

Evaluación de la influencia del uso de malla con geometría auxética en elementos de concreto sometidos a compresiónⁱ

Evaluation of the influence of the use of auxetic geometry mesh in concrete elements subjected to compression

Juan Sebastián Garzón Valencia¹ <https://orcid.org/0009-0000-5391-789X>

Miguel Ángel Vergara González² <https://orcid.org/0009-0002-0493-4225>

Néstor Luis Guerrero Chávez³ <https://orcid.org/0000-0001-6762-6241>

Juan Felipe Solís Bonilla⁴ <https://orcid.org/0009-0009-4796-824X>

Fecha de recepción: 19 de septiembre 2023

Fecha de aprobación: 28 de noviembre 2023

Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia de la geometría auxética en elementos de concreto sometidos a compresión; para ello, se ensayaron 24 especímenes en total: 16 reforzados con malla de geometría auxética impresa en 3D con ácido poliláctico (PLA), que varían de altura de celda y espesores; las propiedades mecánicas obtenidas en estos ensayos se compararon con los resultados de ocho especímenes sin refuerzo alguno; fue así como los resultados evidenciaron que el uso de la malla auxética, como refuerzo del concreto, incide notablemente en el confinamiento del mismo, con lo cual da capacidad de incursión en el rango inelástico a los especímenes, a diferencia de lo mostrado por los especímenes sin refuerzo, que no presentan incursión alguna; los prototipos auxéticos mostraron mejores propiedades del concreto sometido a carga axial respecto a los prototipos de control. Adicionalmente, por medio del software CES Selector Ansys Granta, que reúne información en una biblioteca de datos sobre materiales y permite realizar comparaciones y análisis, se determinó la cantidad de emisiones de CO₂ dentro del ciclo de vida del PLA; en este análisis se encontró que el PLA presenta altas emisiones de carbono debido al elevado consumo de energía requerido en su producción. Sin embargo, es importante considerar otros aspectos clave de su ciclo de vida, como la manufactura, el transporte y la disposición final del material, donde se observa una huella de carbono relativamente baja.

Palabras clave: ensayos de compresión, fabricación digital, geometría auxética, material biodegradable

Summary

This work evaluates the influence of auxetic geometry in concrete elements subjected to compression. A total of 24 specimens were tested, 16 specimens reinforced with auxetic geometry 3D printed with polylactic acid (PLA), varying cell height and thickness. The mechanical properties obtained in these tests were compared with the results of eight (8) specimens without any reinforcement. The use of the auxetic mesh as concrete reinforcement has a significant impact on the confinement of the concrete, giving the specimens the capacity to incursion in the inelastic range, unlike that shown by the specimens without reinforcement that do not present any incursion, the

¹ Pregrado, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia, 2520192012@estudiantesunibague.edu.co

² Pregrado, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia, 2520192054@estudiantesunibague.edu.co

³ Doctorado, Docente, Universidad de Ibagué, Colombia, Nestor.guerrero@unibague.edu.co

⁴ Maestría, Docente, Universidad de Ibagué, Colombia, juan.solis@unibague.edu.co

auxetic prototypes showed better properties of the concrete subjected to axial load with respect to the control prototypes. Additionally, by means of the CES selector software Ansys Granta, which gathers information in a library of data on materials and allows comparisons and analysis, the amount of CO₂ emissions within the life cycle of PLA was determined, it was found in this analysis that PLA presents high carbon emissions due to the considerable energy consumption required in its production. However, it is important to consider other key aspects of its life cycle, such as manufacturing, transportation and final disposal of the material, in which it shows a relatively low carbon footprint.

Keywords: *auxetic geometry, biodegradable material, compression testing, digital fabrication*

Citar como:

Garzón-Valencia, J. (2023). Evaluación de la influencia del uso de malla con geometría auxética en elementos de concreto sometidos a compresión. *Letras ConCiencia Tecnológica*, (21). <https://doi.org/10.55411/26652544.257>

Introducción

El uso de materiales auxéticos se ha incrementado en años recientes en la industria de confección de chalecos antibalas y calzado para deportistas de alto rendimiento, gracias a las propiedades de absorción y disipación de energía ante cargas de impacto (Soldado et al., 2022). En diferentes estudios se ha concluido que la geometría auxética se caracteriza por una alta resistencia al corte y a la compresión, además de contar con una relación de Poisson negativa, que permite alcanzar la reacción estructural específica capaz de actuar de forma óptima en respuesta a acciones externas (Mazaev et al., 2020). Se ha demostrado cómo estas geometrías pueden, en determinadas circunstancias, producir un comportamiento casi lineal (incluso en condiciones de grandes desplazamientos) y la rigidez deseada (Brighenti, 2014). El diseño, la composición o la geometría estructural serán determinantes para lograr las reacciones esperadas y desarrollar estas propiedades mecánicas, además pueden ser de utilidad en múltiples campos profesionales (Jalkh, 2020).

Según Toledo (2018), se ha incrementado la necesidad de generar nuevas tecnologías en la industria de la construcción, capaces de brindar una solución a los nuevos desafíos que han surgido conforme al progreso de la humanidad; este autor, también resalta que se requieren cambios significativos en la forma de producción de materiales para esta in-

dustria. Aunque la historia de la impresión 3D se remonta a 1976, es solo hasta años recientes que ha aparecido como herramienta de producción de elementos de construcción en el área de la ingeniería civil, esta se caracteriza por la creación rápida de prototipos y su personalización; también es una tecnología que produce geometrías complicadas que antes eran imposibles de realizar mediante otros procesos de fabricación, es por ello que se plantea que la impresión 3D será determinante en el área de la construcción de edificaciones, a través de diseños excepcionales que serán posibles gracias a la fabricación digital (Adeva, 2022).

Por otra parte, y siguiendo en la misma línea, es fundamental considerar que al no existir una correcta disposición final de los materiales de construcción, una vez cumplen su ciclo de vida, se genera una problemática de tipo ambiental, esto es muy relevante y hay tenerlo en cuenta debido a la crisis del cambio climático, por lo que se tiene que avanzar hacia formas más sostenibles en la industria de la construcción, que involucren materiales biodegradables, además de ser capaces de reducir las emisiones de CO₂ (Seo et al., 2016).

En la literatura aún son pocas las investigaciones relacionadas con la implementación de la geometría auxética como refuerzo del concreto, puesto que es un tema reciente e innovador.

Por ejemplo, Luo et al. (2022) desarrollaron un programa experimental en el que evaluaron el comportamiento a compresión de especímenes reforzados con malla auxética de acero y determinaron que la carga máxima y la rigidez de sus construcciones compuestas aumentan en proporción a la relación de Poisson del refuerzo; además, demostraron que reducir la relación de Poisson es una estrategia acertada para mejorar el rendimiento a compresión de las estructuras de material compuesto.

Adicionalmente, Zahra y Dhanasekar (2017) estudiaron la caracterización de un mortero cementoso polimérico, haciendo uso de un polímero auxético tipo esponja; analizaron su comportamiento en dos caras opuestas de una vigueta de mortero y concluyeron que la delaminación y la fragilidad, causadas por los compuestos cementosos, podrían reducirse con la implementación del material auxético.

Por otro parte, Gohar et al. (2021) modificaron la estructura convencional y el método de optimización de la forma utilizada con la finalidad de crear estructuras auxéticas de alto rendimiento, para ello imprimieron distintas estructuras auxéticas y realizaron comparaciones de comportamiento estructural, en donde concluyeron que este tipo de geometrías novedosas aumentan notablemente el módulo de Young y la absorción de energía del material. A su vez Patiballa y Krishnan (2018) tuvieron en cuenta lo anterior e investigaron la influencia de la geometría del material, empleando un marco basado en la mecánica para evaluar la transmisión de la carga a través de la geometría de las microestructuras y su influencia; para ello, realizaron estudios a través de un entorno digital y con elementos de viga cúbicos híbridos, y concluyeron que esta estructura posee una alta resistencia a la indentación y al corte, por lo cual este diseño puede ser utilizado en microestructuras tridimensionales.

Por su parte, Jiménez (2017) y Álvarez (2017) plantean por separado que el mejor desempeño auxé-

tico se encuentra en un ángulo de reentrada entre 35° y 45° (en ángulos mayores a 45° no se presenta un comportamiento auxético); adicionalmente, demuestran la importancia de la longitud de las celdas y su grosor. Álvarez (2017) explica cómo influyen estos factores, puesto que el comportamiento auxético adecuado se encuentra en una altura de celda de entre 1 y 3 cm y un grosor de 2 mm, según sus resultados.

Finalmente, Jalkh (2020) estudió distintas estructuras auxéticas variando sus formas y analizando especialmente el movimiento de sus celdas, ante esto encontró una integración total entre forma, material y comportamiento. Igualmente, en su investigación, indica que las variables que se deben tener en cuenta para el diseño de malla auxética son: la longitud de las vigas horizontales y diagonales que forman las celdas del prototipo, el ancho de la sección transversal de estas y el grosor de la estructura.

Con base en que el uso de impresión 3D contribuye en la producción de elementos de forma rápida y personalizada con materiales sustentables, y en que el uso de malla auxética permite incrementos de resistencia y rigidez de los elementos se planteó como objetivo de este trabajo evaluar la influencia del uso de malla con geometría auxética desarrollada a partir de PLA impresa en 3D, en elementos de concreto sometidos a compresión. Para ello, se desarrolló un programa experimental en el que se ensayaron 16 especímenes reforzados con geometría auxética con variación de altura y espesores de celda. Las propiedades mecánicas obtenidas en estos ensayos se compararon con los resultados de ocho especímenes sin refuerzo alguno. Adicionalmente, se determinó la cantidad de emisiones de CO₂ dentro del ciclo de vida del PLA, con el objetivo de encontrar las principales diferencias sostenibles entre este tipo de material alternativo y el acero, el cual se ha determinado como altamente contaminante para el medio ambiente.

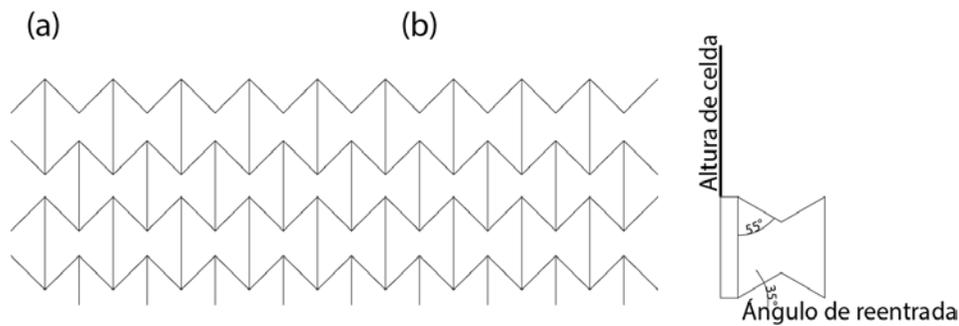
Metodología

Se evaluó la influencia del uso de malla con geometría auxética en el comportamiento a compresión de los prototipos de concreto, mediante el programa experimental que se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales y Suelos de Ingeniería Civil de la Universidad de Ibagué, en la ciudad de Ibagué (Tolima).

Descripción de los prototipos auxéticos

El tipo de geometría auxética seleccionada es una estructura tipo panal de abeja reentrante, y con lo cual se diseñaron los cuatro prototipos auxéticos que variaron en su altura y espesor de celda.

La figura 1(a) presenta un esquema con la disposición de celdas de malla auxética tipo panal de abeja reentrante y la figura 1(b) ilustra la altura y el ángulo de reentrada de una celda auxética. En tanto que la figura 2 muestra una imagen correspondiente al prototipo de malla con geometría auxética empleada como refuerzo de los especímenes. En la tabla 1 se detallan las características de las mallas auxéticas de refuerzo de los especímenes ensayados en el programa experimental, malla auxética tipo 1 (M.A. tipo 1), malla auxética tipo 2 (M.A. tipo 2), malla auxética tipo 3 (M.A. tipo 3) y malla auxética tipo 4 (M.A. tipo 4).



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 1. Esquema de malla auxética tipo panal de abeja reentrante, (b) altura y ángulo de reentrada de una celda auxética



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 2. Malla con geometría auxética empleada como refuerzo de los especímenes

Tabla 1.

Características de las mallas auxéticas de refuerzo de los especímenes ensayados

Espécimen	Altura de celda (cm)	Espesor de celda (mm)	Ángulo de reentrada (°)
M.A. Tipo 1	1	2	35
M.A. Tipo 1	2	2	35
M.A. Tipo 1	2	3	35
M.A. Tipo 1	2	4	35

Nota. Fuente elaboración propia.

Configuración del ensayo

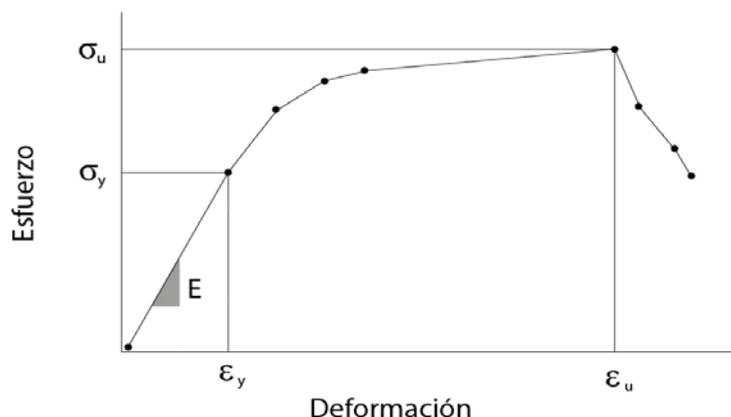
Para llevar a cabo el programa experimental se elaboraron cuatro especímenes por cada tipo de malla auxética, como se observa en la tabla 1, para un total de 16 especímenes de concreto reforzado. Adicionalmente, se elaboraron ocho especímenes sin refuerzo, que sirvieron como patrón de comparación. Estos especímenes consistieron en cilindros de 15 cm de altura y 7,5 cm

de diámetro. En cuanto al porcentaje de refuerzo, respecto al volumen total del cilindro, todos tienen aproximadamente un 5%. El programa experimental, como se mencionó, fue en el Laboratorio de Materiales y Suelos de Ingeniería Civil de la Universidad de Ibagué, siguiendo las especificaciones de la NTC 3546 Icontec (2003). En la figura 3 se muestra la implementación del ensayo a compresión que se llevó a cabo empleando una prensa universal de ensayos a compresión.



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 3. Implementación del ensayo a compresión de los especímenes



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 4. Gráfico esfuerzo vs. deformación

Las propiedades evaluadas a través de estas estructuras fueron: resistencia, ductilidad y módulo de rigidez. Dichas propiedades se determinaron y se cuantificaron luego de la construcción de gráficos esfuerzo vs. deformación (ver figura 4).

$$E = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \quad (2)$$

donde:

σ_y = esfuerzo cedente

ϵ_y = deformación cedente

ϵ_u = deformación última

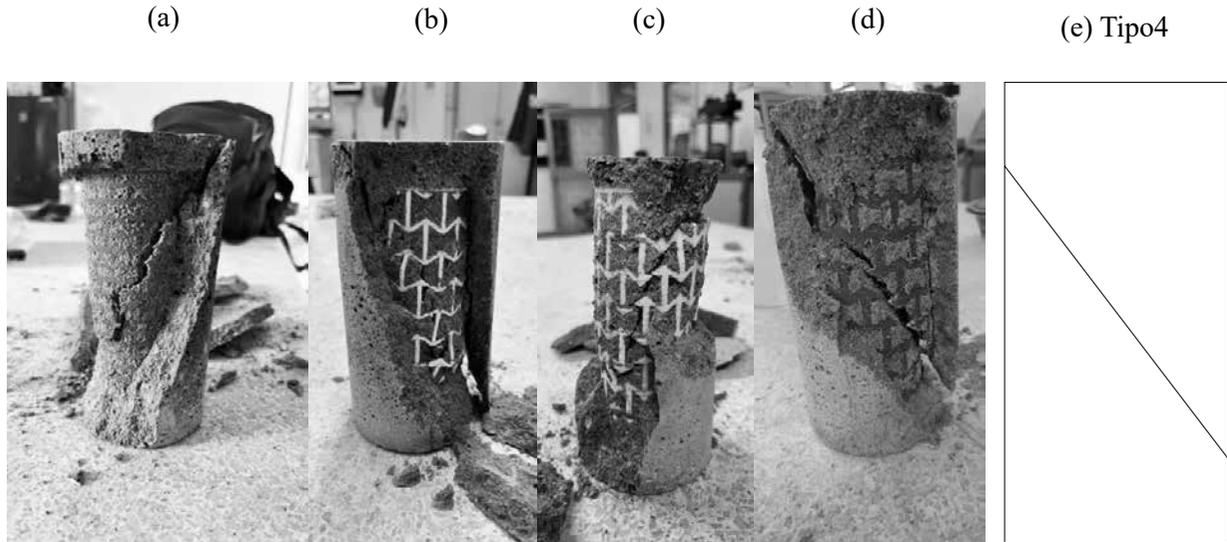
Para cada grupo de especímenes se generan valores estadísticos de los resultados de resistencia última obtenidas; posteriormente, se comparan estos resultados para realizar el respectivo análisis de la influencia de la geometría auxética, tomando como variables de comparación entre cada diseño auxético y las muestras de concreto simple, propiedades como el módulo de elasticidad que viene dado por la Ec (1), y que se define como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. La ductilidad viene dada por la Ec (2) y para calcular la ductilidad de un material, a partir de un gráfico esfuerzo vs. deformación, se mide la deformación plástica que ocurre antes de que el material se rompa o falle. Esto se puede hacer midiendo la deformación en el punto de cedencia o en el punto máximo de la curva esfuerzo-deformación, antes de la fractura. Por último, se analiza la resistencia que se mide en términos del esfuerzo máximo que pueda soportar el material antes de romperse.

Resultados

En esta sección se describen y analizan los resultados obtenidos en el programa experimental.

Descripción del tipo de fallo

En esta fase de ensayo se pudo observar que hay una tendencia de fallo a cortante en las muestras auxéticas, puesto que los prototipos fallan a un ángulo de 45°; también se observa la falta de adherencia entre el concreto y la malla de refuerzo, lo cual induce a un descascaramiento del recubrimiento e incide en la resistencia de los especímenes (ver figura 5). Según lo indicado en Icontec 673 (2010), se pueden tener seis modos de falla típicas en los cilindros de concreto; en la figura 6 se observa un fallo tipo 4 en los especímenes de concreto simple, lo cual implica una correcta elaboración del espécimen y la falla que es típica por esfuerzo cortante.



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 5. Modo de falla de prototipos auxéticos (a) M.A. tipo 1, (b) M.A. tipo 2, (c) M.A. tipo 3, (d) M.A. tipo 4, (e) falla tipo 4 descrito en Icontec 673 (2010)



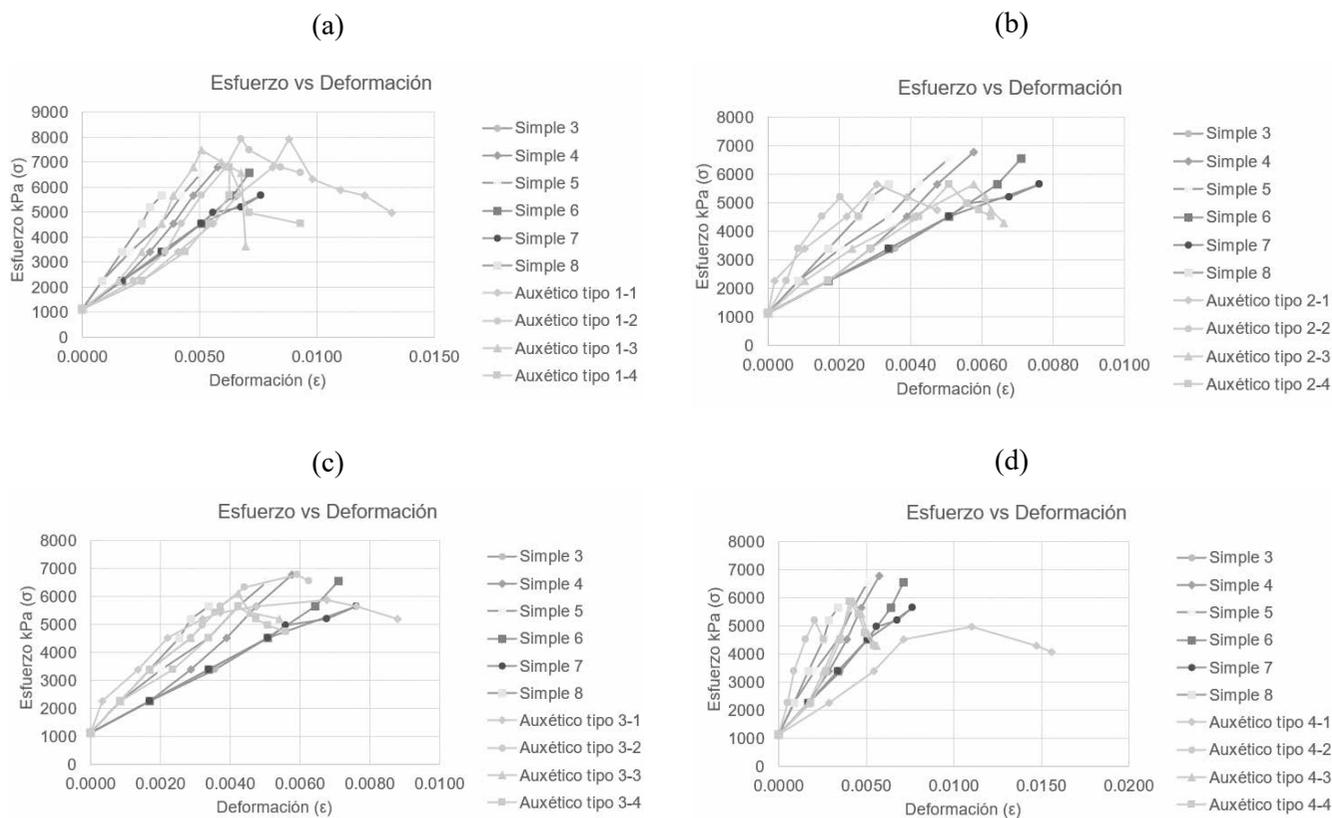
Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 6. Modo de falla de especímenes de concreto simple

Especímenes reforzados con malla auxética vs. especímenes sin refuerzo

En la figura 7 se muestran las gráficas de esfuerzo vs. deformación de los especímenes ensayados a compresión. Asimismo se puede observar que los especímenes reforzados M.A. tipo 1 presentan una rigidez similar a los especímenes sin refuerzo; sin embargo, exhiben una mayor resistencia y capacidad de deformación inelástica. En cuanto a los especímenes M.A. tipo 2, en la figura 7b, se advierte que poseen una resistencia ligeramente inferior pero, también, con una capacidad de

deformación inelástica superior; en cuanto a la rigidez es similar a los especímenes sin refuerzo, aunque tienen una mayor linealidad. En los especímenes M.A. tipo 3 se tiene una rigidez superior con una resistencia ligeramente inferior, y se distingue, en la figura 7c, una capacidad de deformación inelástica significativamente superior. Por último, en la figura 7d, se constata que M.A. tipo 4 expone una rigidez y resistencia similar a los especímenes sin refuerzo; no obstante, en cuanto a su capacidad de deformación se observa que



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 7. Gráficos comparativos entre muestras simples y cada prototipo auxético, (a) M.A. tipo 1, (b) M.A. tipo 2, (c) M.A. tipo 3, (d) M.A. tipo 4.

M.A. tipo 4 cuenta con una notable capacidad de deformarse en el rango inelástico.

La tabla 2 resume los resultados promediados de cada tipo de espécimen, y sobre los cuales se presentan las siguientes observaciones:

44

M.A. tipo 1: tiene un módulo de elasticidad 0,24 % menor; una resistencia 5 % mayor y también una ductilidad 29 % mayor.

M.A. tipo 2: posee un módulo de elasticidad mayor en un 11 %; una resistencia menor en un 23 % y también es mayor en un 20 % en ductilidad.

M.A. tipo 3: posee un módulo de elasticidad mayor en un 4 %; una resistencia menor en un 15 % y también es mayor en un 57 % en ductilidad.

M.A. tipo 4: posee un módulo de elasticidad mayor en un 3 %; una resistencia menor en un 23 % y también es mayor en un 55 % en ductilidad.

Como se puede observar en los resultados obtenidos, el confinamiento provisto por la malla auxética aporta incrementos en la ductilidad, definida como la capacidad de deformación en el rango inelástico, así como la rigidez a la deformación en el rango elástico (McCormac y Brown, 2017). En cuanto a la resistencia se puede ver que, en casi todos los prototipos con refuerzo, se obtuvo una resistencia menor, por lo cual se considera

Tabla 2.

Resultados variables de comparación de los especímenes

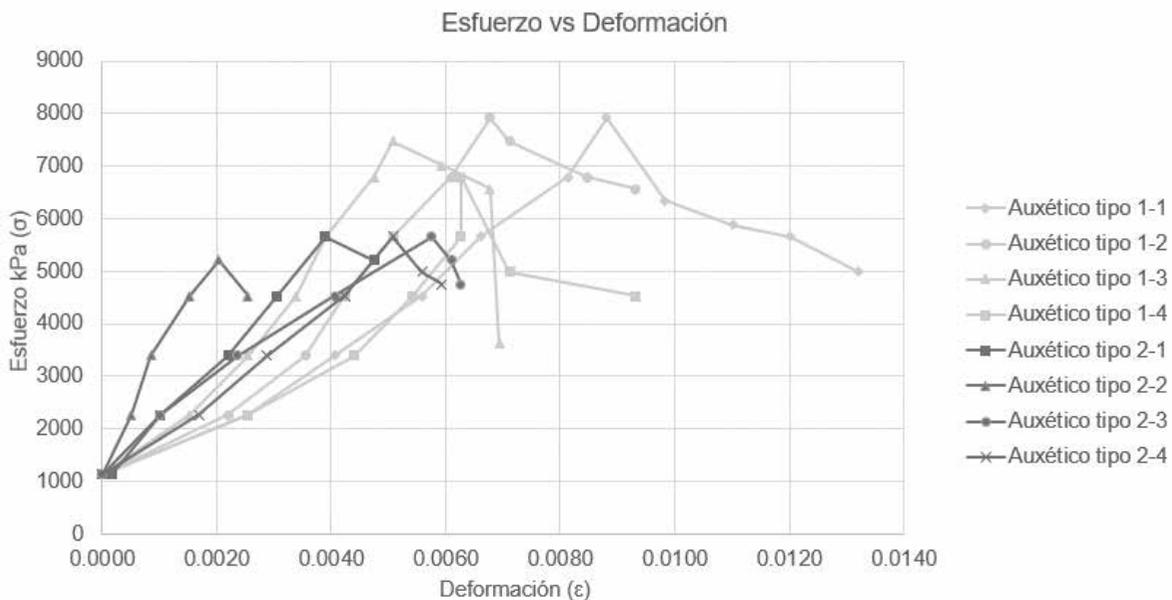
Especímen	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia (Mpa)	Ductilidad
Muestras simples	1075,39	7,16	1,00
M.A. tipo 1	1072,75	7,53	1,29
M.A. tipo 2	1192,85	5,55	1,20
M.A. tipo 3	1116,84	6,11	1,57
M.A. tipo 4	1105,72	5,49	1,55

Nota. Fuente elaboración propia.

que esto se debe a la falta de adherencia entre el concreto y la malla de refuerzo, y que induce de forma prematura al descascaramiento del recubrimiento.

Influencia del refuerzo con variación en la altura de celdas

Los resultados obtenidos en M.A. tipo 1, con una altura de celda de 1 cm, son superiores a M.A. tipo



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 8. Gráfico comparativo entre M.A. tipo 1 y M.A. tipo 2

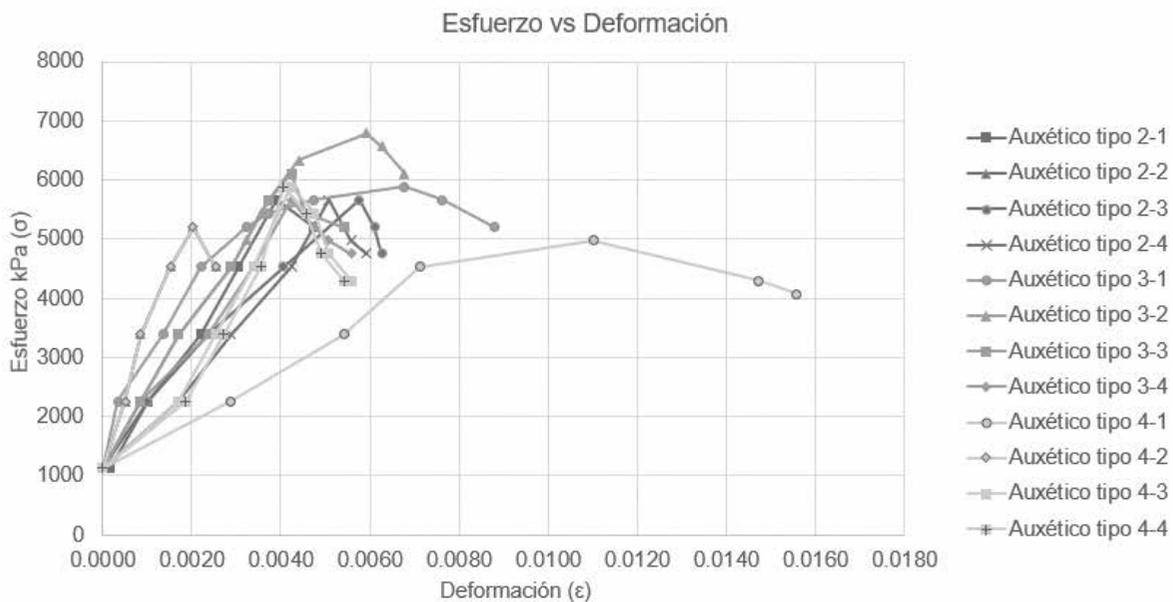
2, que cuenta con una altura de celda de 2 cm, en ductilidad y resistencia, pero posee un módulo de elasticidad inferior (figura 8).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, que se presentan en la tabla 2, se observa lo siguiente:

Los especímenes M.A. tipo 1 poseen un módulo de elasticidad menor en 10 %; una resistencia mayor en 36 % y también es mayor 8 % en ductilidad respecto las M.A. tipo 2.

Influencia del refuerzo con variación en el espesor de celdas

En la figura 9 se observan las curvas de comportamiento, al variar el espesor de celda se mantiene constante la altura de celda. Se obtiene que a mayor espesor de celda mayor es la ductilidad; también se puede apreciar que tienen similitud en cuanto a resistencia y en cuanto a su módulo de elasticidad. Los especímenes M.A. tipo 3 poseen superioridad en todos los aspectos evaluados.



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 9. Gráfico comparativo entre M.A. tipo 2, M.A. tipo 3 y M.A. tipo 4

46

A través de los resultados obtenidos que se señalan en la tabla 2 se deduce lo siguiente:

El espécimen M.A. tipo 2, respecto a M.A. tipo 3 y M.A. tipo 4, posee un módulo de elasticidad mayor, 7 % y 8 % respectivamente; una resistencia 9% menor y 1 % mayor. Por otra parte, en cuanto a ductilidad son 24 % menor y 23 % menor, en ese orden.

El espécimen M.A. tipo 3, respecto a M.A. tipo 2 y tipo 4, posee un módulo de elasticidad 6 % menor y 1 % mayor respectivamente; una resistencia 10 %

mayor y 11 % mayor. Por otra parte, en cuanto a ductilidad son 31 % mayor y 1 % mayor, en ese orden.

El espécimen M.A. tipo 4, respecto a M.A. tipo 2 y M.A. tipo 3, posee un módulo de elasticidad 7% menor y 1 % menor; una resistencia 1% y 10% menor. Por otra parte, en cuanto a ductilidad son 30 % mayor y 1 % menor, en ese orden.

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que a mayor espesor de celda mayor es la ductilidad.

Coefficiente de variación de cada grupo de especímenes

Por último, y con el fin de tener una confiabilidad estadística, se calculó el coeficiente de variación de cada grupo de especímenes, de modo que hubo los siguientes resultados:

El coeficiente de variación de M.A. tipo 1 es del 25 %, esto indica que los valores individuales dentro de este grupo tienen una variabilidad relativamente alta en comparación con su valor medio.

El coeficiente de variación de M.A. tipo 2 es del 12%, esto indica que los valores individuales dentro de este grupo tienen una variabilidad moderada respecto a su valor medio.

El coeficiente de variación de M.A. tipo 3 es del 14%, esto sugiere que los valores individuales dentro de este grupo tienen una variabilidad moderada en comparación con su valor medio.

El coeficiente de variación de M.A. tipo 4 es del 3%, esto indica que los valores individuales dentro de este grupo tienen una variabilidad baja en relación con su valor medio.

El coeficiente de variación de las muestras simples es del 24 %, esto indica que los valores individuales tienen una variabilidad relativamente alta respecto a su valor medio.

Emisiones de CO₂ del PLA dentro de su ciclo de vida

Con el fin de determinar la cantidad de emisiones de CO₂, dentro del ciclo de vida del PLA, se hizo un análisis por medio del software CES selector Ansys Granta: Materials information management. A continuación se presenta detalladamente, en la tabla 3, la huella de carbono en los distintos procesos del PLA. El análisis exhaustivo permite una evaluación precisa de las emisiones de CO₂ asociadas a cada fase del proceso; esto coadyuva una visión integral de la contribución del PLA a la disminución de emisiones de carbono, a lo largo de su ciclo de vida. Adicionalmente, en la Figura 10, se ilustra el gráfico de la huella de carbono del PLA expresada en kg. En la imagen se puede apreciar que la mayor cantidad de CO₂ producido por el PLA está principalmente en su elaboración, puesto que requiere grandes cantidades de energía para ser producido; sin embargo en los demás aspectos del ciclo de vida muestra un balance positivo.

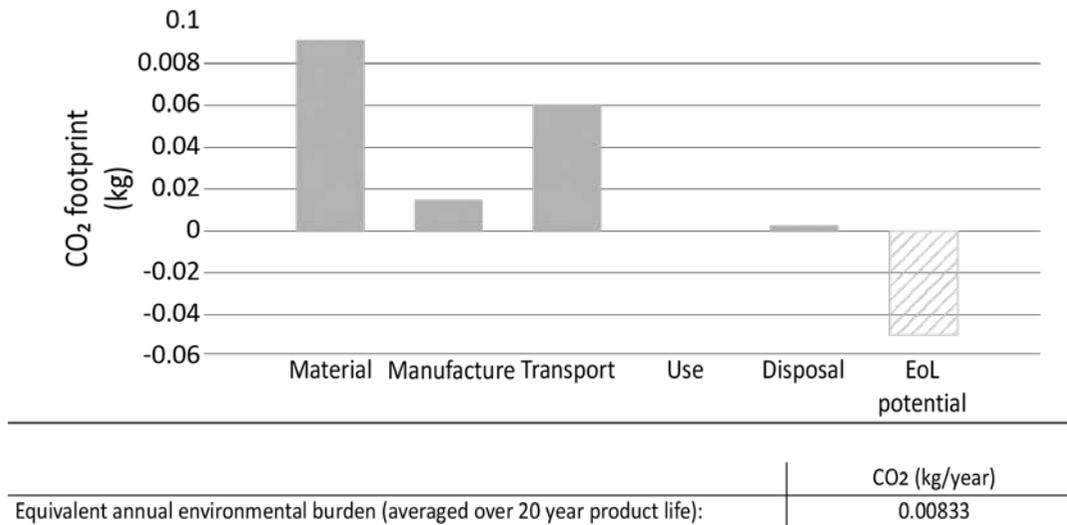
Posteriormente, y con el fin de tener mayor claridad de lo que representan estos valores referentes a la huella de carbono del material, se compara el ciclo de vida del PLA con el material de refuerzo convencional usado en todas las construcciones como lo es el acero.

Tabla 3.

Huella de carbono en los distintos procesos del PLA

Fase	Huella de carbono CO ₂ (kg)	Huella de carbono CO ₂ (%)
Material	0.0908	54.5
Manufactura	0.0144	8.6
Transporte	0.0599	35.9
Uso	0	0
Disposición	0.00157	0.9
Total, para su primera vida	0.167	100
Potencial al final de su ciclo de vida	-0.0508	

Nota. Fuente elaboración propia.

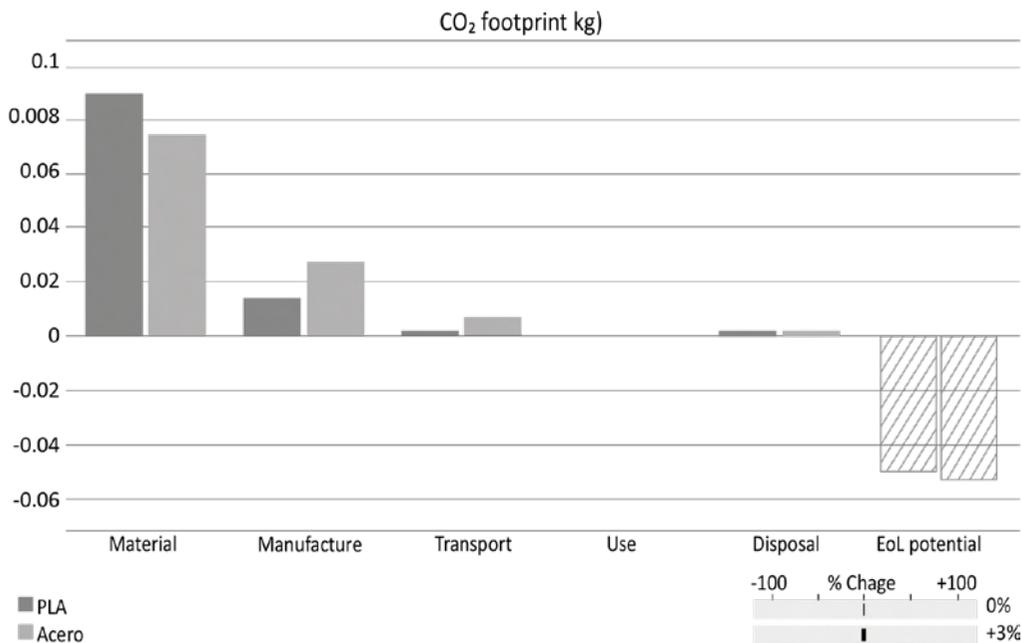


Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 10. Gráfico huella de carbono del PLA en kilogramos.

A través de la aplicación de un análisis comparativo, que se muestra en la representación gráfica en la figura 11, se puede llevar a cabo una evaluación contrastiva de la huella de carbono asociada a cada material de manera concurrente.

Dicho análisis incluye no solo la consideración de las emisiones de gases de efecto invernadero durante la fase de producción y uso, sino también el potencial de fin de vida de cada material, es decir, la estimación de las emisiones adicionales resul-



Nota. Fuente elaboración propia.

Figura 11. Gráfico comparativo huella de carbono Acero vs. PLA

tantes de su disposición final o discontinuación. Este enfoque, que estima también el potencial de fin de vida, es más abarcador y proporciona una visión más completa y precisa de las implicaciones ambientales de los distintos materiales en estudio. Según el *software* Granta Design, el End of Life Potential se refiere a los ahorros potenciales que se pueden obtener al aprovechar estos materiales recuperados, en vez de utilizar nuevos recursos (Granta, 2021).

Al analizar detenidamente los resultados obtenidos, se evidencia que el PLA tiene una baja huella de carbono en varios aspectos, tales como: en manufactura con el 8.6 % del total de la huella de carbono; transporte con un 35.9 % y disposición final con un 9 %. Sin embargo, su producción presenta una huella de carbono alta, con un total de 53.5 % . Esto se debe al elevado consumo de energía requerido durante los largos procesos de fabricación de este material. No obstante, al considerar el ciclo de vida completo del PLA, es importante incluir su reutilización. En este aspecto, su huella de carbono es muy favorable, puesto que no exige un gran gasto de energía para ser reutilizado. Los procesos involucrados en su reutilización son menos complejos, lo que lo convierte en una opción más sencilla y eficiente. Según los resultados de esta investigación, este hecho representa un importante aporte a los esfuerzos globales por lograr una transición hacia la sostenibilidad.

Discusión

En los ensayos hechos se evidencia la falta de adherencia entre el concreto y la malla de refuerzo, lo que provoca el desprendimiento prematuro del recubrimiento y afecta negativamente la resistencia. Se destaca que el confinamiento proporcionado por una malla auxética aumenta la ductilidad y la rigidez en la deformación. Además, se tiene que a mayor espesor de celda, se obtiene una mayor ductilidad. La malla auxética se considera sostenible, debido a su baja huella de carbono y a los procesos de reutilización eficientes.

No es posible comparar los resultados obtenidos en esta investigación con investigaciones previas, debido a que estos son los primeros ensayos de refuerzo con PLA (ácido poliláctico) que se reportan en el mundo.

Conclusiones

En este trabajo se evaluó experimentalmente la influencia del uso de malla con geometría auxética hecha a partir de PLA impresa en 3D, en elementos de concreto sometidos a compresión, variando la altura y el espesor de celda. Las propiedades mecánicas consideradas en la evaluación fueron resistencia, ductilidad y módulo de elasticidad de los especímenes ensayados. Entre las conclusiones relevantes podemos mencionar:

El confinamiento proporcionado por la malla auxética incrementa la ductilidad y la rigidez en la deformación de los especímenes, de manera que mejora notablemente las propiedades del concreto sometido a carga axial.

En general, durante los ensayos de compresión de los especímenes de concreto, reforzados con malla de geometría auxética, se observó que el núcleo de los especímenes mantuvo su forma original sin experimentar cambios significativos. Adicionalmente, también se observó que la variación en la altura de la celda influye en este comportamiento. Específicamente, se encontró que una altura de celda de 2 cm exhibió una mayor capacidad de deformación, lo que indica que esta altura es más favorable en términos de flexibilidad y adaptabilidad bajo carga de compresión.

Además, se observó que la configuración geométrica en respuesta a la flexión y torsión que experimenta cada celda, al ser comprimido el espécimen, produce un considerable almacenamiento de energía a través de tensiones de cizallamiento; esto se evidencia en la Figura 5, en la que se observan cortes cercanos a los ángulos de reentrada.

Por otra parte, el espesor de la celda juega un papel importante en el confinamiento aportado por la malla auxética, pues en la medida en que se aumenta el espesor de celda, se incrementa la ductilidad.

Para disminuir la adherencia entre el concreto y la malla de refuerzo, se debe diseñar la impresión de la malla con elementos que permitan la conexión con el concreto, de tal manera que la resistencia no se vea afectada.

Además, el estudio sobre el uso de PLA como material de refuerzo del concreto tiene una huella de carbono favorable, porque su reutilización no demanda un alto consumo de energía y sus procesos son menos complejos en comparación con el acero, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental del planeta. Así las cosas, se recomienda seguir investigando sobre el uso de materiales alternativos en la ingeniería civil.

Para concluir, es muy pertinente hacer notar que los resultados presentados en este estudio pueden ser pioneros en la literatura, puesto que son prometedores en cuanto a la favorabilidad de producir elementos de forma rápida y personalizada mediante impresión 3D con materiales sustentables, en este caso como refuerzo en elementos de concreto sometidos a compresión.

Agradecimientos

Queremos expresar el más sincero agradecimiento a Concretolima S.A. por su invaluable contribución al desarrollo de este proyecto, su generoso aporte económico y la disposición de sus instalaciones para la realización de los ensayos, pues han sido fundamentales para el logro de los objetivos planteados.

Referencias

Adeva, R. (2022). *Todo lo Todo lo que debes saber sobre la impresión 3D y sus utilidades*. <https://acortar.link/ljYjkz>

Álvarez, D. (2017). *Aplicaciones de las propiedades auxéticas en la arquitectura*. <https://acortar.link/Hytdma>

Brighenti, R. (2014). Smart behaviour of layered plates through the use of auxetic materials. *Thin-Walled Structures*, 84, 432–442. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2014.07.017>

Gohar, S., Hussain, G., Ilyas, M. & Ali, A. (2021). Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 394–408. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.07.149>

Granta. (2021). *End of life calculations*.

Icontec. (2003). *NTC Colombiana 3546. Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada*. Icontec.

Icontec. (2010). NTC Colombiana 673. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Icontec. <https://www.studocu.com/in/document/itm-university/circuitos-electricos/ntc673-concretos-ensayo-de-resistencia-a-la-compresion-de-especimenes-cilindricos-de-concreto/4717071>

Jalkh, H. (16-20 noviembre, 2020). Morpho-Active Materials: Fabricating auxetic structures with bioinspired behavior [Conferencia]. XXIV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, Medellín, Colombia. https://papers.cumincad.org/data/works/att/sigradi2020_117.pdf

Jiménez. R. (2017). Modelización de estructuras auxéticas. [Tesis de grado para optar el grado en Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid]. UC3M. https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27295/TFG_

- Raul_Jimenez_Espada.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Luo, C., Ren, X., Han, D., Zhang, X. G., Zhong, R., Zhang, X. Y. & Xie, Y. M. (2022). A novel concrete-filled auxetic tube composite structure: Design and compressive characteristic study. *Engineering Structures*, 268, 114759. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.114759>
- Mazaev, A. V., Ajenez, O. & Shitikova, M. V. (2020). Auxetics materials: classification, mechanical properties and applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 747(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012008>
- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2017). Diseño de concreto reforzado. Alpha Editorial.
- Patiballa, S., & Krishnan, G. (2018). Conceptual Design of Spatial Auxetic Microstructures. In T. Sigmund & F. Barthelat (Eds.)
- Proceedings of the IUTAM Symposium Architected Materials Mechanics, September 17-19, 2018 , Chicago, IL: Purdue University
- Libraries Scholarly Publishing Services. <https://docs.lib.purdue.edu/iutam/presentations/abstracts/40>
- Seo, M. S., Kim, T., Hong, G., & Kim, H. (2016). On-Site Measurements of CO2 Emissions during the Construction Phase of a Building Complex. *Energies*, 9(8), 599. <https://doi.org/10.3390/EN9080599>
- Soldado, E. L., González-Reguer, C. C. & González-Reguer, C. C. (2022). Vestuario y equipo para el soldado. <https://acortar.link/iqb5s1>
- Toledo, R. (2018). *La industria de la construcción está a punto de cambiar radicalmente*. Alpha Hardin.
- Zahra, T. & Dhanasekar, M. (2017). Characterisation of cementitious polymer mortar – Auxetic foam composites. *Construction and Building Materials*, 147, 143–159. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILD.M.A.T.2017.04.151>

¡ Nota. Tipo de artículo: Investigación.

