

Análisis del comportamiento de la relación de Poisson respecto a la variación de los parámetros geométricos en materiales auxéticos planos.

Camilo Andrés Másmela Díaz, Diddy Alexander Prada Barajas

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

Ph.D.en Ingeniería de Estructuras

Codirector

Jesús Antonio García Sánchez

Ph.D.en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios por guiarnos en todo momento y ayudarnos a tomar las mejores decisiones para así poder concluir satisfactoriamente esta etapa de nuestras vidas.

A nuestras familias las cuales nos apoyaron incondicionalmente y en este momento, con orgullo, hacen parte fundamental de este logro.

A nuestros parceros y parceritas por aconsejarnos, distraernos, regañarnos y aguantarnos, pa' ellos va el cumplimiento de esta meta de muchas más.

De nosotros pa' ustedes.

A mi segundo padre, Nonito, te dedico este logro y espero que en la gloria del cielo estés orgulloso de mí.

Camilo Andrés Másmela Díaz

Y pa' terminar a mi compañero y marido, a ese que me aguanto uno y varios semestres, en las amarguras y alegrías, pa' él va también un pedacito de esta dedicatoria ome.

De vos pa' mí y de mí pa' vos

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecerle a Dios por brindarnos la capacidad y salud para poder estar más cerca de culminar nuestras metas personales y profesionales. A la Universidad Industrial de Santander por brindar las instalaciones y recursos para el desarrollo del proyecto. A los profesores Oscar Begambre y Jesús García por la dedicación y tiempo que invirtieron en el transcurso de estos meses. Al profesor Octavio Gonzales por abrirnos un espacio en sus salas de cómputo y facilitarnos el uso del software. En especial a nuestras familias, por la motivación, paciencia, entrega, cariño y apoyo que supieron darnos para seguir adelante y nunca dejar de creer en las habilidades y capacidades propias de cada uno de nosotros. A nuestros amigos incondicionales los cuales, a pesar de tantas y tan seguidas interrupciones entre café, Póker y charlas, no lograron evitar que pudiésemos culminar nuestro proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos.....	17
2. Marco teórico	18
2.1 Método de elementos finitos	18
2.2 Análisis lineal y no lineal	18
2.3 Método factorial	19
2.4 Coeficiente de poisson	20
2.5 Metamateriales	21
3. Simulación numérica de las estructuras	24
3.1 Material	24
3.2 Celdas	25
3.3 Modelo de elementos finitos	27
3.3.1 Malla.....	27
3.3.2 Cargas y condiciones de contorno.....	27
3.4 Validación de la simulación	28
3.5 Coeficiente de poisson y deformación unitaria	29
3.6 Método factorial	31

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL COEF. DE POISSON	8
4. Análisis de resultados.....	32
4.1 Re-entrant honeycomb	35
4.1.1 Desplazamiento controlado en dirección x..	35
4.1.2 Desplazamiento controlado en dirección y.	38
4.2 Rca.....	41
4.2.1 Desplazamiento controlado en dirección x..	41
4.2.2 Desplazamiento controlado en dirección y.	44
5. Recomendaciones.....	47
6. Conclusiones	47
Referencias bibliográficas	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores mínimos y máximos para los parámetros de la celda Re-entrant honeycomb....	31
Tabla 2. Valores mínimos y máximos para los parámetros de la celda RCA.	32
Tabla 3. Combinaciones de la variación de los parámetros para la celda Re-entrant honeycomb al ser cargada en X o Y.	33
Tabla 4. Combinaciones de la variación de los parámetros para la celda RCA.....	34
Tabla 5. Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ϵ_f), relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda Re-entrant honeycomb ante desplazamientos controlados en dirección X.	38
Tabla 6. Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ϵ_f) relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda Re-entrant honeycomb ante desplazamiento controlado en Y.	40
Tabla 7. Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ϵ_f), relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda RCA ante desplazamiento controlado en X.....	42
Tabla 8. Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ϵ_f), relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda RCA ante desplazamiento controlado en Y.....	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Proceso de discretización MEF: a) medio continuo, b) discretización y c) elemento finito..	18
Figura 2. Comportamiento de un elemento sometido a esfuerzos en tracción.....	21
Figura 3. Mallado reentrante. Tomado de Diseño, construcción y caracterización de un material auxético.	22
Figura 4. Panal quiral. Tomado de Diseño, construcción y caracterización de un material auxético.	23
Figura 5. Modelo de geometría semi-rígida. Tomado de Diseño, construcción y caracterización de un material auxético..	23
Figura 6. Curva de esfuerzo verdadero - deformación verdadera del material PC/ABS.	24
Figura 7. Celdas auxéticas unitarias: a) trichiral honeycomb, b) anti-trichiral honeycomb, c) tetrachiral honeycomb, d) anti-tetrachiral honeycomb, e) re-entrant honeycomb, f) RCA.	25
Figura 8. Celda a) Re-entrant honeycomb y b) RCA con sus respectivas dimensiones.	26
Figura 9. Malla para las celdas a) Re-entrant honeycomb, b) RCA.....	27
Figura 10. Restricciones y dirección de carga de las estructuras: Re-entrant honeycomb en a) X y b) Y; y RCA en c) X y d) Y.	28
Figura 11. Calibración curva esfuerzo-deformación unitaria para estructura RCA ante cargas en X y Y.....	29
Figura 12. Dimensiones a) iniciales y b) finales de la estructura al ser cargada en dirección X. ..	30

Figura 13. Curva Relación de Poisson-Deformación unitaria para la estructura Re-entrant honeycomb ante carga en a) X y b) Y.....	35
Figura 14. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en X.....	36
Figura 15. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en X.....	37
Figura 16. Gráfica de efectos principales para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en X.	37
Figura 17. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en Y.....	39
Figura 18. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en Y.....	39
Figura 19. Gráfica de efectos principales para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en Y.	40
Figura 20. Curva Relación de Poisson-Deformación unitaria para estructura RCA ante carga en a) X y b) Y.....	42
Figura 21. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura RCA ante carga en X.....	43
Figura 22. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura RCA ante carga en X.	43
Figura 23. Gráfica de efectos principales para estructura RCA ante carga en X.....	44
Figura 24. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura RCA ante carga en Y.....	45
Figura 25. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura RCA ante carga en Y..	46
Figura 26. Gráfica de efectos principales para estructura RCA ante carga en Y.....	46

Lista de Apéndices

(Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS)

Apéndice A. Geometrías parametrizadas en el software comercial INVENTOR®.

Apéndice B. Modelo base estructura RCA en el software comercial ANSYS®.

Apéndice C. Curvas relación de Poisson-deformación unitaria.

Apéndice D. Datos obtenidos software comercial ANSYS®.

Resumen

TÍTULO: Análisis del comportamiento de la relación de Poisson respecto a la variación de los parámetros geométricos en materiales auxéticos planos*

AUTORES: Camilo Andrés Másmela Díaz, Diddy Alexander Prada Barajas**

PALABRAS CLAVE: Auxético, Deformación unitaria, Diseño de experimentos factorial 2^k , Metamateriales, RCA, Re-entrant Honeycomb, Relación de Poisson.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de la presente investigación es determinar el parámetro geométrico más influyente en la relación de Poisson para las estructuras auxéticas planas *re-entrant honeycomb* y *re-entrant chiral auxetic* (RCA), al ser sometidas a cargas estáticas de tracción inducidas por un desplazamiento controlado para su posterior análisis en el rango lineal y en el rango no lineal. Se realizaron simulaciones numéricas estructurales en el software comercial de análisis mediante elementos finitos ANSYS® de las estructuras extraídas de la literatura. Las estructuras fueron modeladas, parametrizadas y sus variantes fueron estipuladas mediante el diseño de experimentos factorial 2^k . Las estructuras se generan utilizando combinaciones de valores máximos y mínimos de los parámetros definidos para las estructuras planas. Las cargas se aplicaron de forma independiente, mediante un desplazamiento controlado en las direcciones X y Y, para cada estructura. Por lo tanto, se obtuvo la gráfica de relación de Poisson – deformación unitaria axial para cada estructura. Del análisis de resultados se observa un aumento de la relación de Poisson negativa (propiedad auxética) para las estructuras *re-entrant honeycomb* y *re-entrant chiral auxetic* cuando son sometidas ante cargas inducidas en dirección X, por el contrario, se pierde dicha propiedad al aplicar un desplazamiento en dirección Y. Además, se determina que la variación del parámetro θ (ángulo interno de la celda) presenta la mayor influencia sobre la relación de Poisson, mientras que la variación del parámetro t (espesor de la celda) no influye significativamente dicha propiedad.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Ingeniero Civil. Codirector: Jesús Antonio García Sánchez, Ingeniero Civil.

Abstract

TITLE: Behavior analysis of the Poisson ratio regarding the variation of the geometric parameters in plane auxetic materials*

AUTHORS: Camilo Andrés Másmela Díaz, Diddy Alexander Prada Barajas**

KEYWORDS: Auxetic, Strain, Factorial experimental design 2^k , Metamaterials, RCA, Re-entrant Honeycomb, Poisson ratio.

DESCRIPTION:

The objective of the present investigation is to determine the most influential geometrical parameter in the Poisson's ratio for the auxetic plane structures, *re-entrant honeycomb* and *re-entrant chiral auxetic* (RCA), when are submitting to static tensile loads induced by controlled displacement for further analysis in the linear range and the nonlinear range. The numerical structural simulations were realized in the commercial finite element analysis software ANSYS® for structures obtained from the literature. The structures were modeled, parameterized and their variants were stipulated by the factorial experimental design 2^k . The samples are generated using combinations of maximum and minimum values of the parameters defined for the plane structures. The loads were applied independently, by a controlled displacement in X and Y directions, for each sample. Therefore, Poisson ratio – axial strain graphs were obtained for each sample. Results showed that an increase of the negative Poisson ratio (auxetic property) for the structures *re-entrant honeycomb* and *re-entrant chiral auxetic* when they are subjected by loads induced by displacement in X direction, oppositely, this property is lost when applying a displacement in Y direction. In addition, the variation of the parameter θ (internal angle of cell) has the greatest influence on the Poisson ratio, while the variation of the parameter t (cell thickness) which does not affect the aforementioned property.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Ingeniero Civil. Codirector: Jesús Antonio García Sánchez, Ingeniero Civil.

Introducción

El desarrollo de nuevos materiales permite generar grandes avances en diferentes áreas de la industria, respondiendo a nuevas necesidades o aplicaciones tecnológicas con el propósito de facilitar y mejorar la adaptación al entorno (Wessel, 2004). En este proceso, es fundamental la investigación básica, a través de la cual es posible estudiar y caracterizar nuevos materiales, siendo este el primer paso para posteriormente descubrir posibles aplicaciones (Cordero, 2009).

Actualmente un conjunto de materiales viene impactando grandemente en la investigación y la industria, estos son denominados metamateriales. Los metamateriales se definen como compuestos macroscópicos que poseen una estructura periódica artificial característica denominada celda, diseñada con el objetivo de otorgar una propiedad específica que le permita al material responder ante una solicitud determinada (Walser, 2001).

Los metamateriales proporcionan propiedades físicas contra intuitivas (índices y coeficientes negativos), tales como coeficientes de refracción y Poisson, índices de resistividad y permisividad, entre otros. El presente trabajo se enfoca en analizar los materiales con coeficiente de Poisson negativo, denominados materiales auxéticos (Sierra, 2017).

El coeficiente de Poisson se explica, en la teoría de la elasticidad, como la relación de los efectos producidos en direcciones ortogonales entre sí debido a una solicitud uniaxial aplicada (Borcea & Streinu, 2018). Es posible la variación de esta propiedad a partir de la micro-estructuración periódica artificial, además el rango de valores en el que oscila la relación de

Poisson es de -1 a 0.5 (Dirrenberger, Forest, & Jeulin, 2012), tomando los valores negativos para los materiales con un comportamiento denominado auxético (Borcea & Streinu, 2018).

El comportamiento de un material que posee una relación de Poisson negativa se evidencia en la respuesta generada por sí mismo a nivel de deformación, es decir, al aplicar una carga en tensión o compresión en una dirección definida del material, este tenderá a responder de manera similar en dirección perpendicular expandiéndose o contrayéndose respectivamente (Borcea & Streinu, 2018).

Los materiales y compuestos auxéticos, los cuales poseen valores de relación de Poisson negativa, pueden proporcionar propiedades mecánicas mejoradas y adaptadas tales como resistencia al corte, amortiguación acústica, tenacidad a la fractura, absorción de energía, entre otras, lo cual los hace llamativos para el área de la industria de la construcción (Carneiro & Puga, 2018; Dirrenberger et al., 2012; Wang, 2018).

Estudios de las últimas décadas han propuesto diversas estructuras planas periódicas artificiales que presentan propiedades auxéticas, las cuales se obtienen a partir de la configuración geométrica de la celda. Los parámetros que definen dicha configuración geométrica afectan el coeficiente de Poisson, por tanto, el objetivo de la presente investigación es identificar mediante un diseño de experimento factorial, basado en los resultados obtenidos a través de simulaciones en un software de análisis mediante elementos finitos, la influencia de estos en estructuras auxéticas extraídas de la literatura.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el parámetro geométrico más influyente en la relación de Poisson, para materiales auxéticos planos, cuando son sometidos a cargas estáticas de tracción en el rango lineal y no lineal, variando los parámetros en simulaciones numéricas.

1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar las disposiciones de las estructuras internas de un material auxético con base en la literatura.
- Determinar mediante el análisis factorial, y teniendo en cuenta el número de variables geométricas, la cantidad de modelos numéricos requeridos para obtener resultados concluyentes.
- Generar y analizar modelos numéricos mediante un software de análisis por el método de elementos finitos teniendo en cuenta la estructura interna, propiedades físicas del material y la variación de los parámetros geométricos de la celda.

2. Marco Teórico

2.1 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico mediante el cual se obtiene una solución numérica aproximada de un sólido (medio continuo) que se subdivide en partes pequeñas denominadas elementos finitos (ver Figura 1), por medio de una discretización del modelo (Bautista & Corzo, 2018). Los elementos se interconectan a través de nodos sujetos a los efectos ocasionados por las condiciones de frontera inducidas al sólido en estudio (Jiménez, 2004).

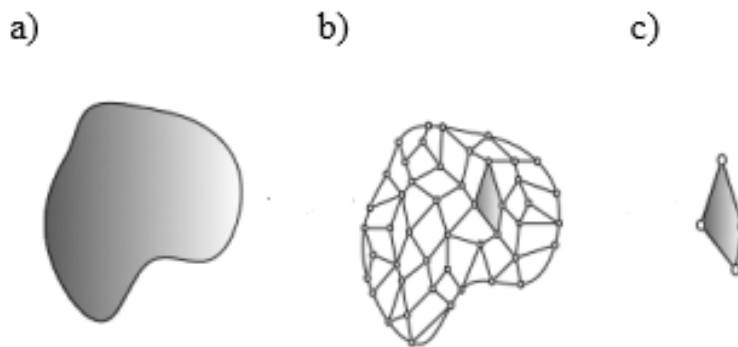


Figura 1. Proceso de discretización MEF: a) medio continuo, b) discretización y c) elemento finito. Adaptado de Bautista y Corzo (2018).

2.2 Análisis lineal y no lineal

El análisis lineal y no lineal se implementan en el estudio y predicción del comportamiento de materiales, estos tienen en cuenta variables tales como la precisión requerida y la respuesta del

mismo, con el fin de determinar el análisis óptimo y apropiado.

Cuando el material presenta deformaciones infinitesimales y la relación de carga vs deformación es linealmente elástica, es apropiado aplicar el análisis lineal. Sin embargo, este análisis puede describir de manera lineal, aunque poco aproximada el comportamiento en el rango inelástico.

El análisis no lineal es conveniente implementarlo cuando la respuesta del material supera el límite elástico, presentando deformaciones permanentes y una relación entre carga y deformación unitaria variable. Este tipo de análisis brinda resultados más aproximados al espectro real de respuesta implicando así un nivel de confianza mayor en el estudio de dicho material.

Las dos principales clasificaciones de la no linealidad del material son la no linealidad del material o también llamada no linealidad física, que se presenta cuando la relación de tensión vs deformación no responde de manera constante en el proceso de deformación y la no linealidad geométrica, la cual se caracteriza por presentar considerables desplazamientos, deformaciones y rotaciones en su configuración geométrica según responde ante diversas cargas (Di Rado, 2006).

2.3 Método factorial

El diseño factorial es una metodología estadística que permite a los investigadores examinar el efecto de cada factor independiente y el de múltiples variables en una respuesta específica, además, reduce el número de experimentos en los que se deben investigar múltiples factores simultáneamente (Kobilinsky, Monod, & Bailey, 2017). Además, el diseño factorial evalúa todas las condiciones posibles, por ende suele ser implementado cuando la cantidad de variables es reducida o limitada (Balbaşı, 2013).

En comparación con otros métodos de análisis de sensibilidad, la técnica de análisis factorial cuantifica la sensibilidad de los resultados del modelo a los parámetros individuales, así como a sus interacciones, de modo que se implementa en diversas áreas de aplicación, tales como investigación de alimentos, biología, industria y experimentos con computadora (Lee, Park, & Kim, 2018).

2.4 Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson se define, para un material que está sujeto a una carga uniaxial, como la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal en la dirección de la carga (Greaves, Greer, Lakes, & Rouxel, 2011):

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}}$$

De la teoría clásica de la elasticidad, se ha determinado que los materiales isotrópicos presentan una relación de Poisson en el rango de -1 a 0.5 (Kocer, McKenzie, & Bilek, 2009).

Comúnmente en la naturaleza los materiales poseen un coeficiente de Poisson positivo, es decir, al ser sometidos a una carga uniaxial de tracción o compresión tienden a contraerse o estirarse, respectivamente, en la dirección ortogonal (ver Figura 2). Sin embargo, ciertos materiales exhiben un comportamiento opuesto presentando una relación de Poisson negativa y son conocidos como materiales auxéticos (Carneiro & Puga, 2018).

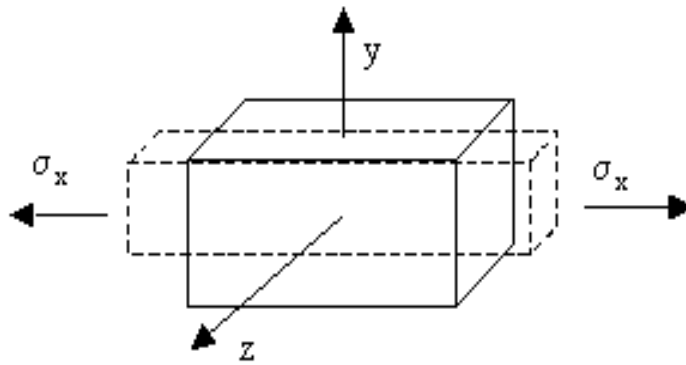


Figura 2. Comportamiento de un elemento sometido a esfuerzos en tracción. Tomado de Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica. Pérez (2018).

2.5 Metamateriales

Los metamateriales se definen como compuestos macroscópicos que poseen una estructura periódica artificial diseñada para producir características inexistentes en la naturaleza como respuesta a una sollicitación externa. En la actualidad existen diversas familias de metamateriales, tales como estructurales, electromagnéticos, acústicos, no lineales y mecánicos (Morales, 2009)

Los metamateriales mecánicos poseen propiedades mecánicas definidas por la topología de la estructura (Barón, 2016), a partir de las cuales se clasifican en metafluidos, acústicos, metamateriales con coeficiente de Poisson negativo (auxéticos), y metamateriales con módulos de compresibilidad lineal y volumétrica negativos.

La propiedad auxética corresponde a una expansión o contracción en la sección transversal cuando es sometida la estructura a cargas axiales de tracción o compresión respectivamente. Como consecuencia de poseer dicha propiedad auxética se presentan propiedades secundarias específicas tales como:

- Resistencia a la fractura.
- Resistencia a la indentación.
- Resistencia a la cizalladura.
- Absorción acústica.
- Comportamiento sinclástico.
- Permeabilidad variable.
- Memoria de forma.

Los metamateriales mecánicos auxéticos se agrupan en tres grandes grupos: polímeros, compuestos reforzados con fibras y sólidos reticulares. Basados en la distribución geométrica de las estructuras a nivel macroscópico, toman el nombre de sólidos reticulares.

Las estructuras formadas por celdas hexagonales con ángulo interno menor a 90° son denominadas estructuras reentrantes, como se evidencia en la Figura 3.

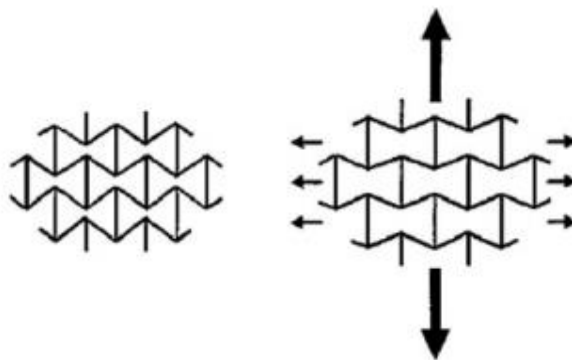


Figura 3. Mallado reentrante. Tomado de Diseño, construcción y caracterización de un material auxético. Liu y Hu (2015).

Las estructuras quirales poseen un eje de rotación, estas se componen de un nodo central, del cual se conecta tangencialmente un nervio a diversos nodos (ver Figura 4).



Figura 4. Panal quiral. Tomado de Diseño, construcción y caracterización de un material auxético. Sierra (2017).

El modelo con deformación semirígido implementa bisagras semirígidas para la unión entre estructuras rígidas, de tal manera que al aplicar esfuerzos en tracción responde con una expansión bidireccional debido a que las bisagras de unión permiten la rotación de los elementos (ver Figura 5).

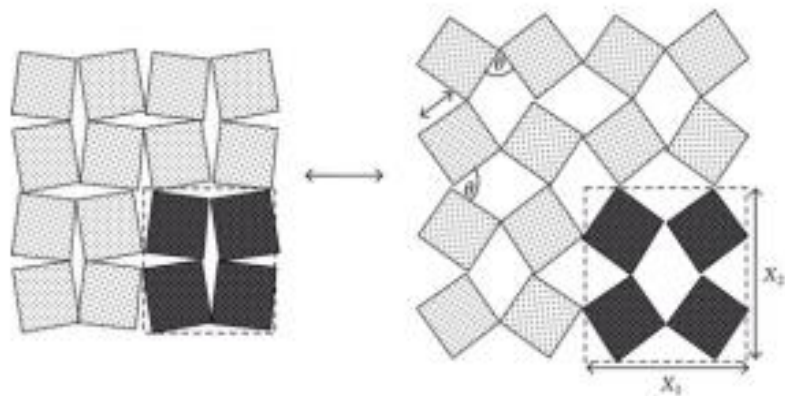


Figura 5. Modelo de geometría semi-rígida. Tomado de Diseño, construcción y caracterización de un material auxético. Sierra (2017).

3. Simulación numérica de las estructuras

3.1 Material

Conforme a las dimensiones de la estructura resulta conveniente que sean elaboradas con el material PC/ABS el cual es común en la industria de la impresión 3D, óptimo para escalas reducidas y caracterizado en la Figura 6 implementando valores de deformación unitaria verdadera, la cual considera el incremento de la deformación como un incremento secuencial del desplazamiento dividido entre la longitud inicial de la muestra, y esfuerzo verdadero el cual es la relación entre la carga aplicada y el área instantánea (David & Becerril, 2014).

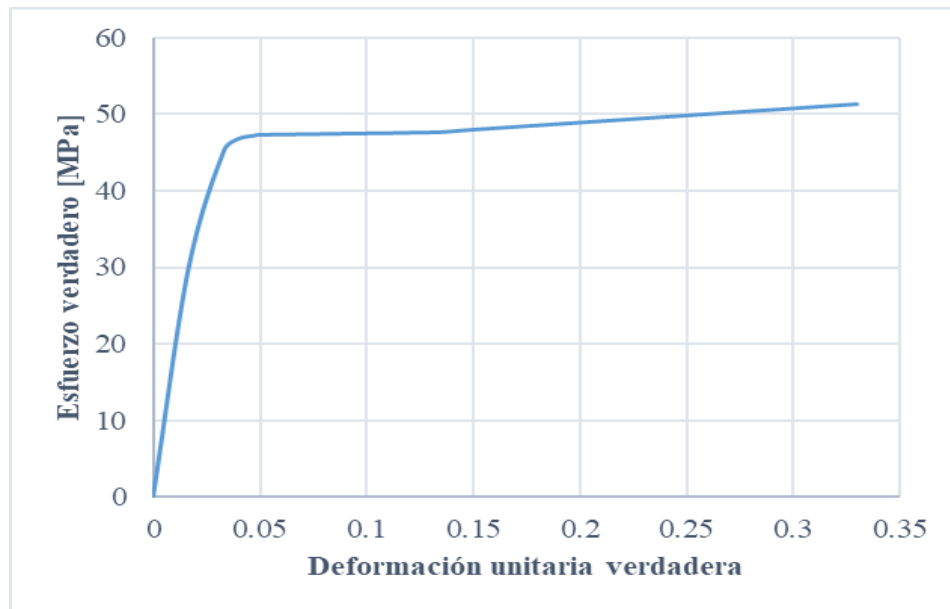


Figura 6. Curva de esfuerzo verdadero - deformación verdadera del material PC/ABS. Adaptado de Arriaga *et al.* (2007).

3.2 Celdas

Las estructuras básicas que se replican de manera periódica en dirección X y Y se denominan celdas, el número de veces que esta es replicada define el tamaño de la estructura.

A partir de investigaciones sobre metamateriales auxéticos se han desarrollado diversas estructuras que poseen una relación de Poisson negativa (Ver Figura 7). Las estructuras auxéticas son comúnmente estudiadas mediante simulaciones numéricas, dado que son un método eficiente y ampliamente empleado para investigar los efectos de parámetros geométricos sobre el comportamiento mecánico de las estructuras (Besant, Davies, & Hitchings, 2001; Hou, Deng, & Zhang, 2016; Xu, Ruan, & Beynon, 2014). Entre las celdas con coeficiente de Poisson negativo más estudiadas se encuentra la Re-entrant honeycomb (Evans, Alderson, & Christian, 1995; Wan, Ohtaki, Kotosaka, & Hu, 2004) en contraste con la RCA, dado que es una estructura novedosa pero poco estudiada. Ambos tipos de celda han evidenciado un notable comportamiento auxético y son las configuraciones geométricas base para el análisis de la presente investigación.

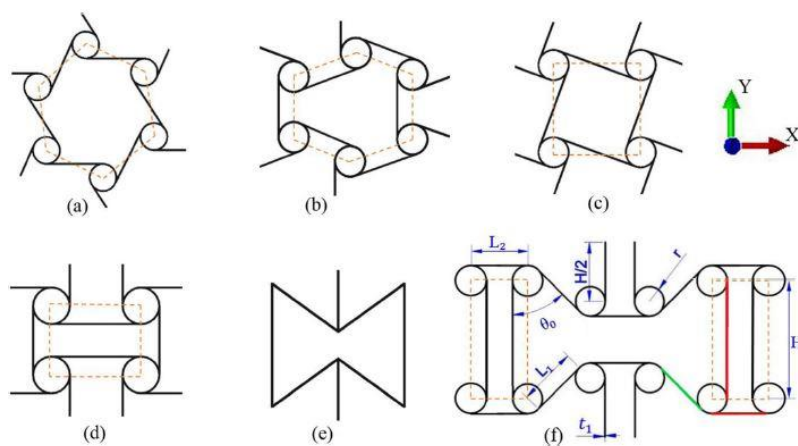


Figura 7. Celdas auxéticas unitarias: a) trichiral honeycomb, b) anti-trichiral honeycomb, c) tetrachiral honeycomb, d) anti-tetrachiral honeycomb, e) re-entrant honeycomb, f) RCA. Tomado de Alomarah, Ruan, y Masood (2018).

Los parámetros que serán variados en las simulaciones, para determinar su influencia en la relación de Poisson, se ven evidenciados en la Figura 8 donde H , W , t , R , L y θ corresponden al alto, ancho, espesor, radio, distancia entre radios y ángulo interno respectivamente para la celda RCA y Re-entrant honeycomb, además el parámetro L_2 permanecerá constante con un valor de 9 mm dado que en previas investigaciones se determinó que no presenta una influencia significativa (Alomarah, Ruan, & Masood, 2018).

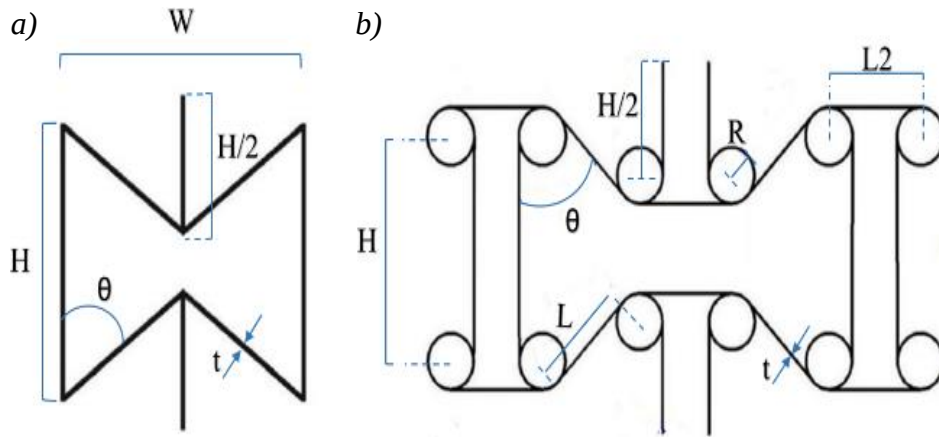


Figura 8. Celda a) Re-entrant honeycomb y b) RCA con sus respectivas dimensiones. Adaptado de Alomarah, Ruan, Masood, Sbarski, y Faisal (2018).

Las celdas fueron modeladas y parametrizadas a través del software comercial INVENTOR® (Autodesk Inc, 2019) con un numero de réplicas en el eje X y Y de 7x5 para la celda Re-entrant honeycomb y de 5x5 para la celda RCA. El tamaño de las estructuras se estipuló con el fin de obtener propiedades independientes de la cantidad y tamaño del material (propiedades intensivas) del metamaterial auxético (Alomarah, Ruan, & Masood, 2018; Alomarah, Ruan, Masood, Sbarski, & Faisal, 2018).

3.3 Modelo de elementos finitos

Para el software de análisis mediante elementos finitos utilizado, ANSYS® (Ansys Inc, 2018) se implementaron esfuerzos y deformaciones verdaderas del material PC/ABS, el cual se rige por un modelo constitutivo multilineal con endurecimiento isotrópico (ver Figura 6), coeficiente de Poisson de 0.33 y módulo de elasticidad (E) de 1800 [MPa].

3.3.1 Malla. El mallado de las estructuras planas 2D compuestas por celdas Re-entrant honeycomb y RCA (Ver Figura 9) fue realizado con un predominio de elementos tipo Shell de cuatro nodos. Se estipuló un tamaño de elementos de 0.30 mm los cuales conforman una calidad de malla apropiada para obtener resultados confiables, con base en la literatura (Ansys Inc, 2013).

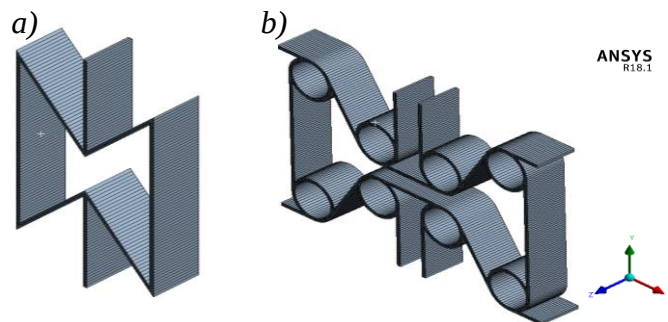


Figura 9. Malla para las celdas a) Re-entrant honeycomb, b) RCA. Cortesía de Ansys, Inc.

3.3.2 Cargas y condiciones de contorno. La estructura fue sometida a una carga de tensión cuasi-estática uniaxial en el plano, inducida mediante un desplazamiento controlado en uno de los extremos de la estructura con una velocidad constante de 0.05 mm/s, mientras que el opuesto se encuentra restringido en la dirección de la carga y fuera del plano; a su vez permitiendo el desplazamiento transversal sobre el plano. En la Figura 10 se ilustran las condiciones de contorno para cada tipo de estructura según la dirección de carga.

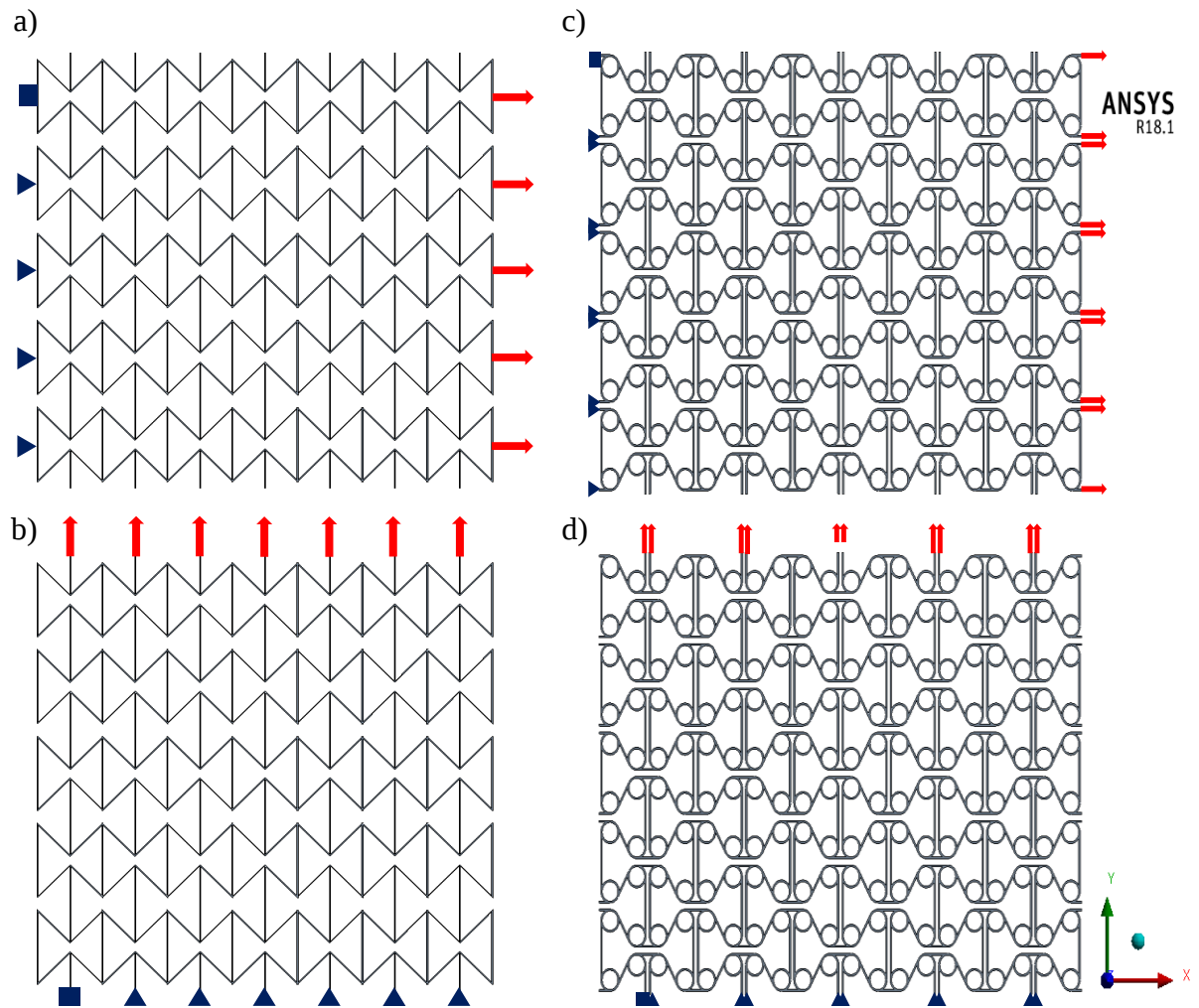


Figura 10. Restricciones y dirección de carga de las estructuras: Re-entrant honeycomb en a) X y b) Y; y RCA en c) X y d) Y. Cortesía de Ansys, Inc.

3.4 Validación de la simulación

En la investigación realizada por Alomarah *et al* (Alomarah, Ruan, & Masood, 2018), se desarrolló un experimento a tensión de una estructura RCA creada con Aluminio (6061), de tamaño 5x5 celdas unitarias y con dimensiones 124x190 mm en dirección X y Y respectivamente. Posteriormente se utilizó un software de análisis mediante elementos finitos, en

el cual se realiza una simulación teniendo en cuenta las propiedades del material, cargas en tensión y condiciones de contorno, con el fin de obtener una curva esfuerzo-deformación unitaria que se adapte a los datos del ensayo experimental.

Para la validación de los datos obtenidos en la presente investigación se replicó el ensayo numérico previamente descrito, a partir de una simulación mediante el Software ANSYS® (Ansys Inc, 2018). Se implementa un análisis estadístico con el cual se determina un ajuste aceptable entre las simulaciones (ver Figura 11) y por ende representa una óptima recreación del comportamiento mecánico de la estructura bajo las condiciones establecidas.

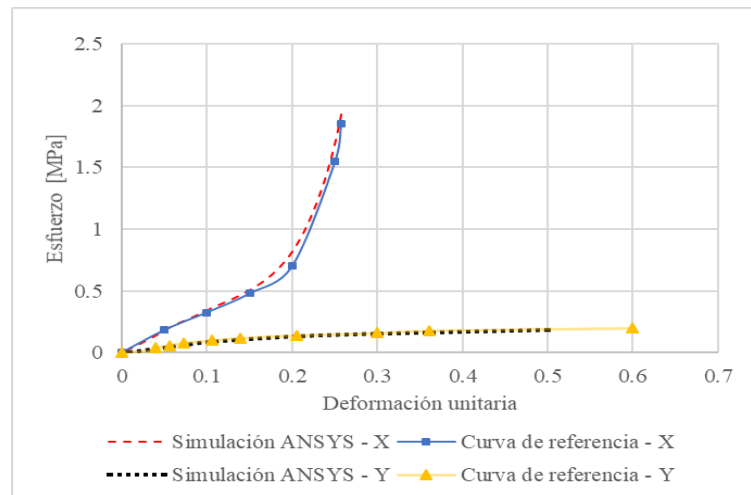


Figura 11. Calibración curva esfuerzo-deformación unitaria para estructura RCA ante cargas en X y Y.

3.5 Coeficiente de Poisson y deformación unitaria

La deformación unitaria es la relación de la deformación final entre la longitud inicial del cuerpo en estudio (Beer, 2017). Para la estructura mostrada en la Figura 12, la deformación unitaria en cada dirección se calcula como:

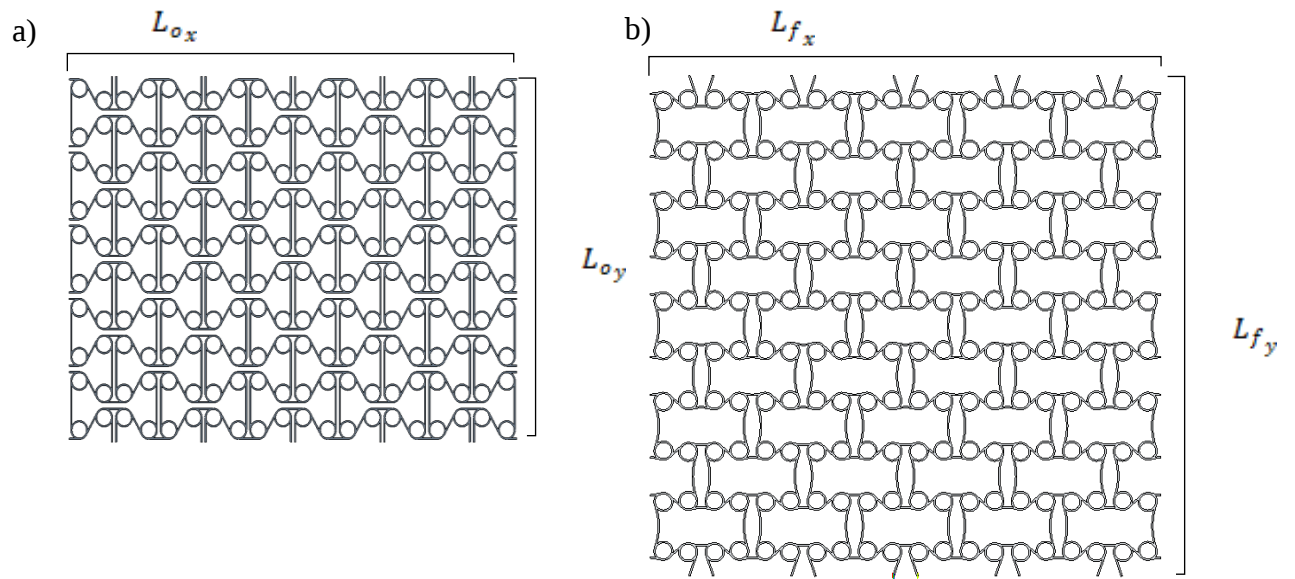


Figura 12. Dimensiones a) iniciales y b) finales de la estructura al ser cargada en dirección X. Cortesía de Ansys, Inc.

Dirección X:

$$\varepsilon_x = \frac{L_{f_x} - L_{o_x}}{L_{o_x}} \quad (1)$$

Dirección Y:

$$\varepsilon_y = \frac{L_{f_y} - L_{o_y}}{L_{o_y}} \quad (2)$$

La relación de Poisson se define como la deformación transversal negativa dividida por la deformación axial en la dirección de la fuerza aplicada (Lakes, 1987). Por lo tanto, para la estructura evidenciada en la Figura 12, la relación de Poisson se calcula de la siguiente manera:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (3)$$

3.6 Método factorial

El diseño de experimento es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente (Gutierrez & Humberto, 2012).

Para determinar la influencia de los parámetros geométricos en la propiedad auxética de la celda Re-entrant honeycomb y RCA se emplea el diseño de experimento factorial 2^k (BOX, Hunter, & Hunter, 2008), el cual implementa valores mínimos y máximos, basados en la literatura y verificando la no interferencia geométrica, para cada uno de los factores presentados en las Tablas 1 y 2. A partir de la cantidad de parámetros variados y evidenciados, se establece que la cantidad de simulaciones para la celda Re-entrant honeycomb y RCA es de 2^4 y 2^5 respectivamente, en cada dirección de carga.

Se utiliza el software comercial MINITAB® (Minitab Inc, 2018) para el cálculo de la influencia de los factores al realizar un método factorial de dos niveles, el cual asegura la combinación de todas las variaciones posibles para cada parámetro geométrico (Ver Tablas 3 y 4), empleando los valores finales del coeficiente de Poisson que logra la estructura antes de que uno de sus elementos alcance el esfuerzo último, considerando esto como criterio de falla.

Tabla 1.

Valores mínimos y máximos para los parámetros de la celda Re-entrant honeycomb.

Celda Re-entrant honeycomb		
Parámetro	V. Mínimo	V. Máximo
W [mm]	14.30	16.60
θ [°]	45	60
t [mm]	0.15	0.25
H [mm]	18	20

Tabla 2.

Valores mínimos y máximos para los parámetros de la celda RCA.

Parámetro	Celda RCA	
	V. Mínimo	V. Máximo
L [mm]	6.9	10
R [mm]	1	3.9
t [mm]	0.45	0.66
H [mm]	18	20
θ [°]	30	60

4. Análisis de resultados

Los valores mínimos y máximos de los parámetros geométricos se codifican con 0 y 1 respectivamente, además el orden de combinación de dichos parámetros se establece como W , θ , t , H para la celda Re-entrant honeycomb y L , R , t , H , θ para la celda RCA como se observa en las Tablas 3 y 4. La estructura base, definida como la estructura que implementa los valores mínimos de cada parámetro de celda, se codifica como 00 00 y 00 000 para las estructuras Re-entrant Honeycomb y RCA respectivamente

Con el fin de observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre el coeficiente de Poisson, al aplicar un desplazamiento controlado con velocidad constante (0.05 mm/s) en dirección X y Y por separado, se ilustra la curva respuesta de la estructura base con las curvas obtenidas al incrementar los parámetros establecidos individualmente en la Figura 13 y Figura 20 para la estructura Re-entrant Honeycomb y, la estructura RCA.

Se comparan las curvas respuesta mediante las Tablas 5, 6, 7 y 8 en las cuales se presenta la tasa de aumento ($\uparrow$) o disminución ($\downarrow$) de la deformación unitaria final (ε_f), el coeficiente de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) con sus respectivas variaciones porcentuales.

Tabla 3.

Combinaciones de la variación de los parámetros para la celda Re-entrant honeycomb al ser cargada en X o Y.

Combinaciones de parámetros - Re-entrant honeycomb				
Codificación	W [mm]	θ [°]	t [mm]	H [mm]
00 00	14.30	45	0.15	18
00 01	14.30	45	0.15	20
00 10	14.30	45	0.25	18
00 11	14.30	45	0.25	20
01 00	14.30	60	0.15	18
01 01	14.30	60	0.15	20
01 10	14.30	60	0.25	18
01 11	14.30	60	0.25	20
10 00	16.60	45	0.15	18
10 01	16.60	45	0.15	20
10 10	16.60	45	0.25	18
10 11	16.60	45	0.25	20
11 00	16.60	60	0.15	18
11 01	16.60	60	0.15	20
11 10	16.60	60	0.25	18
11 11	16.60	60	0.25	20

Los datos obtenidos de las combinaciones (10 100) y (11 100), para la estructura RCA, son excluidos dado que en el software ANSYS® (Ansys Inc, 2018) se presenta interferencia geométrica entre las celdas parametrizadas.

Tabla 4.

Combinaciones de la variación de los parámetros para la celda RCA.

Combinaciones de parámetros - RCA					
Codificación	L [mm]	R [mm]	t [mm]	H [mm]	θ [°]
00 000	6.9	1	0.45	18	30
00 001	6.9	1	0.45	18	60
00 010	6.9	1	0.45	20	30
00 011	6.9	1	0.45	20	60
00 100	6.9	1	0.66	18	30
00 101	6.9	1	0.66	18	60
00 110	6.9	1	0.66	20	30
00 111	6.9	1	0.66	20	60
01 000	6.9	3.9	0.45	18	30
01 001	6.9	3.9	0.45	18	60
01 010	6.9	3.9	0.45	20	30
01 011	6.9	3.9	0.45	20	60
01 100	6.9	3.9	0.66	18	30
01 101	6.9	3.9	0.66	18	60
01 110	6.9	3.9	0.66	20	30
01 111	6.9	3.9	0.66	20	60
10 000	10	1	0.45	18	30
10 001	10	1	0.45	18	60
10 010	10	1	0.45	20	30
10 011	10	1	0.45	20	60
10 100	10	1	0.66	18	30
10 101	10	1	0.66	18	60
10 110	10	1	0.66	20	30
10 111	10	1	0.66	20	60
11 000	10	3.9	0.45	18	30
11 001	10	3.9	0.45	18	60
11 010	10	3.9	0.45	20	30
11 011	10	3.9	0.45	20	60
11 100	10	3.9	0.66	18	30
11 101	10	3.9	0.66	18	60
11 110	10	3.9	0.66	20	30
11 111	10	3.9	0.66	20	60

4.1 Re-entrant honeycomb

4.1.1 Desplazamiento controlado en dirección X. El comportamiento general de la estructura compuesta de celdas Re-entrant honeycomb ante desplazamientos controlados en dirección X, muestra una tendencia de crecimiento en la propiedad auxética a medida que se incrementa dicho desplazamiento. Además, en la Figura 13a se observa que los parámetros W , t y H producen una tendencia similar a la curva respuesta de la estructura base (00 00).

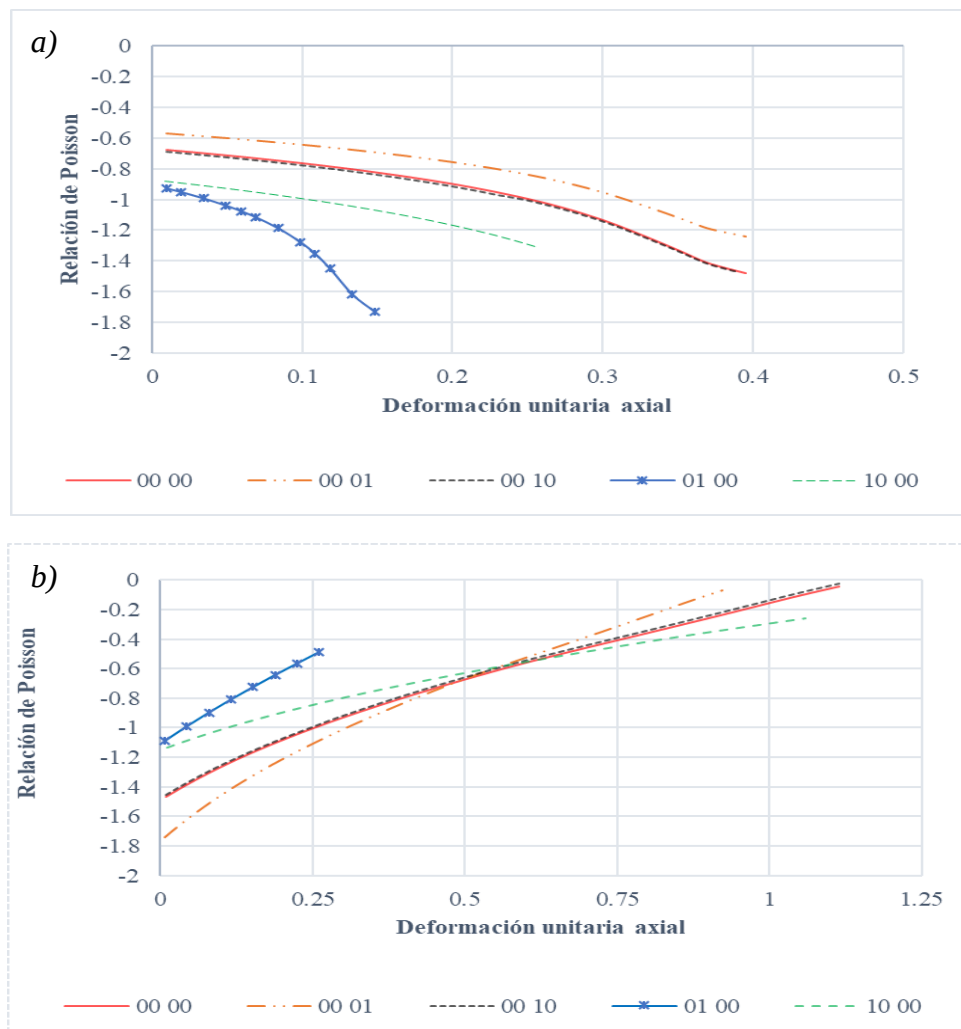


Figura 13. Curva Relación de Poisson-Deformación unitaria para la estructura Re-entrant honeycomb ante carga en a) X y b) Y.

A partir de las gráficas mostradas en las Figura 14, 15 y 16 extraídas del software MINITAB® (Minitab Inc, 2018) se observa que:

- El parámetro más influyente en la variación de la relación de Poisson de falla es θ , además los parámetros H , θ y la combinación de los parámetros $W - \theta$ son estadísticamente significativos (Ver Figura 14).
- A partir de la Figura 15 se evidencia interacción entre los parámetros W y θ dado que las líneas tienden a ser menos paralelas entre sí.
- La media de la relación de Poisson, teniendo en cuenta los valores mínimos y máximos de los parámetros θ y W por separado, disminuye a medida que estos aumentan, mientras que la variación de los parámetros t y H generan el efecto contrario aumentando el valor de la misma. Adicionalmente se observa que el parámetro con menor y mayor influencia en la media de la relación de Poisson es t y θ respectivamente (Ver Figura 16).

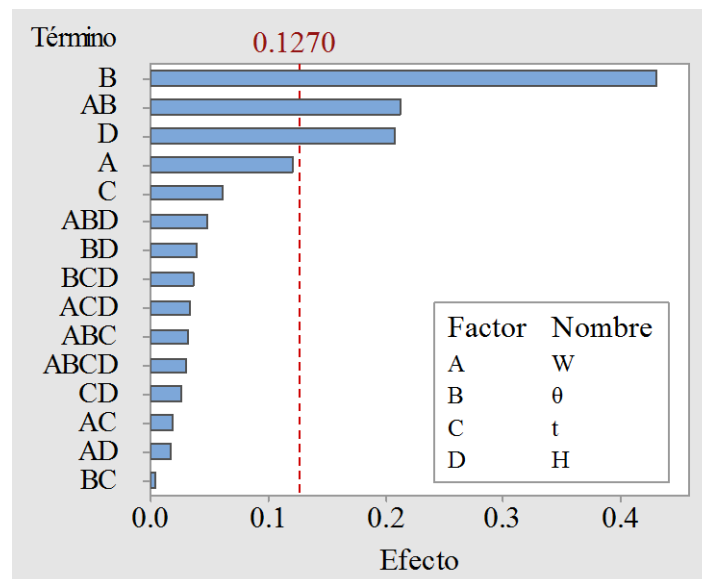


Figura 14. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en X. Cortesía de Minitab, Inc.

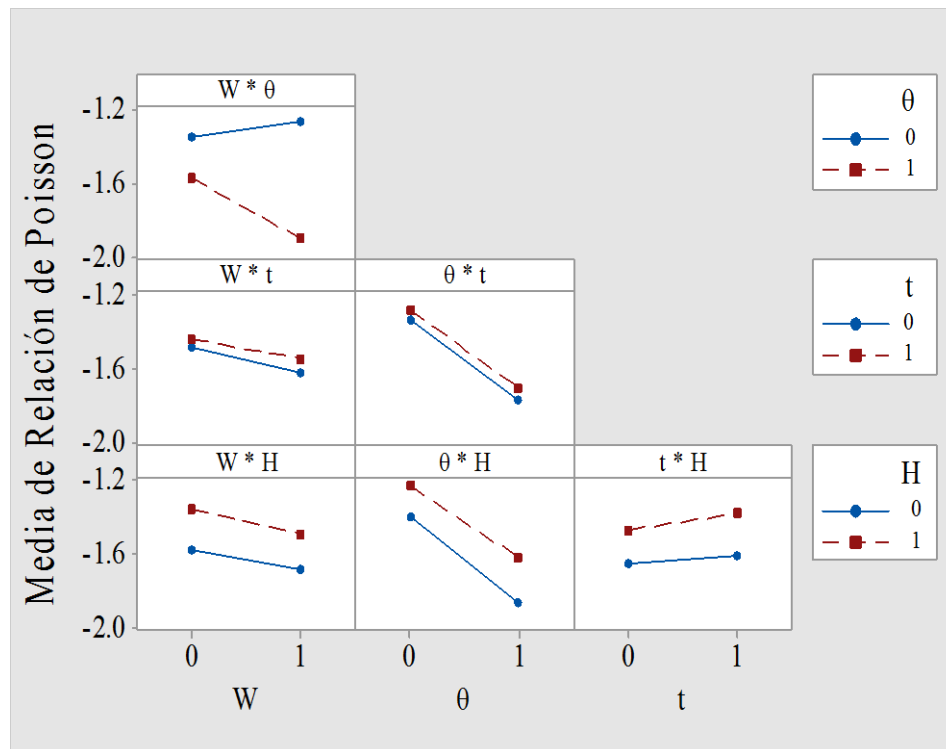


Figura 15. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en X. Cortesía de Minitab, Inc.

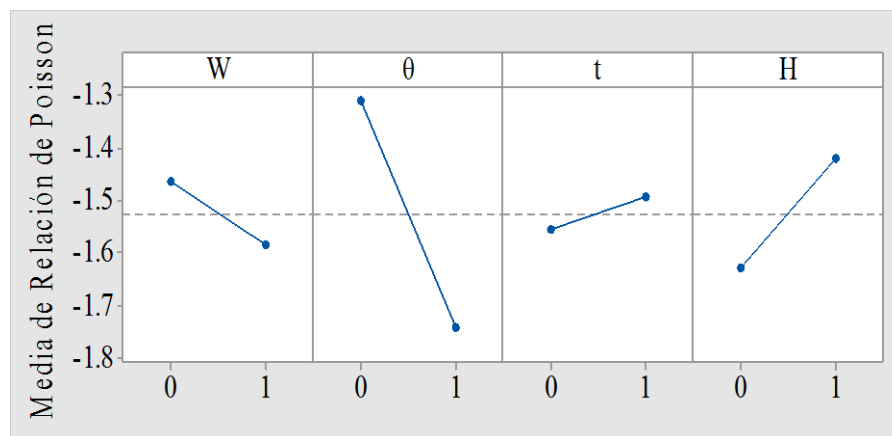


Figura 16. Gráfica de efectos principales para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en X. Cortesía de Minitab, Inc.

Tabla 5.

Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ε_f), relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda Re-entrant honeycomb ante desplazamientos controlados en dirección X.

Parámetros		ν_o		ν_f		ε_f	
H	(00 01)	↑	16%	↑	16%	↑	11%
t	(00 10)	↓	1%	↑	1%	↓	2%
θ	(01 00)	↓	37%	↓	17%	↓	63%
W	(10 00)	↓	30%	↑	12%	↓	35%

4.1.2 Desplazamiento controlado en dirección Y. El comportamiento de la estructura ante desplazamientos controlados en dirección Y, presenta una propiedad auxética inicial significativa con un decrecimiento progresivo a medida que su deformación unitaria aumenta (Ver Figura 13b). Además, el parámetro t (00 10) genera una tendencia similar a la curva respuesta de la estructura base (00 00).

A partir de las gráficas mostradas en las Figura 17, 18 y 19 extraídas del software MINITAB® (Minitab Inc, 2018) se observa que:

- Todos los parámetros tienen un efecto estadísticamente significativo y el término más influyente es la combinación de máximos de W - θ (Ver Figura 17).
- Las tendencias de la media de Poisson para los parámetros W - θ , W - H y θ - H mostrados en la Figura 18 tienden a interceptarse por lo que se evidencia una interacción entre sí.
- Al aumentar los parámetros θ , W y H independientemente, la media de la relación de Poisson disminuye, mientras que el incremento del parámetro t genera el efecto contrario.
- Adicionalmente la media de la relación de Poisson se ve influida en menor y mayor proporción por los parámetros t y θ respectivamente (Ver Figura 19).

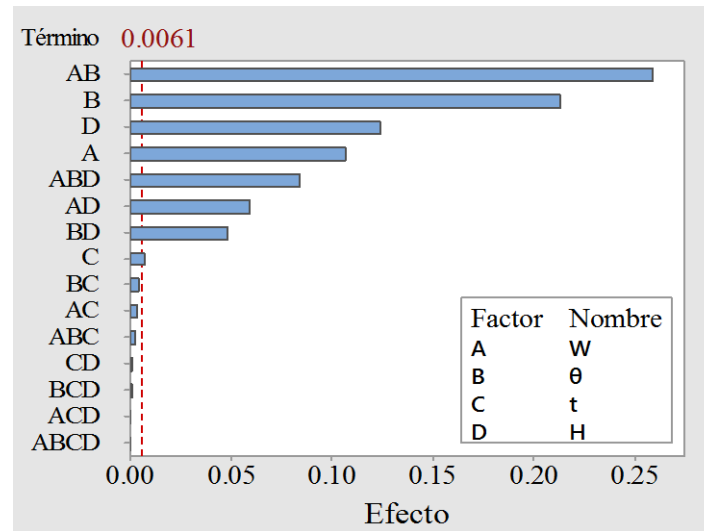


Figura 17. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en Y. Cortesía de Minitab, Inc.

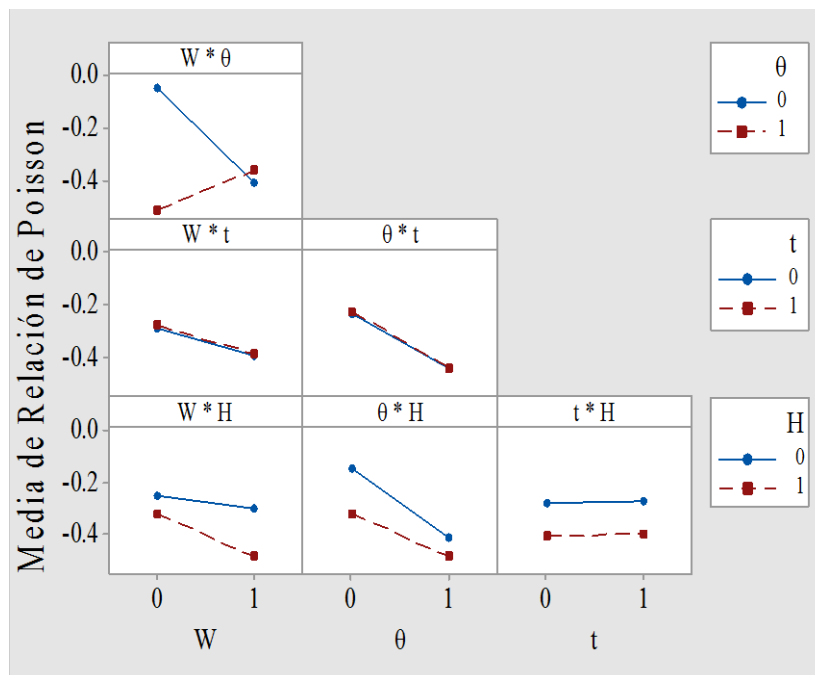


Figura 18. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en Y. Cortesía de Minitab, Inc.

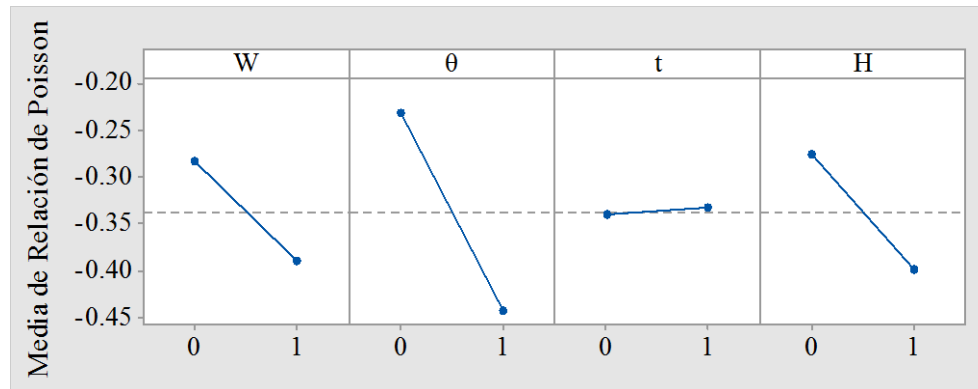


Figura 19. Gráfica de efectos principales para estructura Re-entrant honeycomb ante carga en Y. Cortesía de Minitab, Inc.

Tabla 6.

Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ε_f) relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda Re-entrant honeycomb ante desplazamiento controlado en Y.

Parámetros		ν_o		ν_f		ε_f	
H	(00 01)	↓	19%	↓	74%	↓	17%
t	(00 10)	↑	1%	↑	35%	↑	0.14%
θ	(01 00)	↑	26%	↓	1035%	↓	76%
W	(10 00)	↑	23%	↓	522%	↓	5%

El incremento del parámetro θ expande la celda y disminuye el espacio para la acomodación interna de la estructura, provocando la falla para una deformación unitaria menor. Además, ante desplazamientos controlados en dirección Y, los valores de la relación de Poisson final obtenidos de las curvas base tienden a cero, lo cual hace susceptible el cálculo de los porcentajes frente a cualquier variación, esto se observa en los elevados porcentajes evidenciados en las Tablas 6 y 8.

4.2 RCA

4.2.1 Desplazamiento controlado en dirección X. El comportamiento general de la estructura compuesta de celdas RCA ante desplazamientos controlados en dirección X, muestra una tendencia de crecimiento en su propiedad auxética a medida que se incrementa dicho desplazamiento. Además, en la Figura 20a se evidencia que los parámetros t (00 100) y H (00 010) generan una tendencia similar a la curva respuesta de la estructura base (00 000).

A partir de las gráficas mostradas en las Figura 21, 22 y 23 extraídas del software MINITAB® (Minitab Inc, 2018) se observa que:

- El parámetro más influyente en la variación de la relación de Poisson de falla es θ , además los parámetros H , θ y L son los que tienen un mayor efecto estadísticamente significativo (Ver Figura 21).
- A partir de la Figura 22 se evidencia interacción entre los parámetros $L - H$, $L - \theta$, $R - \theta$ y dado $H - \theta$ que las líneas tienden a ser menos paralelas entre sí.
- La media de la relación de Poisson, teniendo en cuenta los valores mínimos y máximos de los parámetros θ , L y R por separado, disminuye a medida que estos aumentan, mientras que la variación de los parámetros t y H generan el efecto contrario aumentando el valor de la misma. Adicionalmente se observa que el parámetro con menor y mayor influencia en la media de la relación de Poisson es t y θ respectivamente (Ver Figura 23).

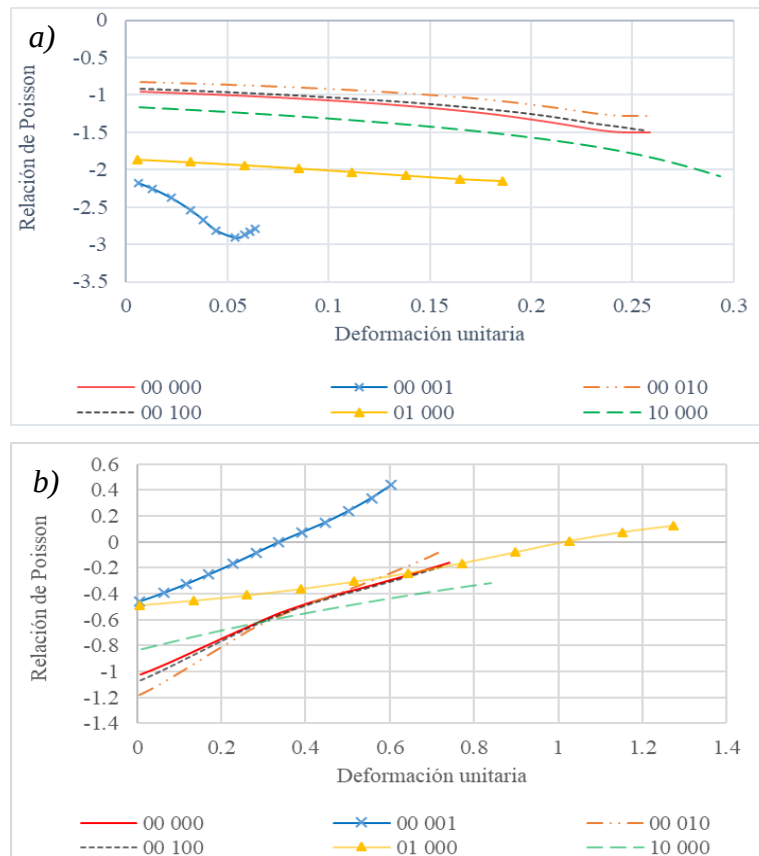


Figura 20. Curva Relación de Poisson-Deformación unitaria para estructura RCA ante carga en a) X y b) Y.

Tabla 7.

Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ε_f), relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda RCA ante desplazamiento controlado en X.

Parámetros		ν_o		ν_f		ε_f	
θ	(00 001)	↓	130%	↓	85%	↓	75%
H	(00 010)	↑	13%	↑	15%	↓	1%
t	(00 100)	↑	4%	↑	2%	↓	1%
R	(01 000)	↓	96%	↓	43%	↓	28%
L	(10 000)	↓	23%	↓	39%	↑	13%

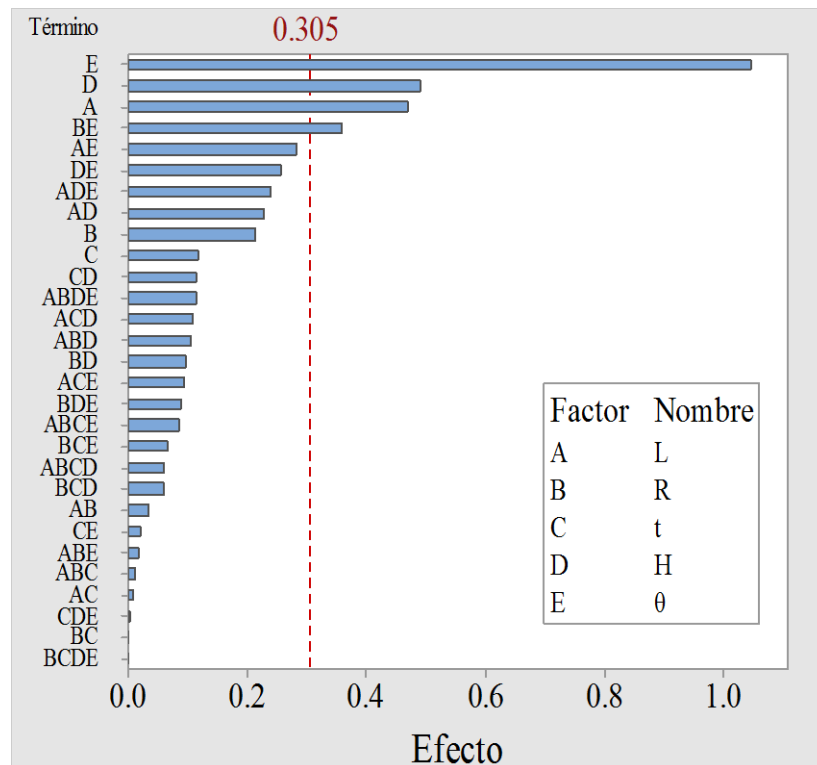


Figura 21. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura RCA ante carga en X. Cortesía de Minitab, Inc.

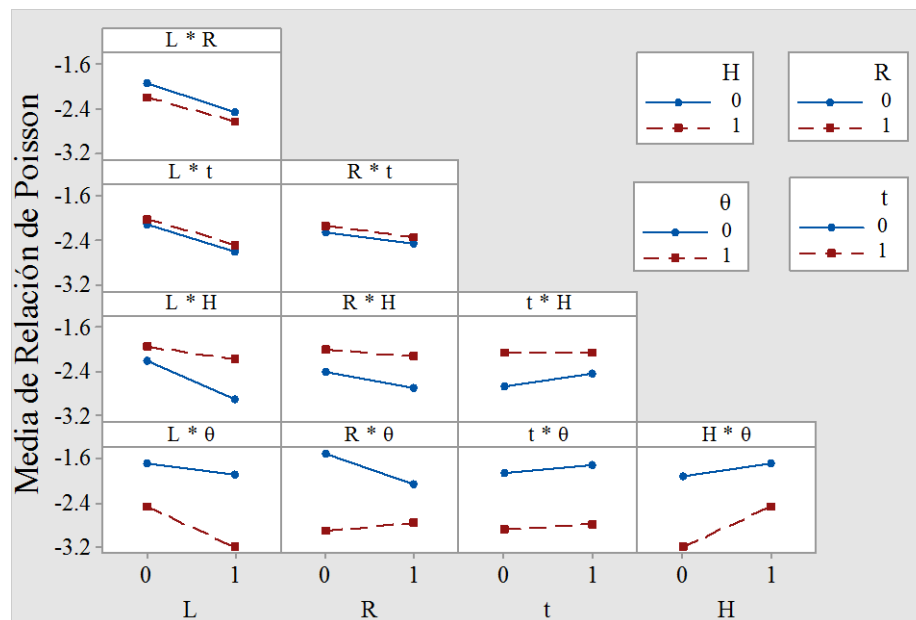


Figura 22. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura RCA ante carga en X. Cortesía de Minitab, Inc.

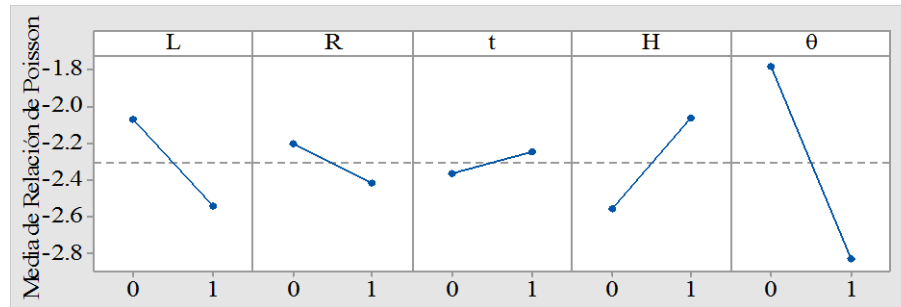


Figura 23. Gráfica de efectos principales para estructura RCA ante carga en X. Cortesía de Minitab, Inc.

4.2.2 Desplazamiento controlado en dirección Y. El comportamiento de la estructura ante desplazamientos controlados en dirección Y, presenta una propiedad auxética inicial significativa con un decrecimiento progresivo a medida que su deformación unitaria aumenta. Además, se observa que el parámetro t (00 100) genera una tendencia similar a la curva respuesta de la estructura base (00 000) y los parámetros R y L producen que la estructura presente un cambio progresivo moderado en la propiedad auxética a medida que aumenta el desplazamiento (Ver Figura 20b).

A partir de las gráficas mostradas en las Figura 24, 25 y 26 extraídas del software MINITAB® (Minitab Inc, 2018) se observa que:

- Los parámetros R , θ y L presentan un efecto estadísticamente significativo, además se observa que el parámetro θ genera una mayor influencia en la variación de la relación de Poisson de falla (Ver Figura 24).
- Las tendencias de la media de Poisson para los parámetros $L - H$, $R - \theta$, $L - \theta$ y $R - H$ mostrados en la Figura 25 tienden a interceptarse por lo que se evidencia una interacción entre sí.
- Al aumentar el parámetro de L independientemente, la media de la relación de Poisson

disminuye, mientras que el incremento de los parámetros t , R , H y θ generan el efecto contrario. Adicionalmente la media de la relación de Poisson se ve influida en menor y mayor proporción por los parámetros t y θ respectivamente (Ver Figura 26).

Tabla 8.

Porcentaje de variación, respecto a la estructura base, de la deformación unitaria final (ε_f), relación de Poisson inicial (ν_o) y final (ν_f) para el incremento individual de los parámetros geométricos en la celda RCA ante desplazamiento controlado en Y.

Parámetros		ν_o		ν_f		ε_f	
θ	(00 001)	↑	55%	↑	371%	↓	19%
H	(00 010)	↓	16%	↑	57%	↓	3%
t	(00 100)	↓	4%	↓	14%	↓	1%
R	(01 000)	↑	52%	↑	177%	↑	72%
L	(10 000)	↑	19%	↓	98%	↑	13%

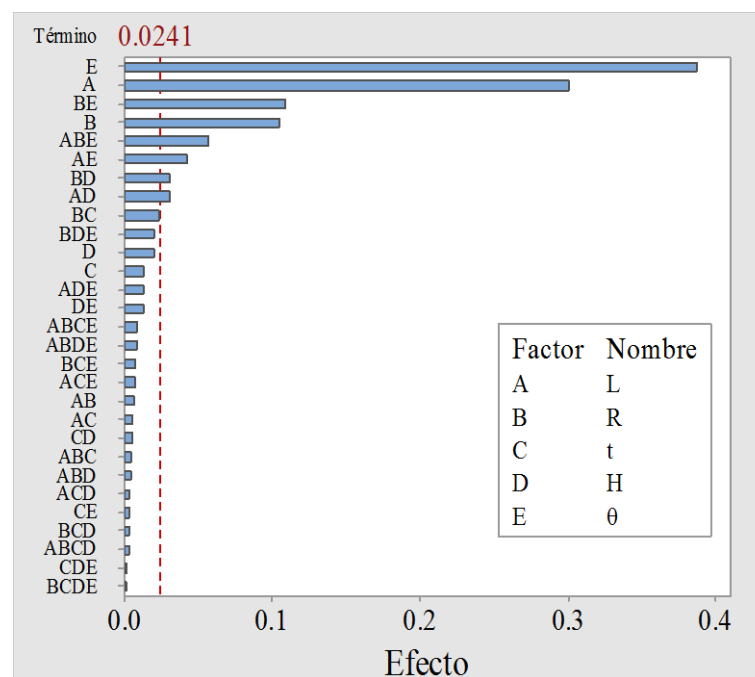


Figura 24. Gráfica de Pareto de los efectos producidos con un nivel de significancia de 0.05 para estructura RCA ante carga en Y. Cortesía de Minitab, Inc.

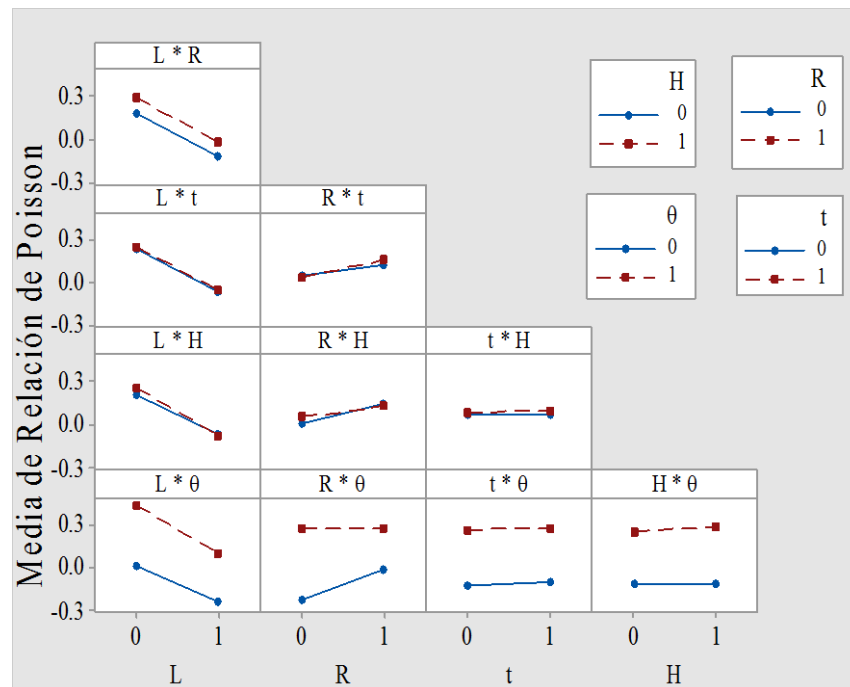


Figura 25. Gráfica de interacción entre parámetros para estructura RCA ante carga en Y. Cortesía de Minitab, Inc.

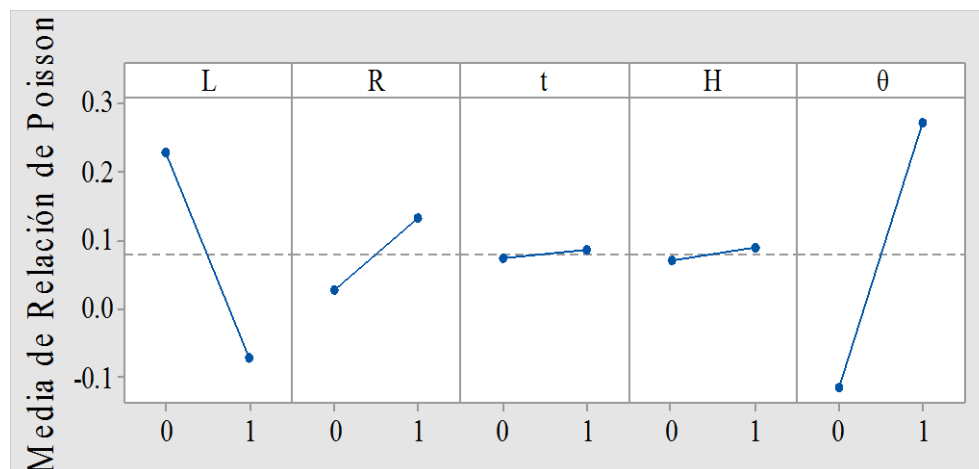


Figura 26. Gráfica de efectos principales para estructura RCA ante carga en Y. Cortesía de Minitab, Inc.

5. Recomendaciones

Para futuras investigaciones correspondientes al análisis de estructuras auxéticas, se recomienda realizar ensayos experimentales implementando un material similar que permita comparar y corroborar los datos obtenidos del presente estudio. Además, obtener los valores que optimicen la propiedad auxética de la estructura a partir de análisis numéricos y estadísticos detallados de los parámetros más influyentes. Realizar investigaciones enfocadas a la aplicación de los materiales auxéticos en aportes estructurales dando uso a las propiedades específicas tales como resistencia al corte, amortiguación acústica, tenacidad a la fractura, absorción de energía, entre otras.

6. Conclusiones

En la presente investigación se realizaron simulaciones numéricas de estructuras auxéticas compuestas de celdas Re-entrant honeycomb y RCA extraídas de la literatura, para cada combinación de valores mínimos y máximos de los parámetros estipulados en el método factorial de las estructuras, utilizando un software de análisis mediante elementos finitos en el cual se aplica un desplazamiento controlado en dirección X y Y con sus respectivas condiciones de contorno y se asignan las propiedades mecánicas del material PC/ABS, cuya caracterización fue producto de un ensayo a tensión cuasi estático del cual se obtuvieron los valores verdaderos de esfuerzo-deformación.

Se dio cumplimiento a los objetivos específicos de seleccionar disposiciones de las estructuras, determinar la cantidad de simulaciones a realizar mediante el método factorial y, generar y analizar los modelos numéricos en las secciones 2.2., 2.6. y 3 respectivamente.

Se obtuvieron y analizaron las curvas de la relación de Poisson – deformación unitaria para cada estructura hasta el momento de falla, de las cuales se concluye que:

- El comportamiento de la relación de Poisson, al aplicar un desplazamiento controlado de 0.05 mm/s en dirección X y Y para todas las estructuras, es independiente del parámetro t . Resultados evidenciados y comparados de la investigación realizada por Alomarah *et al* (Alomarah, Ruan, & Masood, 2018).
- La variación del parámetro θ genera una mayor influencia sobre la relación de Poisson frente a los demás parámetros estudiados, lo cual se evidencia al comparar los porcentajes de variación ocasionados por este factor en comparación a los demás, respecto a las estructuras base (Ver Tabla 5, 6, 7 y 8). Al incrementar el parámetro θ y deformar las estructuras compuestas de celdas Re-entrant honeycomb y RCA, se evidencia una reducción en la relación de Poisson ante deformaciones en dirección X y un decrecimiento en la propiedad auxética frente a deformaciones en dirección Y. Además, reduce el rango de deformación de la estructura antes de presentar el esfuerzo de falla.
- El comportamiento de las estructuras, al generarles un desplazamiento en dirección X, evidencian una tendencia de incremento en la propiedad auxética. Por el contrario, al realizar un desplazamiento en dirección Y se presenta un decrecimiento de dicha propiedad, lo cual se ve reflejado en (Alomarah, Ruan, & Masood, 2018; Subramani et al., 2016; Zhang et al., 2018).
- Las estructuras RCA, ante deformaciones en dirección X, presentan un mejor

comportamiento auxético (Alomarah, Ruan, Masood, et al., 2018) y una menor capacidad de deformación en comparación con las estructuras Re-entrant honeycomb.

- Se evidencia un mejor comportamiento auxético y una menor capacidad de deformación en las estructuras Re-entrant honeycomb en comparación con las estructuras RCA, ante deformaciones en dirección Y.
- Del diseño de experimentos factorial realizado mediante el software MINITAB® (Minitab Inc, 2018) se determina que, la variación del parámetro θ genera la mayor influencia para la relación de Poisson de falla en todas las estructuras.

Referencias Bibliográficas

- Alomarah, A., Ruan, D., & Masood, S. (2018). Tensile properties of an auxetic structure with re-entrant and chiral features — a finite element study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Alomarah, A., Ruan, D., Masood, S., Sbarski, I., & Faisal, B. (2018). An investigation of in-plane tensile properties of re-entrant chiral auxetic structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013–2029.
- Ansys Inc, . (2013). ANSYS Meshing User's Guide (2015th ed., pp. 130–149). Canonsburg, EE.UU.: Technology Drive.
- Ansys Inc, . (2018). ANSYS®. Pennsylvania. Retrieved from <https://www.ansys.com/>
- Arriaga, A., Lazkano, J. M., Pagaldai, R., Zaldua, A. M., Hernández, R., Atxurra, R., & Chrysostomou, A. (2007). Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS. *Polymer Testing*, 26, 284–305. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.10.012>
- Autodesk Inc. (2019). Inventor®. Retrieved from <https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/new-features>
- Balbaşı, M. (2013). Application of full factorial design method to silicalitesynthesis. *Materials Research Bulletin*, 48(8), 2908–2914. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.04.040>
- Barón, D. (2016). *ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA RESPUESTA DE ESTRUCTURAS AUXETICAS HEXAQUIRALES Y RE-ENTRANTES CON COEFICIENTE*

- DE POISSON NEGATIVO BAJO CARGA UNIAXIAL EN EL PLANO XY*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Retrieved from <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4796/1/BaronCangrejoDanielAlberto2016.pdf>
- Bautista, J. J., & Corzo, N. E. (2018). *MODELOS NUMÉRICOS PARA EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD PORTANTE EN CIMIENTOS CORRIDOS*. Universidad Industrial de Santander. Retrieved from <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/172600.pdf>
- Beer, F. (2017). *Mecánica de Materiales* (7th ed.). McGraw-Hill Interamericana. Retrieved from <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2168/?il=6043>
- Besant, T., Davies, G. A. O., & Hitchings, D. (2001). Finite element modelling of low velocity impact of composite sandwich panels. *Composites*, 32, 1189–1196.
- Borcea, C. S., & Streinu, I. (2018). Auxetic deformations and elliptic curves. *Computer Aided Geometric Design*. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2018.02.003>
- BOX, G. E., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2008). *Estadística para investigadores: Diseño, innovación y descubrimiento* (2nd ed.). Bogotá: Reverté.
- Carneiro, V. H., & Puga, H. (2018). Axisymmetric auxetics. *Composite Structures*, 31(4), 561–571. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.116>
- Cordero, Z. R. V. (2009). La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. *Revista Educación*, 33(1), 155–165.
- David, A., & Becerril, L. (2014). *Màster Universitari en Ciència i Enginyeria de Materials Obtención de curvas esfuerzo-deformación verdaderas del PP y copolímeros en bloque a velocidad de deformación constante aplicando correlación de imágenes digitales Director : Resumen*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.

- Di Rado, H. A. (2006). *PROBLEMAS CON NO LINEALIDAD Por Director* : Universidad Nacional del Nordeste.
- Dirrenberger, J., Forest, S., & Jeulin, D. (2012). Elastoplasticity of auxetic materials. *Computational Materials Science*, 64, 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.03.036>
- Evans, K. E., Alderson, A., & Christian, F. R. (1995). Auxetic Two-dimensional Polymer Networks, 91(16), 2671–2680.
- Greaves, G. N., Greer, A. L., Lakes, R. S., & Rouxel, T. (2011). Poisson's ratio and modern materials. *Nature Materials*, 10(October), 823–838. <https://doi.org/10.1038/NMAT3134>
- Gutierrez, A., & Humberto, P. (2012). *Analisis y Diseño de Experimentos* (3rd ed.). México, D.F: McGraw-Hill Interamericana. Retrieved from <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2168/?il=375>
- Hou, X., Deng, Z., & Zhang, K. (2016). Dynamic Crushing Strength Analysis of Auxetic. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29(5), 490–501. [https://doi.org/10.1016/S0894-9166\(16\)30267-1](https://doi.org/10.1016/S0894-9166(16)30267-1)
- Jiménez, M. (2004). *PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS Y DESCRIPCIÓN DE ALGOR FEA*. Universidad de las Américas Puebla. Retrieved from http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/jimenez_p_a/capitulo_2.html
- Kobilinsky, A., Monod, H., & Bailey, R. A. (2017). Automatic generation of generalised regular factorial designs. *Computational Statistics and Data Analysis*, 113, 311–329. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2016.09.003>
- Kocer, C., Mckenzie, D. R., & Bilek, M. M. (2009). Elastic properties of a material composed of alternating layers of negative and positive Poisson's ratio. *Materials Science and Engineering*, 505(1–2), 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.002>

- Lakes, R. (1987). Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio. *Science*, 235(4792), 1038–1040.
- Lee, S., Park, Y., & Kim, J. (2018). Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics An evaluation of factors in influencing drag coefficient in double-deck tunnels by CFD simulations using factorial design method. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 180, 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.07.018>
- Liu, Y., & Hu, H. (2015). A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*, 5(10), 1052–1063. Retrieved from [http://www.academicjournals.org/app/webroot/article/article1380623913_Liu and Hu.pdf](http://www.academicjournals.org/app/webroot/article/article1380623913_Liu%20and%20Hu.pdf)
- Minitab Inc, . (2018). Minitab®. Retrieved from <http://www.minitab.com>
- Morales, V. H. (2009). *METAMATERIALES: INTRODUCCIÓN A SUS PROPIEDADES Y APLICACIONES*. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
- Pérez, A. (2018). Coeficiente de Poisson. Retrieved from http://www.mecapedia.uji.es/coeficiente_de_Poisson.htm
- Sierra, A. (2017). *Diseño, construcción y caracterización de un material auxético*. Universidad Politecnica de Madrid. Retrieved from http://oa.upm.es/49139/1/TFG_ANDRES_SIERRA_SORALUCE.pdf
- Subramani, P., Rana, S., Ghiassi, B., Figueiro, R., Oliveira, D. V, Lourenco, P. B., & Xavier, J. (2016). Development and characterization of novel auxetic structures based on re-entrant hexagon design produced from braided composites. *Composites*, 93, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.058>
- Walser, R. M. (2001). Electromagnetic Metamaterials. *Materials Science and Engineering*, 4467, 1–15.

- Wan, H., Ohtaki, H., Kotosaka, S., & Hu, G. (2004). A study of negative Poisson ' s ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model, 23, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2003.10.006>
- Wang, F. (2018). Journal of the Mechanics and Physics of Solids Systematic design of 3D auxetic lattice materials with programmable Poisson ' s ratio for finite strains. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 114, 303–318. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.01.013>
- Wessel, J. K. (2004). *Handbook of advanced materials: enabling new designs*. (James K. Wessel, Ed.) (1st ed.). New Jersey: John Wiley & Sons , Inc. <https://doi.org/10.1002/0471465186>
- Xu, S., Ruan, D., & Beynon, J. H. (2014). Finite element analysis of the dynamic behavior of aluminum honeycombs, 11, 1–16. <https://doi.org/10.1142/S0219876213440015>
- Zhang, J., Lu, G., Wang, Z., Ruan, D., Alomarah, A., & Durandet, Y. (2018). Large deformation of an auxetic structure in tension : Experiments and fi nite element analysis. *Composite Structures*, 184(May 2017), 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.076>