

Diseño basado en desempeño de una estructura modular impresa en 3D con material no-convencional

Castro, Lina^a; Gómez, Daniel^b; García, José Jaime^c

^a Ingeniera civil, estudiante de maestría, ^b Ingeniero civil, PhD, ^c Ingeniero mecánico, PhD
Universidad del Valle.

lina.maria.castro@correounivalle.edu.co

RESUMEN

La impresión 3D es una tecnología que convierte archivos digitales en físicos mediante la superposición de capas de material. La aplicación de esta técnica a estructuras modulares utilizando materiales no-convencionales plantea problemas de diseño, especialmente en zonas de amenaza sísmica alta. Esta investigación se centró en proponer un sistema estructural modular, así como la metodología para su diseño basada en desempeño. Así mismo, se evaluó numéricamente la respuesta estructural de una tipología impresa sometida a cargas gravitacionales y sísmicas. El análisis de la estructura se realizó utilizando métodos de análisis lineales y no lineales. Adicionalmente, se calcularon los espectros uniformes de amenaza para Timbío, Cauca - Colombia, con sismos de períodos de retorno de 45, 75, 475 y 970 años. Los resultados preliminares han demostrado que los sismos con períodos de retorno igual o superior a 475 años pueden provocar daños a los módulos impresos. Por tanto, es necesario evaluar estrategias que mejoren las respuestas de los módulos para garantizar el cumplimiento de las resistencias máximas del material.

ABSTRACT

3D printing is a technology that converts digital files into physical ones by superimposing layers of material. Applying this technique to modular structures using non-conventional materials poses design problems, especially in high seismic hazard zones. This research focused on proposing a modular structural system and its design using the performance-based design methodology. Likewise, the structural response of a printed typology subjected to gravity and seismic loads was numerically evaluated. The analysis of the structure was performed using linear and nonlinear analysis methods. Likewise, uniform hazard spectra were calculated for Timbío, Cauca - Colombia, for earthquakes with return periods of 45, 75, 475, and 970 years. The results of the preliminary analyses have shown that earthquakes with return periods equal to or greater than 475 years may cause damage to printed modules. Therefore, there is a need to evaluate strategies to improve the responses of the modules to ensure compliance with the maximum material strengths.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D, también conocida como manufactura aditiva, está cambiando la manera como se construyen estructuras civiles (Buswell et al., 2018). Esta tecnología permite la elaboración de objetos tridimensionales a partir de modelos digitales mediante la adición de capas sucesivas de material (Xiao et al., 2022). A diferencia de los métodos tradicionales de construcción, la impresión 3D ofrece una mayor libertad de diseño, reducción de desperdicios y la capacidad de crear estructuras complejas que serían muy costosas de fabricar utilizando técnicas convencionales (Kanyilmaz et al., 2022). Además, permite mayor automatización en el proceso de construcción, lo que reduce la dependencia de la mano de obra y mejora la seguridad en el lugar de trabajo (Pollák et al., 2018).

En el ámbito de los sistemas modulares, la impresión 3D ha demostrado ser particularmente prometedora. Los sistemas modulares se caracterizan por la capacidad de ensamblar componentes individuales en configuraciones diversas para crear estructuras más grandes y funcionales (Mark et al., 2021). Los módulos impresos brindan agilidad en procesos de construcción, mejoran la calidad arquitectónica y promueven la sostenibilidad (Mark et al., 2021). Sin embargo, la implementación exitosa de un sistema de construcción modular depende del diseño de los componentes que lo conforman. Varios investigadores han explorado métodos para crear sistemas modulares impresos. La automatizando de cada pieza mediante fresado CNC (Baghdadi et al., 2023) y corte de elementos con métodos robotizados (Baghdadi et al., 2023). Sin embargo, estas alternativas no abordan eficazmente la generación de residuos, requieren mucho tiempo en superficies detalladas y son costosas (Tosic et al., 2022).

El diseño y análisis de estructuras impresas en 3D representan un enfoque nuevo en la investigación de esta tecnología. La capacidad de imprimir estructuras con geometrías complejas y propiedades específicas ha llevado a múltiples interrogantes en la ingeniería. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se han centrado en materiales convencionales como concreto y metales (DeJong and Vibert, 2012). La exploración de materiales no convencionales para impresión 3D es un área de estudio que podría ofrecer soluciones novedosas y sostenibles para diversas aplicaciones (Giudice and Vassiliou 2020). El análisis de desempeño de estas estructuras es importante para entender sus propiedades mecánicas y su viabilidad en aplicaciones reales.

Este trabajo se enfoca en el diseño preliminar utilizando la metodología de desempeño de una estructura modular impresa en 3D con materiales no convencionales. Por tanto, este proyecto busca reducir el consumo de materiales altamente contaminantes, como el cemento, incorporando materiales compuestos de suelo procedente del mismo sitio de la obra. La innovación de esta investigación radica en la exploración de nuevos materiales y el diseño y análisis estructural aplicado en estructuras modulares impresas, con el objetivo de mejorar el desempeño y la sostenibilidad de estas. Este estudio busca contribuir al avance de la tecnología de

Organiza:

impresión 3D, ofreciendo nuevas perspectivas y soluciones que puedan ser aplicadas en el futuro a la ingeniería estructural.

METODOLOGÍA

Ubicación de la estructura

El diseño de la estructura impresa en 3D está planeado para ser construido en el área rural del municipio del Cauca. Este departamento, está situado en el suroccidente de Colombia, abarca el 2.56% del total del territorio nacional. El 62.72% de su población vive en zonas rurales y centros poblados, mientras que el 37.28% reside en las cabeceras municipales (Gobernación, 2019). La mayoría de las viviendas en el Cauca son construidas con materias primas locales. La Figura 1 muestra la distribución de los materiales en muros y pisos.

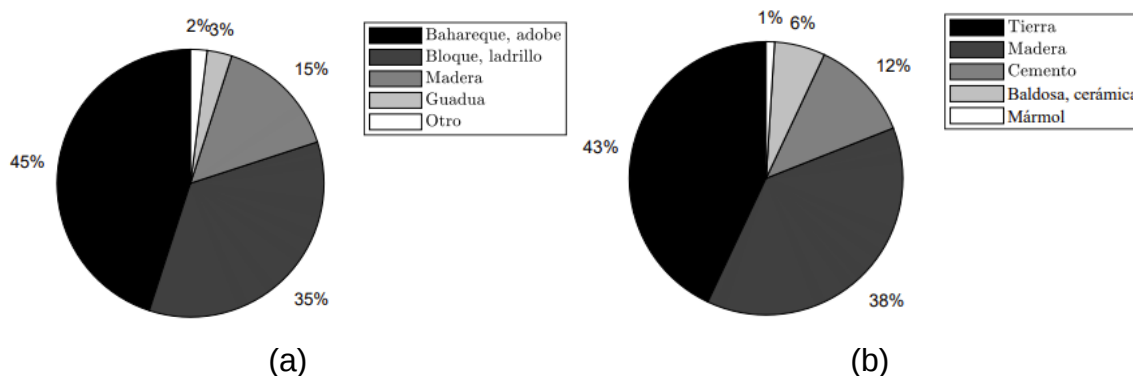


Figura 1. Tipos de materiales predominantes en (a) muros y (b) pisos de viviendas rurales en el Cauca, Colombia.

El departamento del Cauca está dividido en siete subregiones, cada una cuenta con gran diversidad étnica y cultural, que albergan diversos grupos de población indígena y raizal (DANE, 2016). Este trabajo se ubicó en el municipio de Timbío, localizado en la subregión centro. El lugar se encuentra en una zona de alta amenaza sísmica debido a la geología del sector, que está atravesado por numerosas fallas. Entre estas fallas se destacan las de Popayán, Palmira y Romeral, resultado de millones de años de actividad tectónica. Es importante mencionar que, a lo largo de la historia, el Cauca ha experimentado sismos significativos. Por ejemplo, en 1983 se registró el sismo de Popayán con magnitud de 6.8 MW, que causó la pérdida de 300 vidas humanas y dejó sin hogar a miles de personas.

Organiza:

Definición de la amenaza sísmica del sitio seleccionado y obtención de sismos de diseño

Para definir la amenaza sísmica del lugar se obtuvieron los datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2018). A partir de esta información se realizó la curva de amenaza que se ilustra en la Figura 2, la cual representa la probabilidad de que ocurran diferentes niveles de intensidad sísmica durante periodos de tiempo determinados.

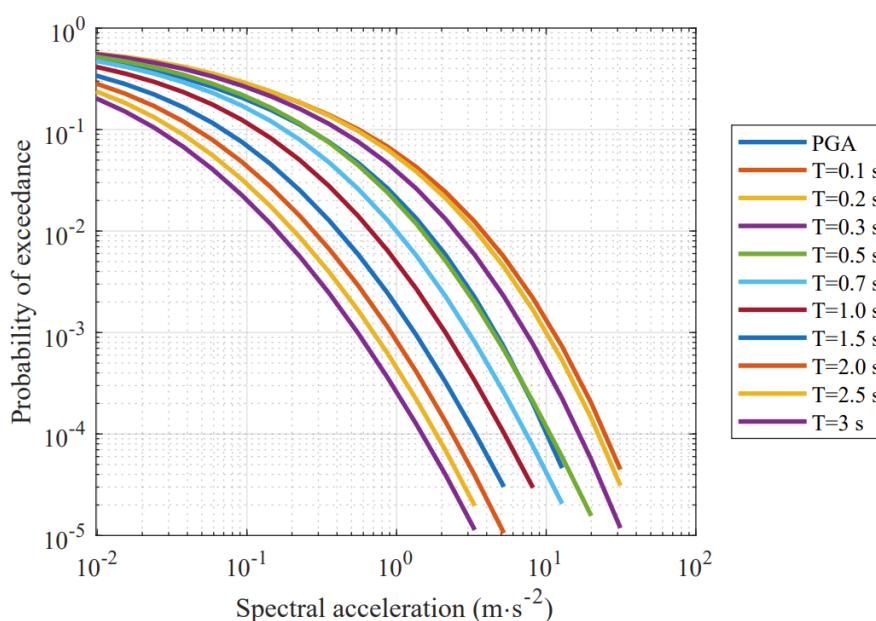


Figura 2. Curva de amenaza sísmica para Timbío – Cauca, Colombia.

Luego, se calcularon los espectros uniformes de amenaza que se muestran en la Figura 3 en donde se muestra la aceleración máxima esperada en la estructura ante distintos periodos de vibración. Los espectros se calcularon para cuatro periodos de retorno 45, 75, 475 y 970 años.

Organiza:

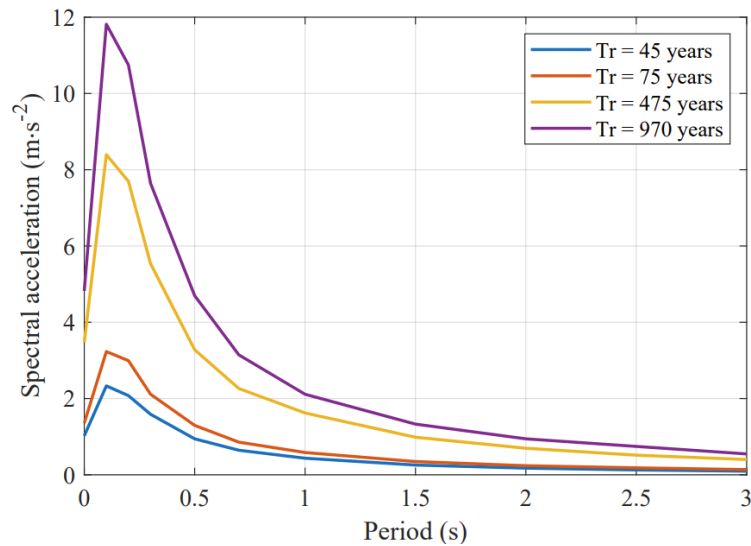


Figura 3. Espectros uniformes de amenaza para Timbío – Cauca, Colombia.

La base de la estructura se sometió a sismos obtenidos a partir de registros históricos. La amplificación de la señal sísmica se realizó mediante ajustes iterativos en el espectro de Fourier de la señal original, hasta lograr la concordancia con el espectro objetivo. Es importante mencionar que este proceso es completamente independiente del modelo, ya que representa una entrada. La metodología para la amplificación de la señal sigue un enfoque similar al propuesto por Ferreira et al. (2020). La Figura 4 muestra la señal original y escalada del sismo ocurrido en el Cauca en el año 2003.

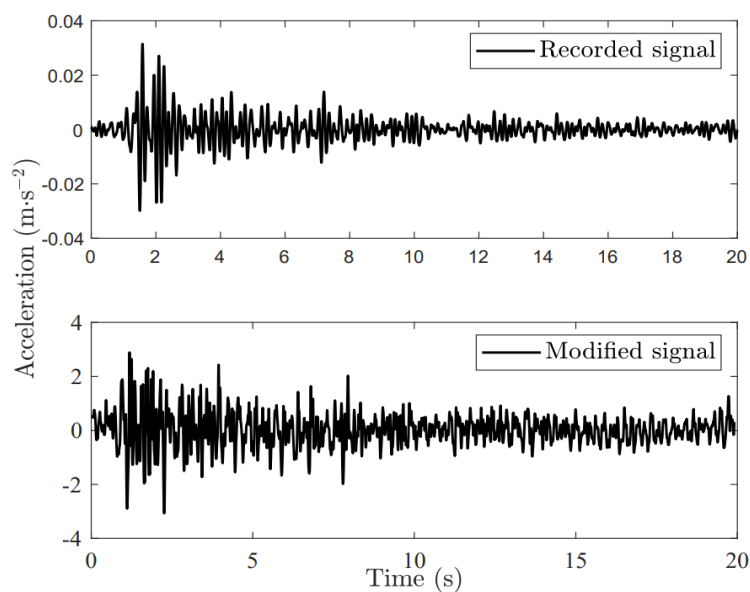


Figura 4. Señal sísmica escalada a 475 años.

Organiza:

Así mismo, en la Figura 5 se muestran los espectros de respuesta escalados para diferentes niveles de intensidad sísmica. La iteración fue realizada garantizando que la respuesta alcanzara al menos el 80% del espectro objetivo.

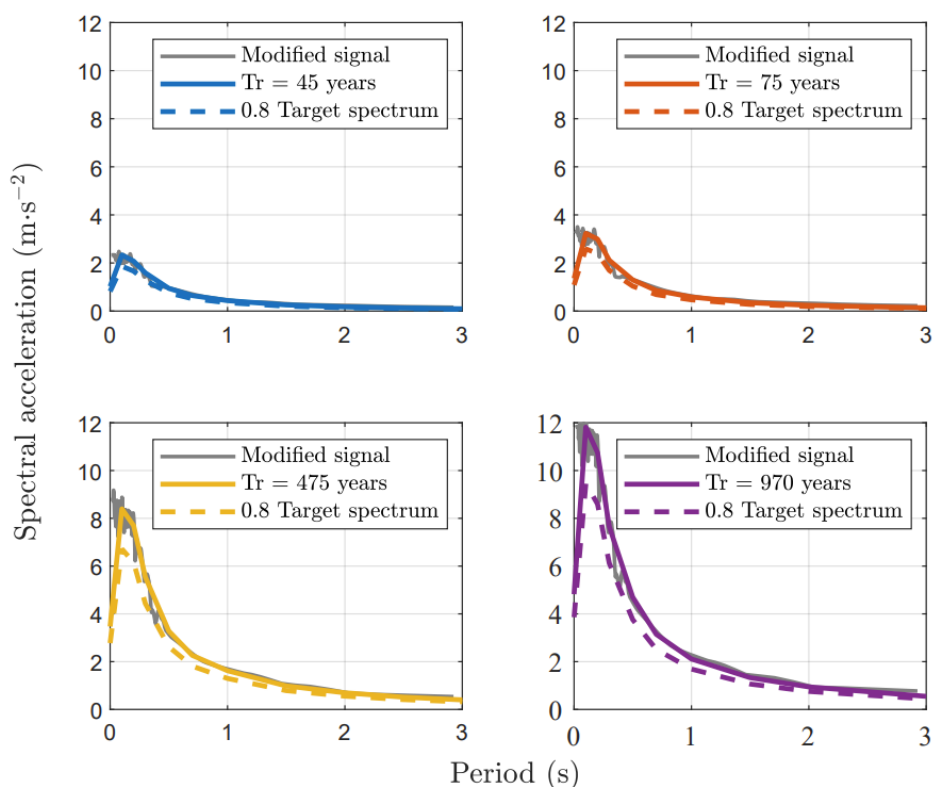


Figura 5. Registros sísmicos escalados a diferentes niveles de intensidades.

Sistema modular impreso en 3D propuesto

Tipología impresa en 3D

Esta investigación se enfocó en una tipología propuesta por el equipo de arquitectura del proyecto impresión 3D de la Universidad del Valle. La estructura está diseñada para impactar positivamente la calidad de vida de la población, respetando y manteniendo las costumbres y tradiciones mientras incorpora una tecnología nueva. La Figura 6 muestra la tipología analizada en este trabajo.

Organiza:



Figura 6. Tipología arquitectónica impresa en 3D. (Grupo de arquitectura Universidad del Valle)

Sistema estructural

El sistema estructural de esta tipología se conformó por paneles impresos en 3D con dimensiones de 0.6 y 0.8 m de longitud 0.2 m de ancho y 2.2 m de alto. Estos paneles tienen una celosía interna con forma triangular como se muestra en la Figura 7(a). Las capas de material impreso tienen ancho y alto de 50 mm 20 mm respectivamente.

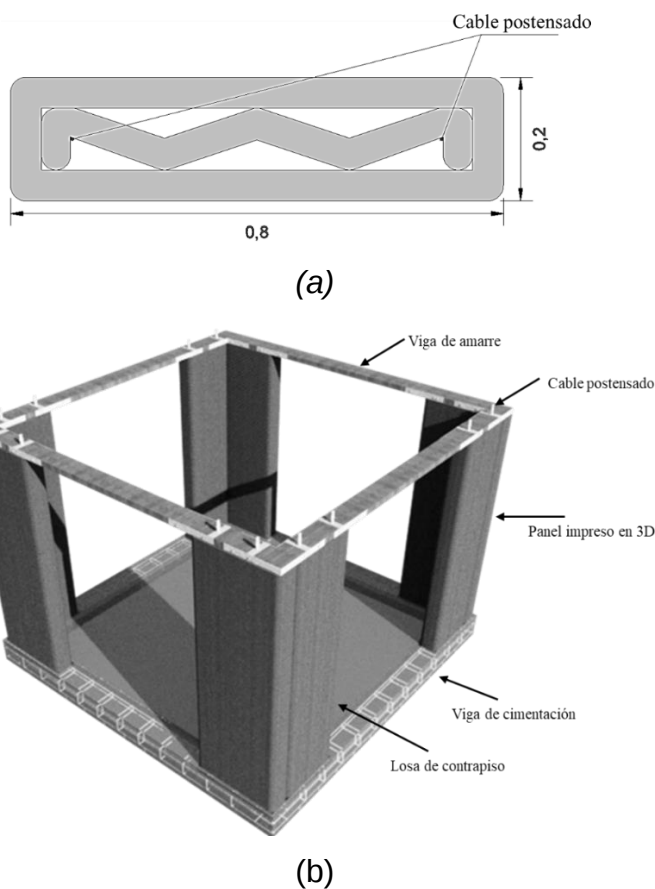


Figura 7. Sistema estructural: (a) panel impreso; (b) módulo conformado por paneles impresos postensados.

Organiza:

Cada panel se une en las esquinas formando tres configuraciones: L, T y X. Al combinar varias de estas configuraciones, se forma un módulo estructural de dimensiones 3.4 x 3.4m, como se muestra en la Figura 7(b). Para el reforzar los elementos, se utilizó un cable de 8 mm de diámetro el cual funciona como un postensado, amarrando la viga de cimentación con la viga de superior y ubicando el panel en el centro permitiendo mejor desempeño estructural. La Figura 8 ilustra la configuración completa del sistema.

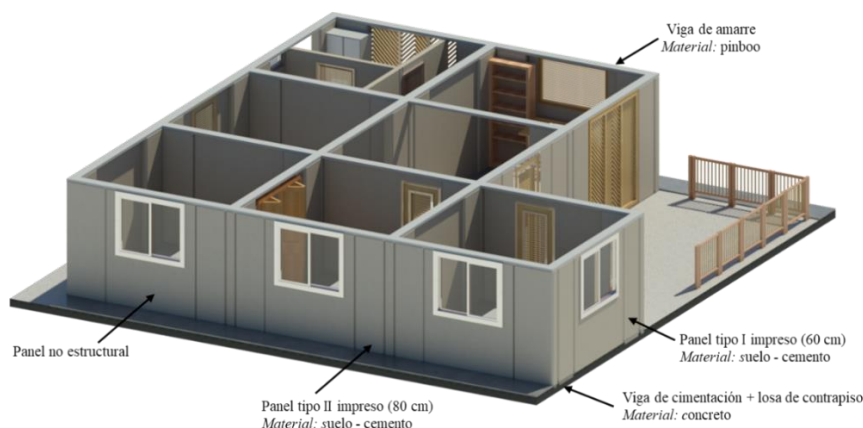


Figura 8. Sistema estructura de una tipología impresa en 3D con material no-convencional.

Modelo constitutivo para el material impreso

Con el objetivo de reducir el uso de materiales altamente contaminantes, como el cemento, este proyecto busca incorporar materiales compuestos de suelo procedente del mismo sitio de la obra. Para ello, en un estudio paralelo se determinaron experimentalmente las propiedades de este material, que se presentan en la Tabla 1. La elección de este material se basa en la accesibilidad de la materia prima localizado en el lugar seleccionado. Así mismo, buscar la conservación de la cultura y tradición en las viviendas de la zona.

Parámetro	Suelo-Cemento	Concreto
Densidad ($kg \cdot m^{-3}$)	2620	2400
Módulo de elasticidad (MPa)	565	17872
Relación de Poisson	0.25	0.2
Esfuerzo de compresión máximo (MPa)	18.3	
Esfuerzo de tracción máximo (MPa)	1.8	

Tabla 1 – Propiedades mecánicas del suelo-cemento y el concreto.

Organiza:

El material presenta un comportamiento no lineal frágil que puede describirse mediante el modelo de plasticidad de daño representado en la Figura 9. Los parámetros del modelo fueron tomados de los datos experimentales del suelo-cemento evaluados en el laboratorio.

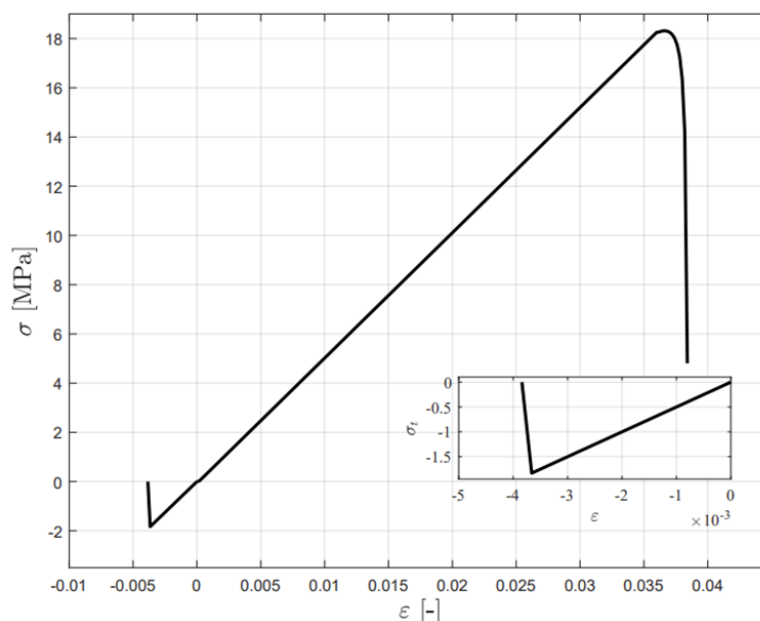


Figura 9. Modelo constitutivo del suelo-cemento impreso en 3D.

Modelado numérico

Se desarrolló un modelo numérico utilizando el software de elementos finitos Abaqus. El modelo comprende los paneles estructurales que conformaban las cuatro esquinas del módulo, en la base se ubica una viga de cimentación y en la parte superior se colocó una viga de amarre de pinboo. Esta última corresponde a una viga construida a partir de latas de guadua unidas mediante pines del mismo material. Para discretizar los paneles se usó una malla de elementos hexaédricos de ocho nodos. Así mismo, con el fin de garantizar la precisión de la simulación se realizó un análisis de convergencia. Con base en este análisis se seleccionó una malla de 57462, 73180, 1242 elementos, correspondientes al panel, cable y viga respectivamente.

Análisis sísmico

Para el sitio seleccionado, los sismos tienen la probabilidad de ocurrir a diferentes magnitudes y profundidades. En este sentido, la respuesta de las estructuras ante dicha amenaza debe ser adecuada para preservar la vida y los bienes de las personas.

Organiza:

Análisis modal

Se realizó un análisis modal el cual consistió en determinar las frecuencias y modos de vibración tanto del panel como del módulo completo. Los modos y frecuencias de vibración representan las propiedades dinámicas de la estructura, que se determinaron a partir de este procedimiento. Para calcular las frecuencias naturales del modelo y las formas modales de vibración se utilizó el algoritmo Lanczos, disponible en las librerías de Abaqus (ABAQUS et al., 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Análisis del panel impreso con tensión en los cables y fuerza horizontal

Se realizó un análisis inicial para asegurar la integridad estructural del muro bajo condiciones de tensionamiento de los cables y aplicación de carga vertical y horizontal. La carga horizontal corresponde a 750 kg que representa la fuerza aproximada que puede recibir lateralmente el muro solo. La carga vertical fue 400 kg que representa el peso que debe resistir de cubierta. La Figura 10 muestra el muro de 0.8 m sometido a las condiciones descritas, el cual registró un esfuerzo de 0.12 MPa con el tensionamiento de los cables y de 0.15 MPa con la tensión de los cables más la fuerza horizontal y vertical. Así mismo, el cable alcanza un esfuerzo de 373 MPa al tensionarse, y cuando se aplica la fuerza horizontal y vertical, este esfuerzo disminuye a 366 MPa.

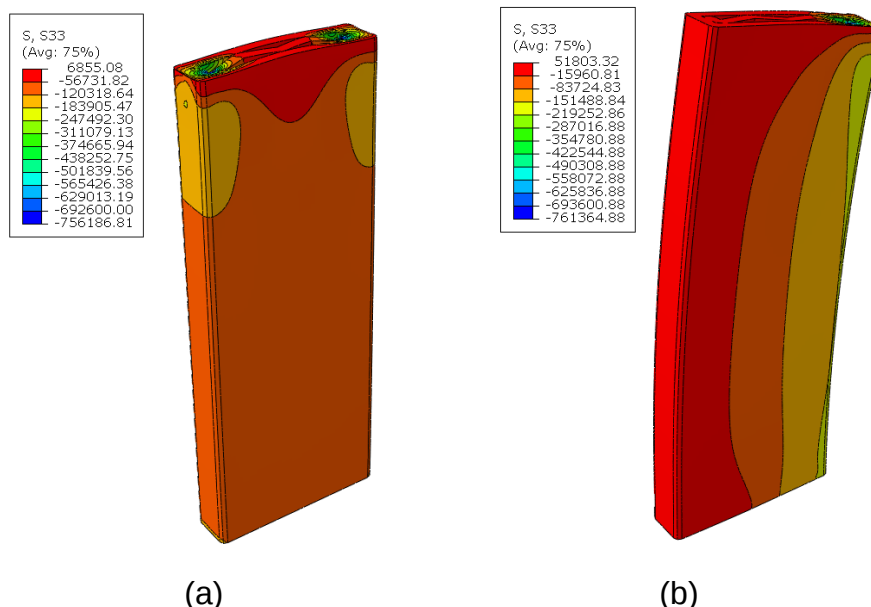


Figura 10. Simulación numérica de (a) panel con dos cables tensionados y (b) fuerza horizontal de 750 kg aplicada en la parte superior del elemento.

Organiza:

Análisis de la estructura modular impresa sometida a carga estática

Ante carga estática (Figura 11) los esfuerzos de tracción máximos alcanzan 8.6 MPa, concentrándose en las esquinas y superando la resistencia a tracción del material (1.8 MPa). Sin embargo, la integridad general de los paneles se mantiene debido a que el esfuerzo de tracción máximo es solo el 23% de la resistencia máxima de tracción del suelo-cemento en el panel general.

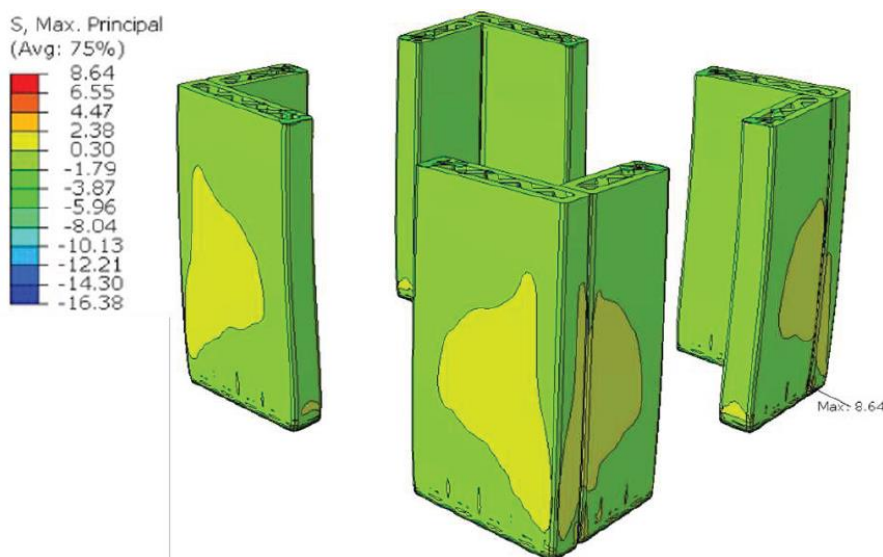


Figura 11. Distribución de esfuerzos de tracción en el módulo sometido a peso propio.

Análisis sísmico

En esta investigación se realizó un análisis sísmico de un módulo construido mediante impresión 3D. Este análisis está desarrollado para el rango lineal el cual entregó resultados rápidos y coherentes con la carga sísmica aplicada.

Análisis modal

Se realizó un análisis modal para el panel impreso. El resultado para los tres primeros modos de vibración con frecuencias va desde 3.55 Hz a 16.21 Hz las cuales se muestran en la Figura 12. Las formas modales del panel corresponden a la flexión Figura 12(a) (b) y torsión Figura 12(c).

Organiza:

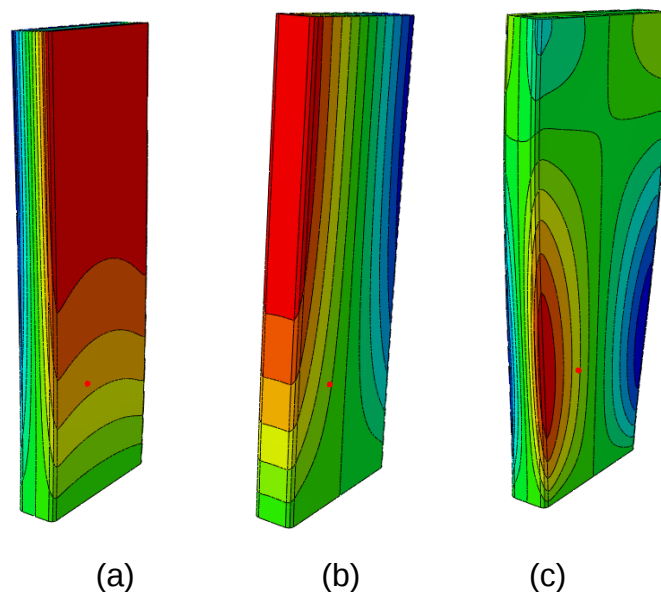


Figura 12. Formas modales y frecuencias de vibración de (a) 3.55 Hz, (b) 12.37 Hz, (c) 16.21 Hz.

De igual manera, se evaluaron las tres primeras formas modales del módulo completo obteniendo frecuencias que oscilan entre 0.38 Hz a 0.53 Hz. Los modos corresponden a la flexión lateral del módulo al largo de las dos direcciones (Figura 13 a y b). El tercer modo está asociado a la deformación torsional (Figura 13c).

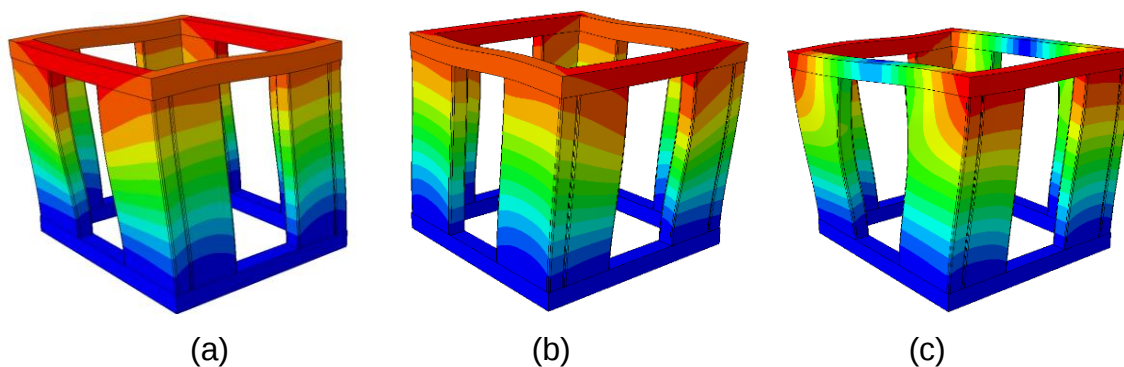


Figura 13. Formas modales y frecuencias de vibración de (a) 0.38 Hz, (b) 0.42 Hz, (c) 0.53 Hz.

Organiza:

Análisis cronológico

Se realizó un análisis con integración paso a paso en el tiempo considerando tres niveles de intensidad, derivados del proceso de escalamiento de la señal sísmica. La Figura 14 muestra la distribución de los esfuerzos de tracción obtenidos durante las simulaciones para el sismo con un período de retorno de 475 años. Es importante destacar que los esfuerzos tracción máximos se concentran en los bordes de los paneles. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de la simulación del módulo completo, utilizando tres sismos de diseño escalados a 45, 75 y 475 años. Para los dos primeros sismos, los paneles no superan la resistencia del material. Sin embargo, para el sismo con período de retorno de 475 años, los esfuerzos de tracción alcanzan los 14.24 MPa.

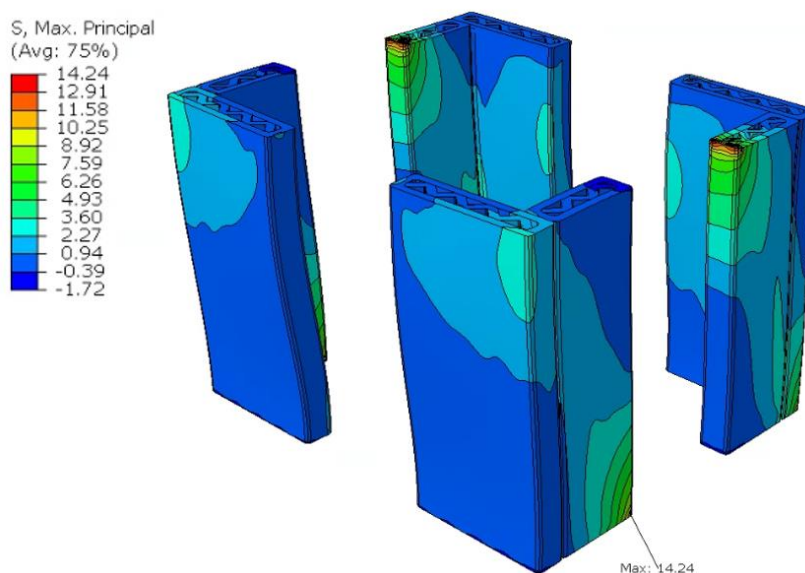


Figura 14. Distribución de esfuerzos de tracción en el módulo sometido a sismo de 475 años.

Periodo de retorno	Esfuerzo de tracción (MPa)	% esfuerzo de tracción máximo
45	0.9	68
75	1.3	98
475	14.2	1076

Tabla 2 – Máximos esfuerzos de tracción obtenidos en el módulo sometido a sismos con diferentes niveles de intensidad.

Organiza:

CONCLUSIONES

En esta investigación se realizó una primera aproximación al comportamiento sísmico de una estructura modular impresa en 3D con materiales no convencionales. Se diseñó preliminarmente una estructura utilizando materias primas del lugar de construcción, lo que ayuda a mitigar el impacto ambiental asociado al uso del concreto. Se emplearon metodologías basadas en análisis cronológico y en análisis modal para obtener la respuesta sísmica del módulo impreso. Además, se calcularon los espectros uniformes de amenaza para diferentes intensidades, proporcionando información acerca del riesgo sísmico del sitio seleccionado. Los resultados mostraron que los sismos con un periodo de retorno de 475 años tienen la capacidad de generar daño en los paneles. Así mismo, se menciona que el análisis del módulo completo mejora el comportamiento estructural de los muros, en comparación con los paneles analizados individualmente.

Con base en los hallazgos de esta investigación sobre el comportamiento sísmico de una estructura modular impresa, se recomienda explorar alternativas que reduzcan la concentración de esfuerzos en los bordes de los paneles. Además, se sugiere investigar opciones de conexión entre paneles con el objetivo de mejorar la capacidad del conjunto estructural para resistir tracciones y facilitar el proceso constructivo.

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).

BIBLIOGRAFÍA

ABAQUS H, et al. Abaqus standard user's manual, version 6.14. Providence, RI, USA: Dassault Systems 2014.

Baghdadi A, Heristchian M, Ledderose L, Kloft H. Experimental and numerical assessments of new concrete dry connections concerning potentials of the robotic subtractive manufacturing technique. Buildings 2023;13. doi:10.3390/buildings13010210.113

Buswell RA, de Silva WRL, Jones SZ, Dirrenberger J. 3d printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research 2018; 112:37– 49. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.

Organiza:



DANE. National agricultural census (2014). housing and socio-demographic characteristics of the population residing in the dispersed rural area censused. 2016. URL: www.dane.gov.co.

DeJong MJ, Vibert C. Seismic response of stone masonry spires: Computational and experimental modeling. Engineering Structures 2012; 40:566 – 74. doi:10.1016/j.engstruct.2012.03.001.122

Ferreira F, Moutinho C, Álvaro Cunha, Caetano E. An artificial accelerogram generator code written in Matlab. Engineering Reports 2020;2. doi:10.1002/eng2.12129.125

Giudice LD, Vassiliou MF. Mechanical properties of 3d printed material with binder jet technology and potential applications of additive manufacturing in seismic testing of structures. Additive Manufacturing 2020; 36. doi: 10.1016/j.addma.2020.101714.129

Gobernación. Profile of the department of Cauca 2019; 1–14 URL: www.cauca.gov.co.

Kanyilmaz A, Demir AG, Chierici M, Berto F, Gardner L, Kandukuri SY, Kassabian P, Kinoshita T, Laurenti A, Paoletti I, du Plessis A, Razavi SMJ. Role of metal 3d printing to increase quality and resource-efficiency in the construction134 sector. 2022. doi: 10.1016/j.addma.2021.102541

Mark P, Lanza G, Lordick D, Albers A, Konig M, Borrmann A, Stempniewski L, Forman P, Frey AM, Renz R, Manny A, Stindt J. Industrializing precast productions. Civil Engineering Design 2021; 3:87– 98. doi:10.1002/cend.202100019.

Pollák M, Torok J, Zajac J, Kocisko M, Telisková M. The structural design of 3d print head and execution of printing via the robotic arm abb irb 140. In:141 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications142 (ICIEA). IEEE; 2018. p. 194 – 8.143

SGC. Sistema de consulta de la amenaza sísmica de Colombia resultados de desagregación de amenaza en roca para cabeceras municipales. 2018. URL: <https://amenazasismica.sgc.gov.co/map/disaggregation/#13/2.3408/-76.6718>

Tosic Z, Eichenauer MF, Ivaniuk E, Lordick D, Krasic S, Mechtcherine V. Design and optimization of free-form surfaces for modular concrete 3d printing. Automation in Construction 2022;141. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104432.150

Xiao B, Chen C, Yin X. Recent advancements of robotics in construction. Automation in Construction 2022;144. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104591

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