

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE UN MURO IMPRESO EN 3D

López, Santiago ^a; Gómez, Daniel ^b; García, José Jaime ^c

^a Ingeniero. civil, ^b Ingeniero. civil, PhD, ^c Ingeniero mecánico, PhD.

Universidad del Valle

santiago.moya@correounivalle.edu.co

RESUMEN

La industria de la construcción, tradicionalmente dependiente de la mano de obra y con una notable huella de carbono, enfrenta desafíos crecientes debido a los costos laborales en alza y una mayor preocupación por el medio ambiente. Ante esta realidad, se vuelve necesario buscar estrategias que permitan la automatización de procesos y la utilización más eficiente de los recursos disponibles. Dos enfoques clave para lograr estos objetivos son la impresión 3D de estructuras y la optimización topológica. Esta última busca la disposición óptima del material en un volumen dado, a menudo generando geometrías orgánicas complejas. En este trabajo se propone el diseño mediante optimización topológica de un muro impreso en 3D, estudiando los estados límite de esfuerzo a los que estará sometido a lo largo de su vida útil y considerando los aspectos necesarios para su fabricación.

ABSTRACT

The construction industry has traditionally relied heavily on labor and has a significant carbon footprint. With the increase in labor costs and growing concerns about environmental issues, it has become necessary to look for strategies to automate construction processes and make more efficient use of available resources. Two strategies developed to achieve these goals are 3D printing of structures and topological optimization, respectively. Topological optimization seeks the most efficient location of material in a defined volume, and this often leads to complex organic geometries that could be impractical and costly to construct using conventional methods. This is where 3D printing excels, offering a means to fabricate complex geometries efficiently. This work proposes the design through topology optimization of a 3D printed wall, studying the stress limit states to which it will be subjected throughout its useful life and considering the necessary aspects for its manufacture.

Organiza:

1. Introducción

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados debido a su disponibilidad local y relativo bajo costo en la mayoría de las regiones del mundo. No obstante, su producción implica una significativa huella de carbono, lo que plantea desafíos en términos de sostenibilidad ambiental. Para minimizar este impacto, es necesario desarrollar diseños eficientes que reduzcan la cantidad de material empleado. Sin embargo, el diseño de estructuras puede ser un proceso extenso y complejo, especialmente cuando la solución óptima no es evidente. Encontrar la mejor solución a menudo requiere un análisis iterativo de todas las variables involucradas. Por esta razón, la experiencia del ingeniero diseñador es fundamental, ya que puede contribuir a reducir el tiempo y los costos necesarios para alcanzar una solución adecuada, mediante el uso de herramientas digitales que automaticen el proceso.

Una de estas herramientas digitales puede ser la Optimización Topológica, una estrategia matemática que permite obtener una distribución eficiente de material en un dominio especificado [1]. En este proceso, el diseñador define un objetivo de diseño considerando las condiciones de carga, los límites y las restricciones del dominio. Esta metodología, generalmente, se desarrolla a partir de modelos de elementos finitos, donde se define el dominio a optimizar, y un algoritmo ajusta la disposición del material inicial mediante un proceso iterativo [2]. El resultado de este análisis son geometrías en las que el material se dispone únicamente donde es necesario, lo que generalmente resulta en formas orgánicas complejas. A diferencia de los elementos de concreto que suelen tener geometrías planas, debido a la facilidad constructiva, las losas o columnas optimizadas topológicamente pueden tener un desempeño estructural comparable a los elementos tradicionales, pero requieren menos material debido a su distribución más eficiente [3], [4], [5], [6].

Aunque las geometrías optimizadas pueden ofrecer beneficios sustanciales en términos de eficiencia estructural, también plantean desafíos significativos en la fase de construcción. La fabricación de estructuras con formas intrincadas a menudo requiere técnicas avanzadas y procesos de producción especializados. Por este motivo, la optimización topológica ha tenido aplicaciones limitadas en el ámbito civil, ya que se requieren métodos que permitan la creación precisa y detallada de elementos tridimensionales. Sin embargo, la tecnología de impresión 3D ha revolucionado los métodos de manufactura, proporcionando una solución eficiente y económica para producir geometrías complejas. Esta tecnología permite superar los obstáculos constructivos de las formas complejas, haciendo viables estos diseños tanto económica como constructivamente. La capacidad de imprimir estructuras directamente desde modelos digitales no solo mejora la precisión y el detalle, sino que también reduce el tiempo y los costos de producción. Así, la impresión 3D abre nuevas oportunidades para la aplicación práctica de la optimización topológica en la construcción, promoviendo la creación de infraestructuras más eficientes y

Organiza:

sostenibles.

2. Métodos

La optimización topológica, es un proceso que busca determinar la distribución de material óptima dentro de un dominio de diseño [1]. La evaluación de la solución óptima se realiza con base en objetivos específicos, como la rigidez [7], la cantidad de material requerido o el desempeño térmico [8]. Para lograrlo, se formulan problemas que consideran variables de diseño como la densidad del material en cada punto del espacio de diseño, el máximo estado de esfuerzos admisible y las restricciones geométricas que garantizan la funcionalidad de un elemento. La función objetivo definida integra estas variables y establece restricciones que deben cumplirse para las soluciones propuestas.

Los algoritmos de optimización topológica más empleados se basan en la reducción del volumen de diseño [9]. Estos métodos basados en densidad siguen la formulación presentada en la Ec. 1, donde $c(x)$ representa la conformidad. En esta ecuación, $\mathbf{U}$ y $\mathbf{F}$ son los vectores globales de desplazamiento y fuerza, respectivamente, mientras que $\mathbf{K}$ es la matriz de rigidez global. El vector $\mathbf{u}_e$ representa el desplazamiento del elemento, y k_0 es la rigidez de cada elemento considerando un módulo de elasticidad unitario. El vector x corresponde a las variables de diseño, es decir, las densidades del elemento. El dominio de diseño se describe utilizando N elementos. Además, $v(x)$ y V_0 representan el volumen del material y el volumen inicial, respectivamente, mientras que f indica la fracción de volumen prescrita.

$$\begin{aligned} \min_x: \quad & c(x) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N E_e(x_e) \mathbf{u}_e^T k_0 (\mathbf{u}_e) \\ \text{sujeto a:} \quad & V(x)/V_0 = f \\ & \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ & 0 \leq x \leq 1 \end{aligned} \tag{1}$$

Utilizando el algoritmo de optimización descrito anteriormente y el análisis plano de un área que representa un muro de un sistema de vivienda modular, con dimensiones de 20x80x220 cm, se lleva a cabo un proceso iterativo para reducir selectivamente el material de este volumen inicial. El objetivo es minimizar la pérdida de rigidez lateral, considerando dos casos de carga que aplican fuerzas laterales opuestas en el borde superior, este proceso se muestra en la Figura 1. Además, por consideraciones constructivas, se restringe la eliminación de material en los bordes exteriores del muro. Una vez el algoritmo ha convergido a la geometría mostrada, se procede a evaluar los resultados utilizando un software de elementos finitos.

Organiza:

En este análisis, se considera un material linealmente elástico cuyas propiedades se detallan en la Tabla 1. Además, se impone una restricción en el desplazamiento de la base y una carga de 1000 N aplicada en el borde superior, en la dirección horizontal. Estas condiciones, permiten evaluar de manera simplificada el comportamiento del elemento optimizado frente a las cargas consideradas, analizando tanto los esfuerzos generados como las deformaciones resultantes.

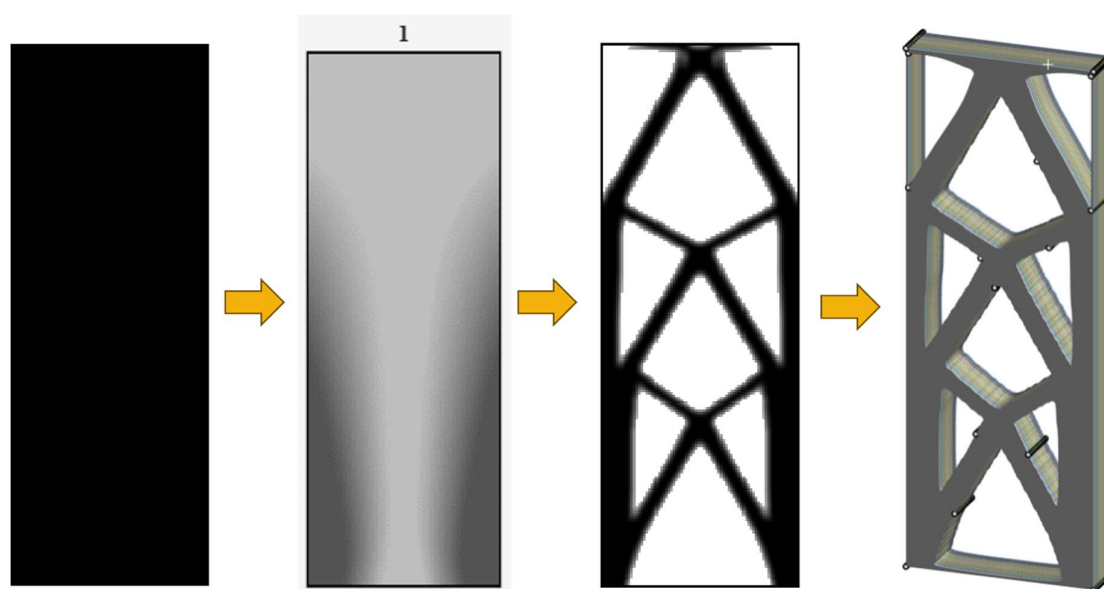


Figura 1. Esquema de la optimización.

ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	E (MPa)	ν	f'_c (MPa)	f'_t (MPa)
2650	565	0.785	18.3	1.3

Tabla 1 - Valores de las propiedades del material considerado.

Organiza:

Además de la geometría obtenida mediante optimización, se exploraron tres alternativas de relleno para el muro analizado, todas ellas con un cordón de 2 cm de espesor y un patrón diseñado para lograr una reducción de volumen similar a la del muro optimizado. Estas alternativas se detallan en la Figura 2, e incluyen: un elemento sólido, un patrón cuadrilátero, un patrón triangular y un patrón hexagonal inspirado en un panal de abejas.

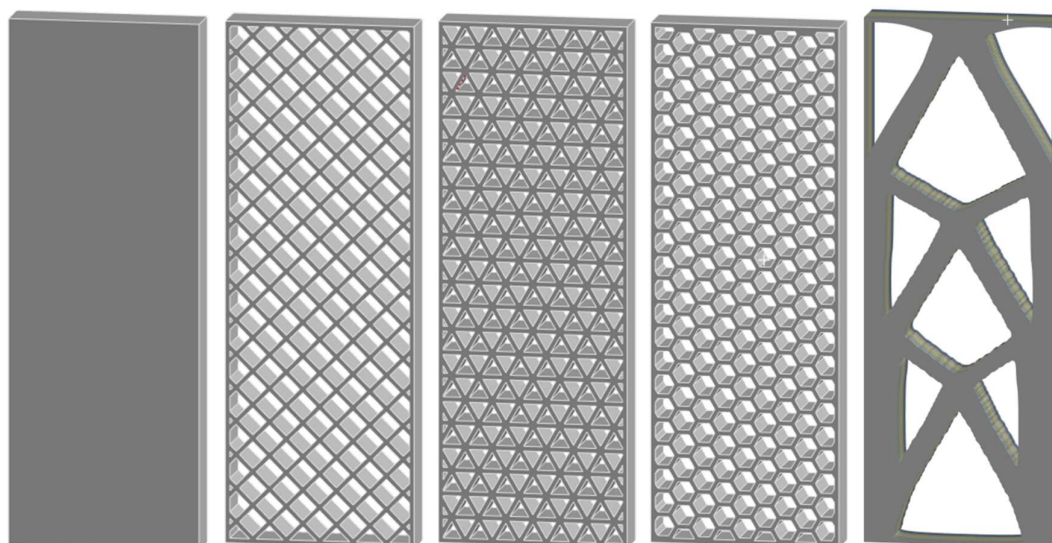


Figura 2. Alternativas estudiadas.

3. Resultados

Uno de los efectos de modificar la geometría inicial puede ser la concentración de esfuerzos debido a la discontinuidad de las geometrías consideradas. Este fenómeno puede generar puntos de alta tensión que comprometen la integridad estructural del muro a nivel local. No obstante, la Figura 3, que muestra los esfuerzos principales, indica que la geometría optimizada, al tener una forma más suave y continua, no presenta este inconveniente. La suavidad de la geometría optimizada permite una distribución más uniforme de los esfuerzos, evitando la formación de concentraciones que podrían ser críticas en el proceso de formación y evolución de grietas. Esta característica no solo implica una mayor resiliencia ante diferentes condiciones de carga, sino que también contribuye a la durabilidad y seguridad del elemento, reduciendo la probabilidad de necesitar mantenimiento y reparaciones frecuentes.

Organiza:

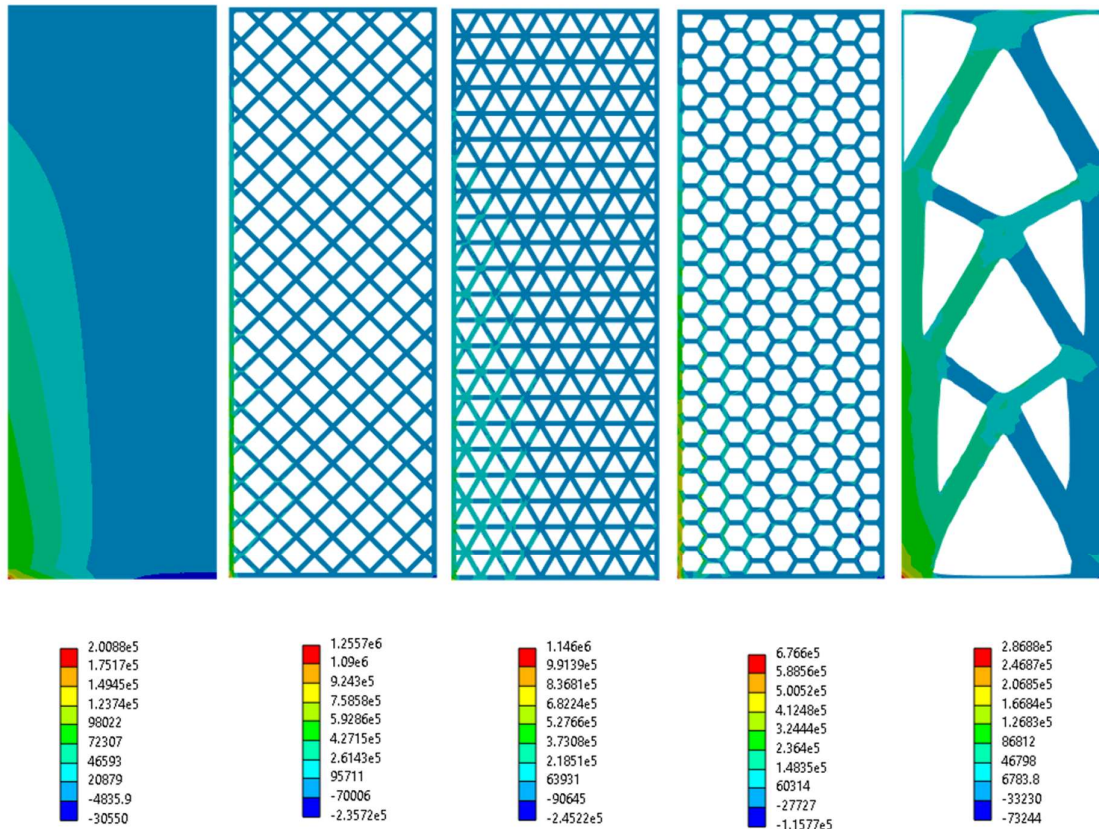


Figura 3. Esfuerzos principales máximos.

Considerando que el muro estará sometido a cargas que implican flexión, el primer parámetro de evaluación es el máximo esfuerzo flector (σ_y). Dado que el muro será construido con un material frágil como el concreto sin refuerzo, los esfuerzos de tracción se consideran críticos, evaluando el máximo esfuerzo principal (σ_I). Además, es crucial verificar que el esfuerzo de compresión esté dentro de la resistencia del material, por lo tanto, se analiza el mínimo esfuerzo principal (σ_{III}). Asimismo, se evalúa el desplazamiento lateral máximo ($\delta_{x\ max}$), para garantizar que el muro mantenga las deformaciones admisibles. El resumen de los valores obtenidos para estos criterios se muestra en la Tabla 2, mostrando que todas las geometrías propuestas desarrollan esfuerzos admisibles bajo la condición de carga evaluada.

Organiza:

Geometría	Volumen (m ³)	Masa (kg)	σ_y (Pa)	σ_I (Pa)	σ_{III} (Pa)	$\delta_{x \max}$ (m)
Sólido	0.352	932.8	1.84E+05	2.01E+05	-2.01E+05	8.06E-04
Cuadrilátero	0.14146	374.87	1.18E+06	1.26E+06	-1.26E+06	4.51E-03
Triángulos	0.19137	507.12	1.04E+06	1.15E+06	-1.14E+06	2.37E-03
Hexágonos	0.13904	368.46	6.51E+05	6.77E+05	-6.83E+05	3.77E-03
Optimizado	0.15608	413.6	4.87E+05	5.26E+05	-5.20E+05	1.50E-03

Tabla 2 – Propiedades de las geometrías evaluadas.

Una forma de cuantificar el cambio de cada uno de estos parámetros (Par_i) respecto al volumen inicial (Par_o) es mediante el indicador J , que normaliza los valores en función del máximo registrado en el volumen inicial, según se muestra en la Ecuación 2:

$$J_i = \frac{Par_i}{Par_o} \quad (2)$$

En la Figura 4 se presenta el indicador J para cada uno de los parámetros y geometrías analizadas. Los resultados demuestran que, como era de esperarse, la reducción del volumen inicial conlleva un incremento en los esfuerzos y deformaciones debido a la disminución del material disponible para resistir las cargas aplicadas. Sin embargo, esta diferencia es significativamente mayor en las geometrías con patrones regulares en comparación con la geometría optimizada.

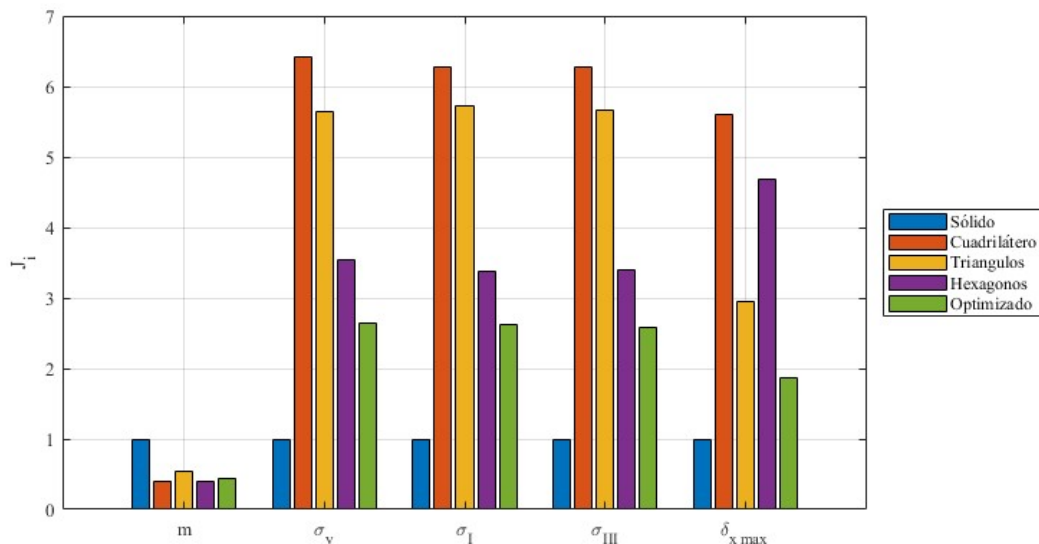


Figura 4. Desempeño de cada geometría respecto al volumen inicial.

Organiza:

4. Conclusiones

La combinación de técnicas de optimización topológica e impresión 3D representa una estrategia prometedora para el diseño y construcción de elementos estructurales más eficientes y livianos. Los resultados del proceso de optimización muestran que es posible reducir el material hasta en un 50% sin superar los esfuerzos y deformaciones admisibles. Para todos los parámetros evaluados, la geometría optimizada es la que presenta la menor disminución en el desempeño, lo que subraya la eficacia del proceso de optimización topológica para conservar la rigidez lateral y minimizar los puntos de concentración de esfuerzos en el muro optimizado. Por lo tanto, aunque todas las geometrías experimentan aumentos en esfuerzos y deformaciones con la reducción de volumen, la geometría optimizada destaca por su capacidad para mantener una mayor integridad estructural y eficiencia bajo las condiciones de carga evaluadas.

Es así que, los elementos estructurales optimizados pueden lograr un desempeño estructural comparable al de los elementos planos, utilizando un volumen significativamente inferior. Esto no solo resulta en un uso más eficiente de los materiales, sino que también implica una reducción en los costos de construcción y en el impacto ambiental asociado con la producción y transporte de materiales. La eficiencia en el uso de materiales sin comprometer la seguridad estructural es un avance significativo en la construcción sostenible.

Organiza:

Agradecimientos:

Los autores, miembros del Grupo RISK y Grupo Biomecánica, agradecen al proyecto “Desarrollo de un sistema de impresión 3D de materiales no convencionales sostenibles para el avance de la infraestructura rural del departamento del Cauca” de la Universidad del Valle, financiado a través de la convocatoria 6 del bienio 2021-2022 del Sistema General de Regalías (SGR) (BPIN 2020000100625).

Referencias:

- [1] Bendsøe, M. P., y Kikuchi, N. (1988). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 71 (2), 197–224
- [2] Sigmund, O., y Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48 (6), 1031–1055.
- [3] Jipa, A., Bernhard, M., Meibodi, M., y Dillenburger, B. (2016). 3d-printed stay-in-place formwork for topologically optimized concrete slabs. En *Proceedings of 19 the 2016 tx emerging design+ technology conference* (pp. 97–107). doi: 10.3929/ ethz-b-000237082
- [4] Hansemann, G., Schmid, R., Holzinger, C., Tapley, J., Kim, H. H., Sliskovic, V., . . . Peters, S. (2020). Additive fabrication of concrete elements by robots: lightweight concrete ceiling. *FABRICATE 2020: making resilient architecture*, 124–129.
- [5] Burger, J., Huber, T., Lloret-Fritschi, E., Mata-Falcón, J., Gramazio, F., y Kohler, M. (2022). Design and fabrication of optimised ribbed concrete floor slabs using large scale 3d printed formwork. *Automation in Construction*, 144 , 104599. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104599
- [6] Alabbasi, M., Agkathidis, A., y Chen, H. (2023). Robotic 3d printing of concrete building components for residential buildings in saudi arabia. *Automation in Construction*, 148 , 104751. doi: 10.1016/j.autcon.2023.104751

Organiza:



[7] Kumar, P. (2022). Topology optimization of stiff structures under self-weight for given volume using a smooth heaviside function. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65 (4), 128.

[8] Briels, D., Kollmannsberger, S., Leithner, F., Matthäus, C., Nouman, A. S., Oztoprak, O., y Rank, E. (2022). Thermal optimization of additively manufactured lightweight concrete wall elements with internal cellular structure through simulations and measurements. *Buildings*, 12 (7), 1023.

[9] Vantighem, G., Corte, W. D., Steeman, M., y Boel, V. (2019, 12). Density-based topology optimization for 3d-printable building structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60 , 2391-2403. doi: 10.1007/s00158-019-02330-7

Organiza:



Tel/Fax: [+54] 11 5252.8838 | Whatsapp: [+54 9] 11 3180.3746 | Hipólito Yrigoyen 1144 Piso 1° - Of. 2 | Buenos Aires
Horario de atención: de lunes a viernes de 13:00 a 18:00 hs. | Mail: info@jornadasaie.org.ar - www.jornadasaie.org.ar