] - [16].

Tabla 1
 Variaciones geométricas en las estructuras hexaquirales evaluadas

Número de celdas unitarias	1x2, 2x5, 3x6 y 7x7
Relaciones t_n/t	1- 1,17- 1,33- 1,50- 1,67- 1,83 y 2
Relaciones L/R	0,6- 0,7-0,8 y 0,9

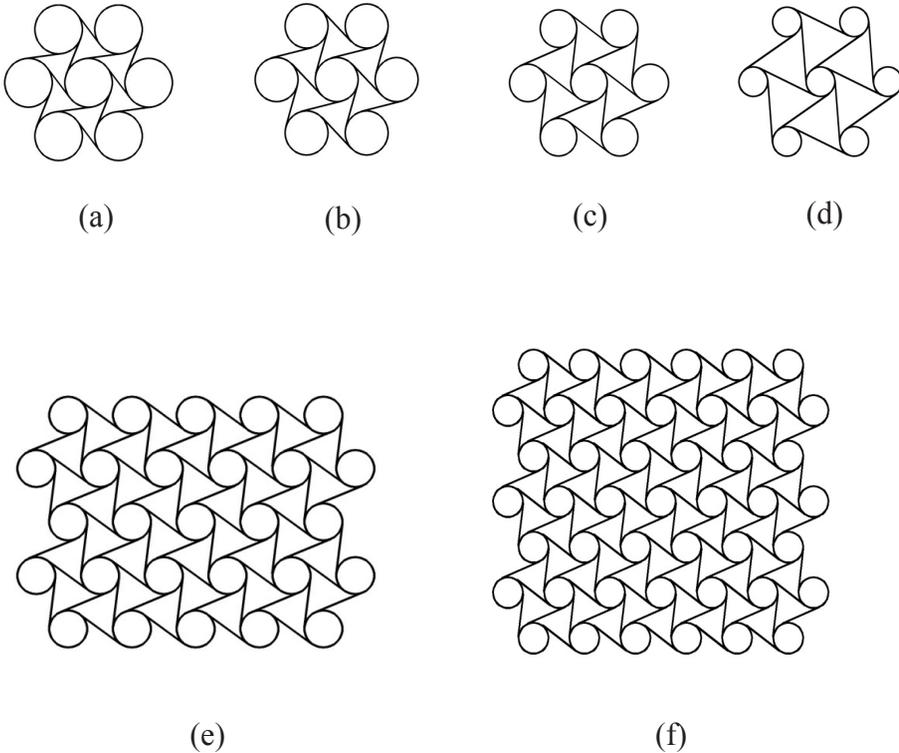


Figura 2

Ejemplos de las configuraciones hexaquirales estudiadas: a) 1x2, $L/R=0,6$; b) 1x2, $L/R=0,7$; c) 1x2, $L/R=0,8$; d) 1x2, $L/R=0,9$; e) 2x5, $L/R=0,8$; f) 3x6, $L/R=0,8$

El estudio de las estructuras se realizó con Aluminio 6061-T051 por su amplia utilización en los sectores aeroespacial y automotriz. Este material tiene un módulo de elasticidad E_s de 68,9 GPa, un coeficiente de Poisson ν_s de 0,33, una densidad ρ_s de 2700 kg/m³ y un esfuerzo de fluencia σ_y de 275,79 MPa. El espesor de los ligamentos t fue de 2 mm y el espesor fuera del plano de las estructuras de 25 mm, consistentes a las dimensiones evaluadas en estudios anteriores [14] - [16].

Modelos de elementos finitos para pruebas uniaxiales de estructuras hexaquirales

Para modelar la respuesta mecánica de las estructuras hexaquirales ante un estado de carga uniaxial se utilizó el programa ABAQUS 6.9-1 (Simulia Corp., Providence RI, USA). Los modelos se realizaron asumiendo el material elástico lineal y usando elementos planos estructurales tipo *Conventional Shell S4R*, que permiten modelar estructuras con una dimensión significativamente más pequeña que las otras dos, como es el caso del espesor de los ligamentos y los nodos en las estructuras quirales. Estos elementos tienen cuatro nodos y seis grados de libertad por nodo, y describen las traslaciones y las rotaciones en las direcciones x , y y z . Las mallas fueron estructuradas con elementos cuadriláteros.

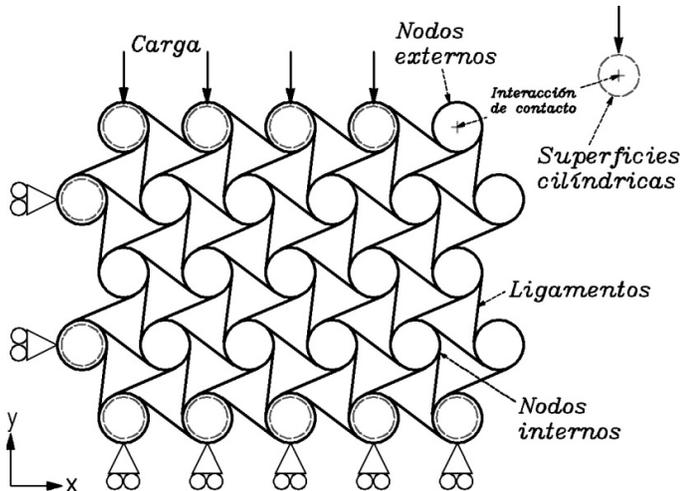


Figura 3
Estado de carga y condiciones de borde de las estructuras hexaquirales en el modelo numérico

Los nodos y los ligamentos fueron modelados como un solo cuerpo asumiendo un empalme continuo. Esto podría generar diferencias con la respuesta en estructuras reales en cuya construcción se requiere algún tipo de ensamble entre los nodos y los ligamentos, por la dificultad de construir las como un solo sólido.

Las estructuras hexaquirales fueron sometidas a un estado de carga estática de tensión y compresión en el plano dentro del rango elástico lineal del material. Para simular el comportamiento de los ligamentos como vigas, según la teoría CMT, se restringieron los desplazamientos de la estructura en dirección z y las rotaciones en las direcciones x y y . Las condiciones de borde y las cargas fueron impuestas en rodillos ubicados dentro de los nodos exteriores (ver figura 3).

Para evitar su deformación al momento de aplicar la carga, se rigidizaron los rodillos modelándolos con Acero SAE 1045 y un espesor 2,5 mayor al espesor de los ligamentos. La unión entre los nodos y los rodillos se realizó por contacto, se asumió un coeficiente de fricción de 0,01 para facilitar la rotación libre de los nodos sobre los rodillos y se consideró un “close gap” entre las superficies. A los rodillos de carga se les permitieron los desplazamientos en dirección x y y . Los rodillos ubicados en las caras opuesta y adyacente a la cara donde se situaron los rodillos de carga, pudieron desplazarse en la dirección de los bordes respectivos, como lo plantearon Alderson et al. [19].

Las deformaciones ε_i de las estructuras en la dirección i ($=x, y$) fueron calculadas promediando los desplazamientos relativos en la dirección i de nodos internos alineados de forma paralela a las caras orientadas en la coordenada j ($=y, x$). Los esfuerzos σ_i fueron calculados sumando las fuerzas aplicadas en los rodillos de carga sobre el área de sección de la respectiva cara. El área de sección correspondió al producto entre el espesor fuera del plano y la dimensión máxima de la estructura en j ($=y, x$). Las relaciones de Poisson efectivas y los módulos de elasticidad efectivos fueron calculados utilizando las definiciones clásicas: $\nu_i = \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$ y $E = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$, respectivamente, donde i fue la dirección de la carga.

3. RESULTADOS

Módulos de elasticidad efectivos

Los modelos numéricos mostraron que los módulos de elasticidad efectivos de las estructuras tienden a ser iguales en ambas direcciones cuando el número de celdas unitarias es grande, pero difieren cuando este es pequeño (ver figura 4-a). Este comportamiento puede ser atribuido a la cantidad de nodos que satisfacen la condición hexaquiral dentro de las estructuras, por ello difiere al comportamiento isotrópico encontrado analíticamente por Prall y Lakes [2], quienes asumen que la totalidad de los nodos en la red cumplen con esta condición, independientemente de la cantidad de celdas que la componen.

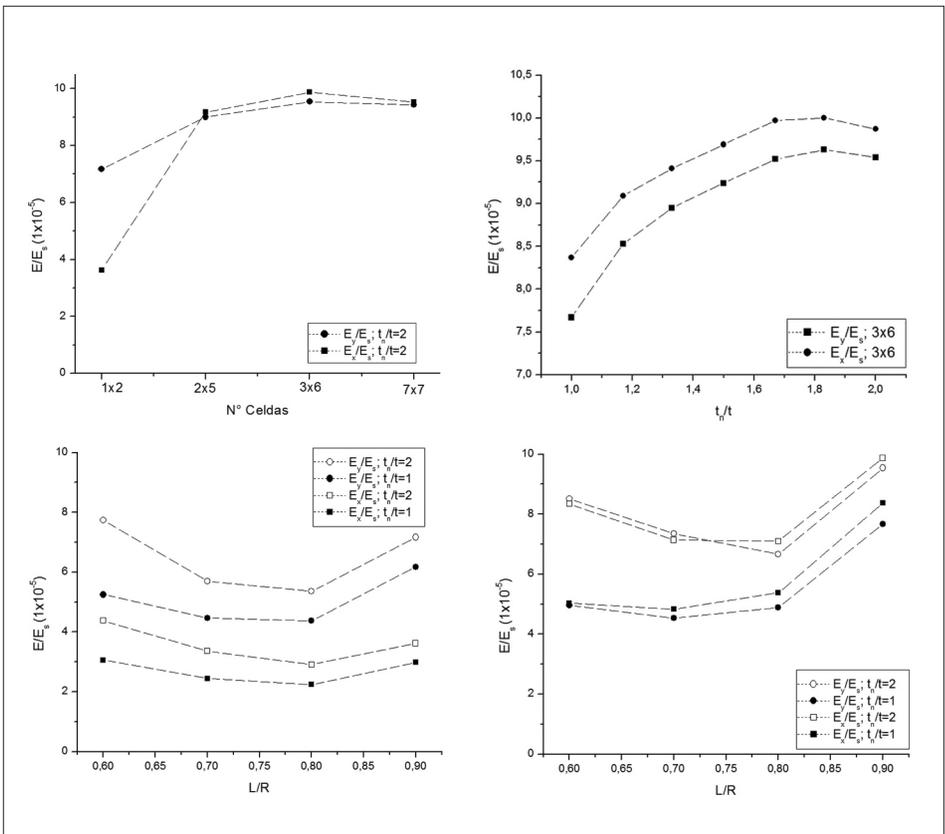


Figura 4

Predicción por elementos finitos de la relación entre los módulos de elasticidad E/E_s en función de: (a) el número de celdas unitarias; (b) la relación de espesores t_n/t ; y la relación L/R para estructuras hexaquirales con (c) 1x2 celdas y (d) 3x6 celdas

En el presente estudio, cuando el número de celdas unitarias es pequeño, la mayoría de los nodos están conectados solo a tres ligamentos (ver figura 5-a), mientras que en las estructuras con gran número de celdas el número de nodos que cumplen con la condición hexaquiral aumenta y su mecanismo de deformación se asemeja al encontrado analíticamente [2]. En ellas, la mayoría de los ligamentos actúan como vigas simplemente apoyadas con una fuerza y un momento flector en sus extremos, lo que permite que la distribución de las deformaciones y los esfuerzos sea uniforme y lineal a lo largo de los ligamentos, presentándose los nulos en las zonas medias y los máximos en la unión con los nodos (ver figura 5-b).

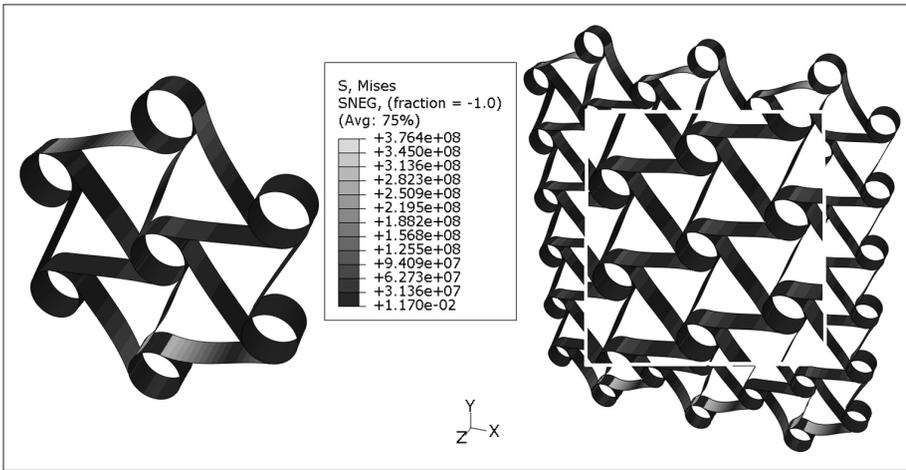


Figura 5

Comportamiento mecánico de una red hexaquiral con (a) 1x2 celdas unitarias y (b) 3x6 celdas unitarias

También se encontró que las estructuras con relación L/R de 0,7 y 0,8 son más flexibles que las estructuras con relación de 0,6 y que las estructuras con L/R de 0,9 son las más rígidas (ver figuras 4-c y 4-d). Esto se fundamenta en su arreglo geométrico-espacial. Cuando la relación L/R tiende a cero (ver figura 6-a), se obtiene una red de nodos circulares cuya disposición hexagonal impide el desplazamiento de la estructura, haciéndola rígida. De manera distinta, cuando la relación L/R tiende a 1 ($L/r \rightarrow \infty$) se consigue un ensamble triangular en forma de cercha (ver figura 6-c), que otorga al sistema la mayor rigidez. Mientras que para valores inter-

medios de L/R (ver figura 6-b), la rotación de los nodos y la flexión de los ligamentos concede el comportamiento de Poisson efectivo negativo que permite grandes deformaciones en la estructura.

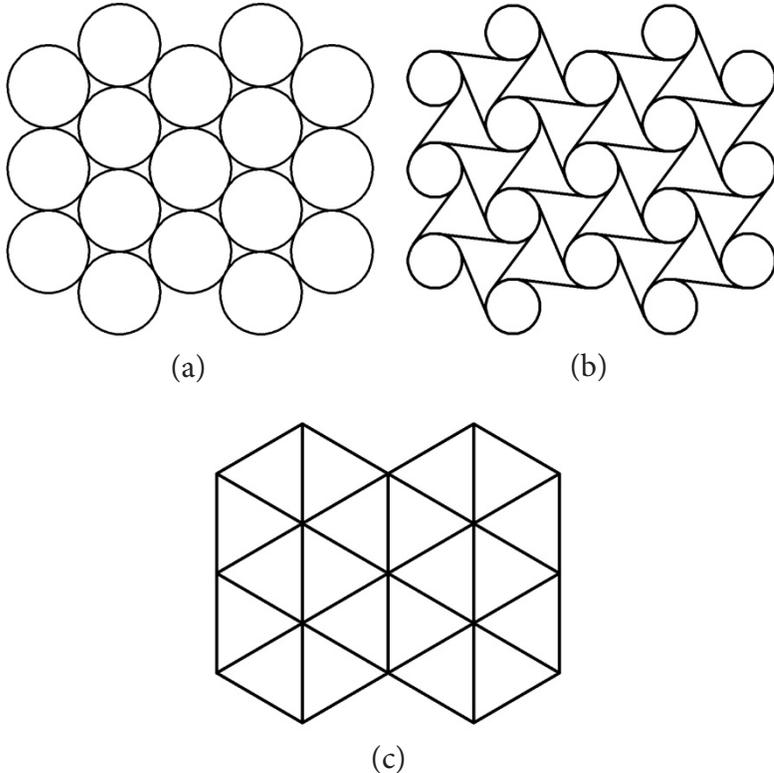
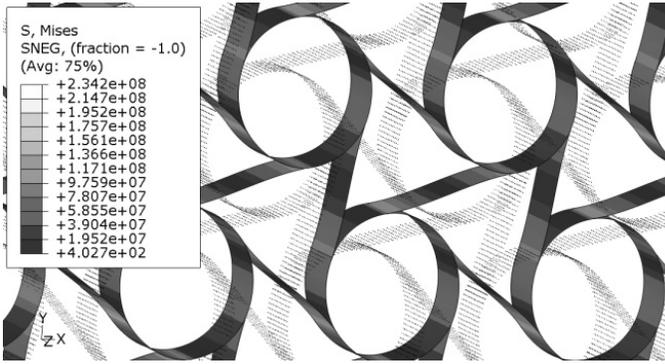
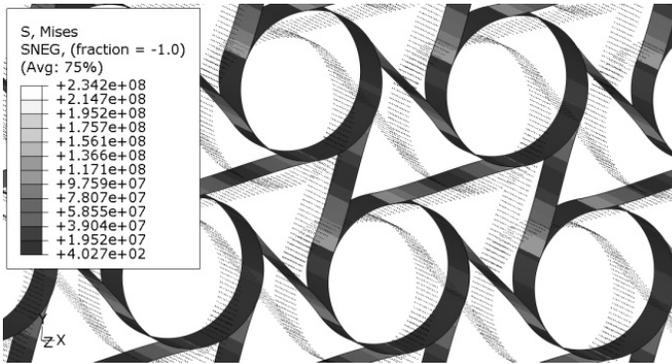


Figura 6
Configuraciones hexaquirales al aumentar la relación
 L/R : (a) $L/R \rightarrow 0$; (b) $L/R=0,80$; (c) $L/R \rightarrow 1$

Por otro lado, los resultados muestran que a medida que aumenta el espesor de los nodos respecto al de los ligamentos, las estructuras son más rígidas, los módulos de elasticidad efectivos aumentan y tienden a estabilizarse a partir de t_n/t igual a 1,6 (ver figura 4-b). Esto se explica porque cuando la relación t_n/t es pequeña los nodos son flexibles y, además de rotar, se deforman al ser aplicada la carga mecánica, como se observa en la figura 7-a; mientras que cuando t_n/t es grande, los nodos son más rígidos y no sufren deformaciones cortantes significativas, solo rotan, cumpliendo con lo planteado teóricamente [2], (ver figura 7-b).



(a)



(b)

Figura 7

Esfuerzos y deformaciones en los nodos para estructuras con relación t_n/t igual a (a) 1 y (b) 2, para una carga de 525 N

Coefficientes de Poisson efectivos

Los modelos numéricos confirmaron que las estructuras hexaquirales tienen un coeficiente de Poisson efectivo negativo. Sin embargo, se encontró que el comportamiento de estos coeficientes es anisotrópico en el plano al ser los u_{yx} mayores que los u_{xy} (ver figura 8), lo que difiere a lo planteado por Prall y Lakes [2], quienes determinaron que la respuesta de estos coeficientes en las estructuras es isotrópica. Este comportamiento puede ser causado por la cantidad de ligamentos atados a nodos externos, como se explicó en la sección anterior. Cuando la carga es aplicada en dirección x ,

los nodos externos están unidos a tres ligamentos que no ejercen suficiente resistencia y permiten un mayor desplazamiento de la estructura en esta dirección (ver figura 9-a). Cuando la carga es aplicada en la dirección y , los nodos externos están conectados entre si, lo que permite una mayor rigidez del sistema y una igualdad de los desplazamientos en ambas direcciones, (ver figura 9-b).

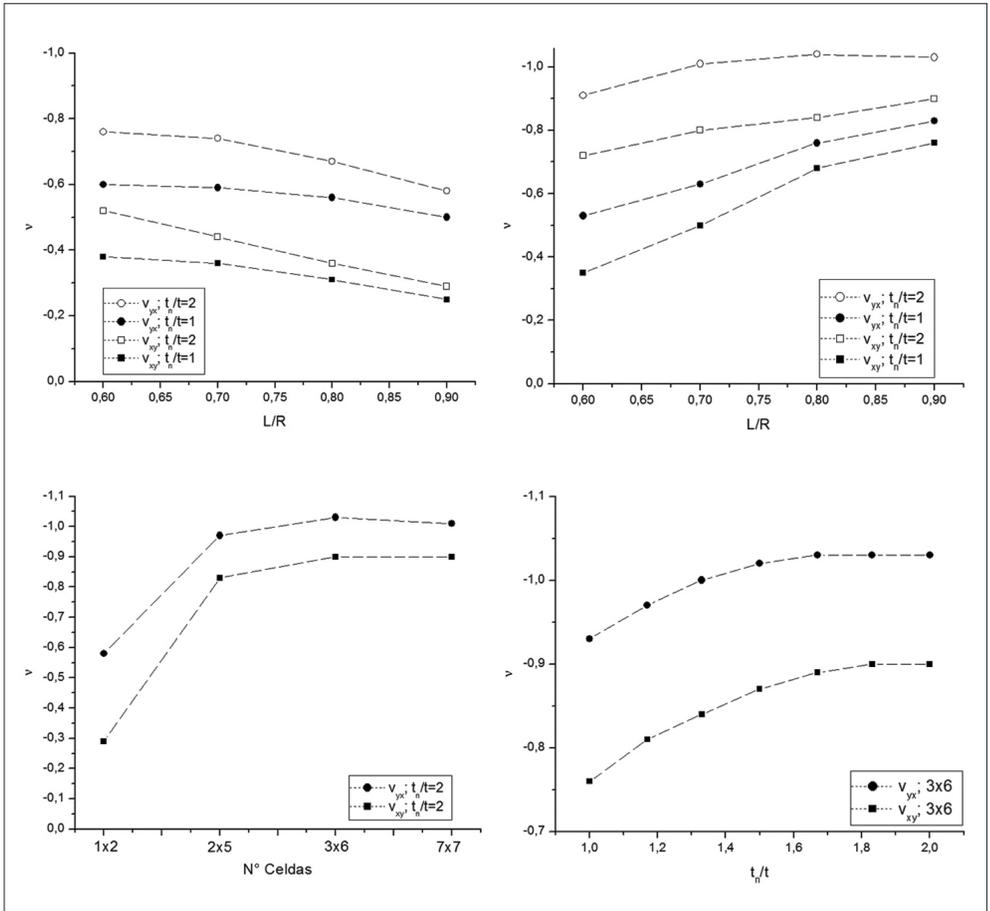


Figura 8

Predicción por elementos finitos del coeficiente de Poisson efectivo ν_{ij} en función de la relación L/R : (a) 1x2 celdas y (b) 3x6 celdas unitarias; (c) el número de celdas en la estructura; y (d) la relación de espesores t_n/t

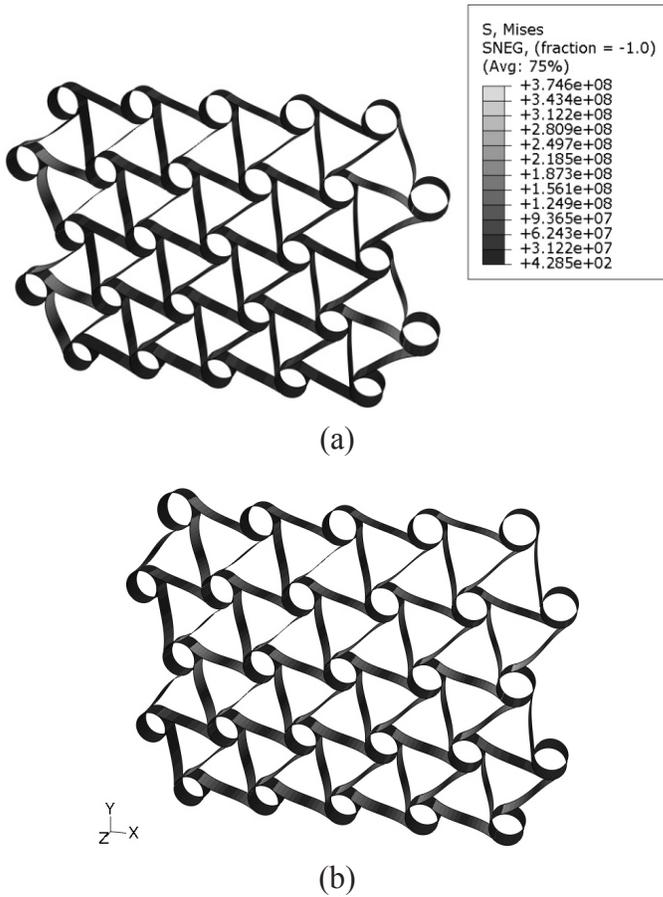


Figura 9

Comportamiento de una red hexaquiral con 2x5 celdas unitarias ante una carga mecánica en: (a) dirección x, (b) dirección y

Se encontró que en las estructuras con 1x2 celdas unitarias, los coeficientes de Poisson efectivos disminuyen a medida que aumenta la relación L/R alejándose del valor analítico de -1 (ver figura 8-a), al contrario de las estructuras con un mayor número de celdas unitarias cuyos coeficientes de Poisson efectivos tienden a dicho valor (ver figuras 8-b). Esto se explica porque en las estructuras pequeñas la mayoría de los nodos no cumplen con la condición hexaquiral y pueden desplazarse con mayor facilidad en dirección de la carga cuando los ligamentos son grandes respecto al radio de los nodos, mientras que en las estructuras grandes hay una mayor

contribución de la deformación cortante respecto a la deformación por flexión, acorde con lo explicado por Bornego *et al.* [11], cuando el radio de los nodos se incrementa y la longitud de los ligamentos disminuye.

El comportamiento sobre los coeficientes de Poisson efectivos al variar el número de celdas unitarias y la relación de espesores t_n/t se muestra con mayor detalle en las figuras 8-c y 8-d. Los coeficientes u_{yx} tienden a -1 cuando el número de celdas es grande (ver figura 8-c), y cuando la relación t_n/t es superior a 1,33 (ver figura 8-d). Los u_{xy} se estabilizan también, varían con la relación L/R y sus valores se encuentran entre -0,80 y -0,90, siendo cercanos a los resultados experimentales encontrados por Spadoni *et al.* [20].

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio numérico para caracterizar el comportamiento en el plano de estructuras hexaquirales bajo cargas uniaxiales al variar el número de celdas unitarias y sus parámetros geométricos. Se encontró que las estructuras con una cantidad finita de celdas unitarias pueden presentar un comportamiento anisotrópico de sus propiedades mecánicas (contrario al comportamiento isotrópico descrito en estudios analíticos anteriores) debido a que no todos los nodos cumplen con la condición de hexaquiral. De esta manera, para aplicaciones reales donde no todos los nodos satisfacen esta condición y no todos los ligamentos están atados a nodos en sus extremos, la caracterización mecánica de las estructuras realizada en este trabajo sugiere un mejor control de sus parámetros geométricos, facilitando un diseño más flexible y confiable según el tipo de aplicación deseada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectora de Investigaciones de la Universidad del Valle y a Colciencias por su apoyo para la realización de este proyecto. También dan un agradecimiento especial a la ingeniera Ingrid Padilla, de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, por su contribución a este trabajo. Además, agradecen el apoyo del Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores 2010 "VIRGINIA GUTIÉRREZ DE PINEDA" de Colciencias (Res. 024/04 C.S.; Convocatoria Nacional COLCIENCIAS No. 510-2010 para el Programa Jóvenes Investigadores año 2010; Res. Colciencias N° 01418 de 2010. Fecha de inicio: marzo 14 de 2011. Fecha de finalización: junio 15 de 2012).

REFERENCIAS

- [1] L. Gibson and M. Ashby, "The mechanics of honeycombs," in *Cellular solids, Structure and Properties*, 2th ed. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 1997, ch. 4, sec. 4.3, pp. 94-98.
- [2] D. Prall and R. S. Lakes, "Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio -1," *J. of Mech. Sciences*, vol. 39, pp. 305-314, 1996.
- [3] L. Yanping and H. Hong, "A review on auxetic structures and polymeric materials," *Scientific Research and Essays*, vol. 5, n.º 10, pp. 1052-1063, 2010.
- [4] W. Miller, C.W. Smith, F. Scarpa, and K.E. Evans, "Flatwise buckling optimization of hexachiral and tetrachiral honeycombs", *Composites Sci. and Technology*, vol. 70, n.º 7, pp. 1049-1056, 2010.
- [5] K. W. Wojciechowski and A. C. Branca, "Negative Poisson ratio in a two-dimensional "isotropic" model," *Physics Letters A Rev*, A40, pp.7222-7225, Dec. 1989.
- [6] S.W. Smith, J.N. Grima, and K.E. Evans, "Novel mechanism producing negative Poisson's ratios in reticulated foams," *Acta Materialia*, vol. 48, n.º 17, pp. 4349-4356, 2000.
- [7] N. Gaspar, X.J. Ren, C.W. Smith, J.N. Grima and K.E. Evans, "Novel honeycombs with auxetic behavior," *Acta Materialia*, vol. 53, n.º 8, pp. 2439-2445, May 2005.
- [8] J.N. Grima, R. Gatt, and P.S. Farrugia, "On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures," *Physica Status Solidi B*, vol. 245, n.º 3, pp. 511-520, Feb. 2008.
- [9] A. Spadoni, M. Ruzzene, and F. Scarpa, "Global and local linear buckling behavior of a chiral cellular structure," *Physica Status Solidi B*, vol. 242, n.º 3, pp. 695-709, Feb. 2005.
- [10] F. Scarpa, S. Blain, T. Lew, D. Perrott, M. Ruzzene and J.R. Yates, "Elastic buckling of hexagonal chiral cell honeycombs," *Composites Part A*, vol. 38, n.º 2, pp. 280-289, Feb. 2007.
- [11] D. Bornengo, F. Scarpa, and C. Remillat, "Evaluation of hexagonal chiral structure for morphing airfoil concept," *J. Aerospace Eng.*, vol. 219, n.º 3, pp. 185-192, 2005.
- [12] A. Spadoni and M. Ruzzene, "Static aeroelastic response of chiral-core airfoils," *J. of Intelligent Material Syst. and Structures*, vol. 18, n.º 10, pp. 1067-1075, May 2007.
- [13] A. Spadoni and M. Ruzzene, "Structural and acoustic behavior of chiral truss-core beams," *J. of Vibration and Acoust.*, vol. 128, n.º 5, pp. 616-626, 2006.
- [14] A. Spadoni and M. Ruzzene, "Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoil," *J. of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 2, n.º 5, pp. 965-981, 2007.
- [15] P. Bettini, A. Airoidi, G. Sala, L.D. Landro, M. Ruzzene, and A. Spadoni, "Composite chiral structures for morphing airfoils: Numerical analyses and development of a manufacturing process," *Composites: Part B*, vol. 41, n.º 2, pp. 133-147, 2009.
- [16] A. Spadoni, M. Ruzzene, and F. Scarpa, "Dynamic response of chiral truss-core assemblies," *J. of Intelligent Material Syst. and Structures*, vol. 17, n.º 11, pp. 941-952, Nov, 2006.
- [17] S. Gonella, A. Spadoni, M. Ruzzene, and F. Scarpa, "Wave propagation and band-gap characteristics of chiral lattices," in *ASME 2007 Int. Design Eng. Tech. Conf. and Computers and Information in Eng. Conf.*, Las Vegas, pp. 505-515.
- [18] H. Abramovitch, M. Burgard, L. Edery-Azulay, K.E. Evans, M. Hoffmeister, W. Miller, F. Scarpa, C.W. Smith, and K.F. Tee, "Smart tetrachiral and hexachiral honeycomb: Sensing and impact detection," *Composites Sci. and Technology*, vol. 70, n.º 7, pp. 1072-1079, 2010.
- [19] A. Alderson, K.L. Alderson, G. Chirima, N. Ravirala, and K.M. Zied, "The in-plane linear elastic constants and out-of-plane bending of 3-coordinated ligament and cylinder-ligament honeycombs," *Composites Sci. and Technology*, vol. 70, n.º 7, pp. 1034-1041, Jul, 2010.
- [20] A. Spadoni and M. Ruzzene, "Static aeroelastic behavior of a chiral-core airfoil," in *16th Int. Conf. on Adaptive Structures Tech. (ICAST)*, París, 2005.