

DISEÑO Y ANÁLISIS MECÁNICO MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTO FINITO DE UNA IMPRESORA 3D PARA EL VACIADO DE CONCRETO DE BAJO REVENIMIENTO MEDIANTE TORNILLO SINFÍN

Mechanical design and analysis using the finite element method of a 3D printer for low slump concrete pouring using a screw conveyor

LOZANO PERALES, Julián Fernando

GÓMEZ CASAS, Josué

CASTRO SOLÍS, Luis Everardo

RODRÍGUEZ ÁVILA, Jafeth

OBREGÓN FLORES, Jonathan
Sebastián

GUERRA BRAVO, Esteban

RESUMEN

El concreto poroso ha emergido como una alternativa para la reducción de escurrimiento superficial y aumenta la permeabilidad de agua en aplicaciones de tecnología azul-verde. Sin embargo, este tipo de concreto se caracteriza por la ausencia de agregados finos, generando vacíos en su estructura, lo que permite el paso del agua, manteniendo las propiedades mecánicas adecuadas en el uso de tránsito ligero. Cabe destacar que el concreto poroso tiene revenimiento cero y carece de trabajabilidad, lo cual representa una problemática al ser vaciado con métodos tradicionales con bombas como el concreto convencional debido a que prácticamente no tiene fluidez, lo que lo convierte en un material de difícil manejo. La propuesta de esta investigación se centra en el diseño de una impresora de concreto con tres grados de libertad utilizando un tornillo sinfín y una artesa para transportar el concreto poroso. El diseño del elemento extrusor de una máquina impresora de concreto poroso fue validado mediante un software de método de elemento finito y a través de las ecuaciones de von Mises a flexión y complementadas con el análisis de mecánica de materiales. Las simulaciones permitieron determinar de las cargas, los esfuerzos, las deflexiones y el factor de seguridad del extrusor en la impresora. Los resultados del método de elemento finito son congruentes con los de mecánica de materiales, rango de esfuerzo de 0 a 24 MPa, deformación de 0.2 mm y factor de seguridad mayor a 1.

Palabras clave: concreto; bajo revenimiento; tornillo sinfín; máquina impresora; análisis mecánico.

Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de
Coahuila, Arteaga, Coahuila
México.

Correspondencia:
jogomezc@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-1136-3187>
Fecha de recepción
6 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de enero de 2026.

ABSTRACT

Porous concrete has emerged as an alternative for reducing surface runoff and increasing water permeability in blue-green technology applications. However, this type of concrete is characterized by the absence of fine aggregates, creating voids in its structure that allow water to pass through while maintaining adequate mechanical properties for light traffic applications. It is important to note that porous concrete has zero slump and lacks workability, which presents a problem when poured using traditional methods with pumps, such as conventional concrete, because it has virtually no fluidity, making it a difficult material to handle. This research focuses on the design of a concrete printer with three degrees of freedom using a screw conveyor and a trough to transport the porous concrete. The design of the extruder element of a porous concrete printer was validated using finite element method software and through von Mises equations for flexure, complemented by a materials mechanics analysis. The simulations allowed us to determine the loads, stresses, deflections, and safety factor of the extruder in the printer. The results of the finite element method are consistent with those of mechanics of materials, with a stress range of 0 to 24 MPa, a deformation of 0.2 mm, and a safety factor greater than 1.

Keywords: concrete; low slump; screw conveyor; printing machine; mechanical análisis.

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D de concreto ha progresado como una opción para industrializar la construcción mediante extrusión capa por capa, con impactos en costos y tiempo. En años recientes se han logrado avances en el control de la trayectoria y la deposición a gran escala (Ahmed y col., 2023; Yang y col., 2024). Se han identificado condiciones que influyen en la resistencia y durabilidad, tales como el flujo sin obstrucciones, la capacidad de soportar capas sucesivas, la conservación de la forma, la fluidez en estado fresco, la unión entre capas y el diseño de la boquilla (Rahman y col., 2024; Si y col., 2025).

Aunque la industria ha buscado adaptar concretos convencionales a la impresión con concreto, estas soluciones se orientan a mezclas bombeables (CEMEX, 2022; COBOD International, 2022; ASTM International, 2020). De

forma complementaria, diversos estudios han propuesto criterios de diseño para sistemas de extrusión por tornillo y han empleado el FEM para modelar tanto la estructura como el proceso de vaciado (Lugo, 2015; Chen y col., 2023; Polychronopoulos y col., 2024; Yu y col., 2024; Phung Van y col., 2023; Trieu y col., 2025; Figueroa-Díaz y col., 2019). Sin embargo, ninguno de estos avances se ha traducido en una técnica consolidada para el vaciado de concretos de bajo revenimiento, que en la práctica aún se coloca de forma manual con las limitaciones conocidas (Duarte Gutiérrez y col., 2021).

Ante esa ausencia de sistemas consolidados, algunos trabajos han explorado soluciones para concreto poroso de bajo revenimiento, combinando mortero extruido con agregado grueso como soporte durante la colocación (Lyu y col., 2023). Estos ensayos muestran que, aunque se conserva la forma y la permeabilidad, el punto crítico continúa siendo la alimentación cuando la mezcla no se puede bombear, lo que refuerza el interés en alternativas como el tornillo sinfín para dosificar y transportar sin presión hidráulica (Bákit y col., 2021).

En la actualidad, los vaciados de concreto de bajo revenimiento mediante procesos automáticos representan un desafío en el bombeo por su baja trabajabilidad y maleabilidad. Además, el concreto de bajo revenimiento se caracteriza por su consistencia rígida, fluidez muy limitada y, en el caso del concreto poroso, por la ausencia de agregado fino, lo que da lugar a una matriz discontinua con altos vacíos interconectados. Estas propiedades dificultan el transporte convencional, ya que la mezcla tiende a atascarse en tuberías y boquillas, además no se genera la presión interna suficiente para un flujo continuo.

Ante este escenario, se plantea en esta investigación la integración de un tornillo sinfín como mecanismo de transporte de material granular, el cual, permite el vaciado controlado de mezclas de bajo revenimiento y de difícil manejo, constituyendo una alternativa viable a los sistemas de bombeo convencionales. Además, el análisis mecánico de la artesa, la tolva y la estructura de soporte permite determinar las cargas y esfuerzos que enfrenta el sistema durante la operación, generando criterios objetivos para su dimensionamiento y validación.

El objetivo de este trabajo es evaluar mecánicamente una impresora equipada con tornillo sinfín para el vaciado de concreto de bajo revenimiento, aplicando mecánica de materiales y análisis por elementos finitos, con el fin

de establecer los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad en sus principales componentes.

El artículo se organiza como sigue: la Sección 2 describe los materiales y métodos; la Sección 3 resume la teoría de von Mises; la Sección 4 detalla el proceso de simulación y la Sección 5 expone las conclusiones de este trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presentan la propuesta, las características y las medidas del diseño de la máquina impresora para el vaciado de concreto de bajo revenimiento.

DISEÑO DE TORNILLO SINFÍN

Se propone el diseño de un tornillo sinfín tipo estándar con longitud de 165 cm, el cual es utilizado como transportados del material, su relación entre el diámetro del helicoide y la distancia de paso entre arandelas es de 1:1. Se plantea el diseño de una flecha de 1" (2.54 cm) y un agregado grueso máximo de 1" (2.54 cm), para evitar la obstrucción de elementos en la artesa, con un tamaño 2.5 veces mayor al agregado grueso utilizado, dando así un resultado de 15 cm del helicoide. A este diseño se le resta 1 mm para evitar fricción con la artesa, es decir, es la misma medida de paso entre arandelas y del helicoide como se observa en la Figura 1a y Figura 1b.

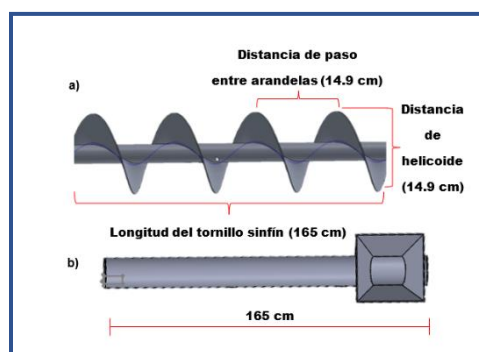


Figura 1. Tornillo sinfín y artesa, a) diseño del tornillo sinfín, b) diseño de la artesa (vista superior).

DISEÑO DE ARTESA

Al utilizar un material abrasivo como el concreto, este genera fricción entre el tornillo sinfín y la artesa, lo que provoca desgaste, dañando internamente la superficie de la artesa y contaminando la mezcla con partículas desprendidas de la artesa. Por lo tanto, se requiere

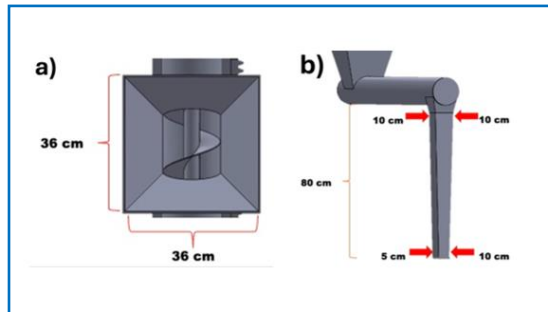


Figura 2. Diseño de la entrada y salida de la artesa, a) entrada de artesa (vista superior) b) y salida de artesa (vista frontal).

ACTUACIÓN DEL SISTEMA

Para una primera propuesta de actuación de la máquina impresora se tiene un cuerpo rectangular (50x50x80 cm), el cual tiene movimiento en los ejes "X" y "Z". Para poder cumplir con el avance lineal, se plantea un sistema de rieles que servirán como guías, mientras que una rueda de goma instalada a la flecha del motor desplazará el cuerpo del sistema por el eje "X" como se observa en la Figura 3.

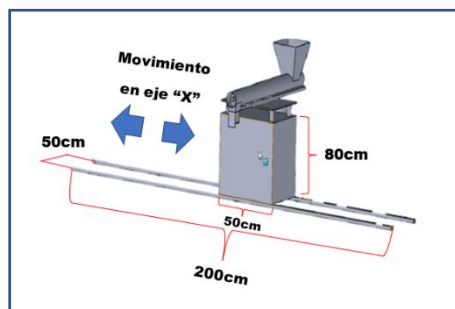


Figura 3. Sistema de movimiento en eje "X".

Siguiendo con el segundo avance, su actuación se propone por medio de un engrane recto estándar, que será acoplado a un motor en la parte superior. El engrane se fija a una placa en donde se coloca la artesa junto con el tornillo sinfín, como se visualiza en la Figura 4. De este modo, se permite el movimiento de la placa en el eje "Y" como se observa en la Figura 5.

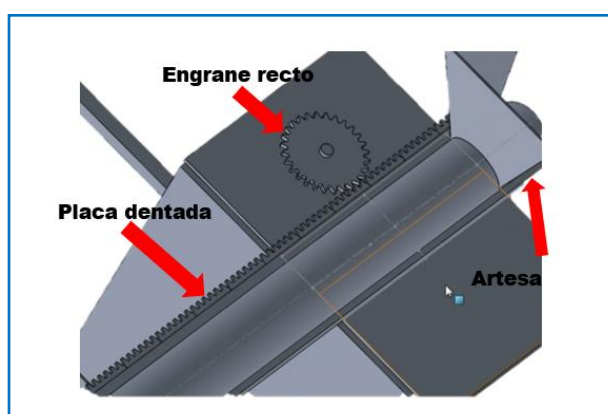


Figura 4. Sistema de engranaje.

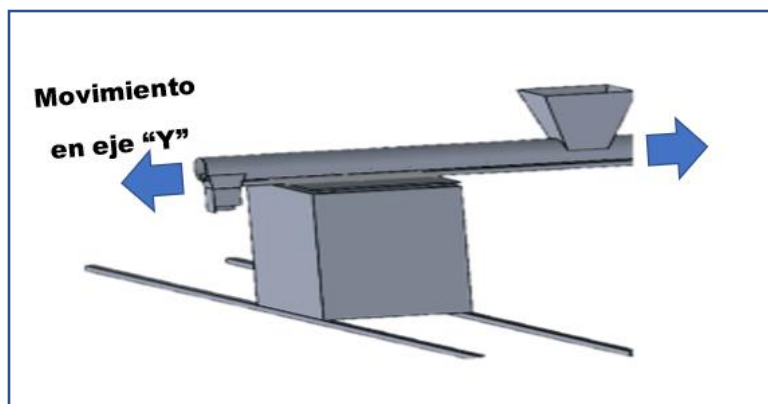


Figura 5. Sistema de movimiento en eje "Y".

Procediendo con el tercer avance, su sistema de actuación se propone mediante un motor eléctrico conectado en secuencia a un pistón que eleve la placa base, así permitiendo el desplazamiento de la placa base de forma vertical, dando la altura requerida, como se observa en las Figuras 6 y 7.

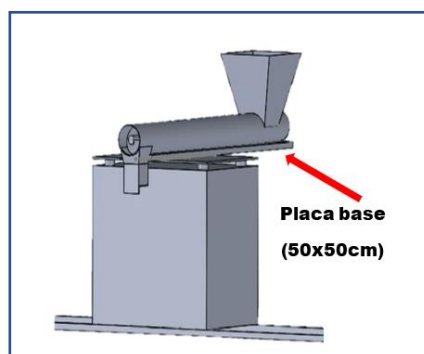


Figura 6. Punto inicial de placa base para movimiento en eje "Z".

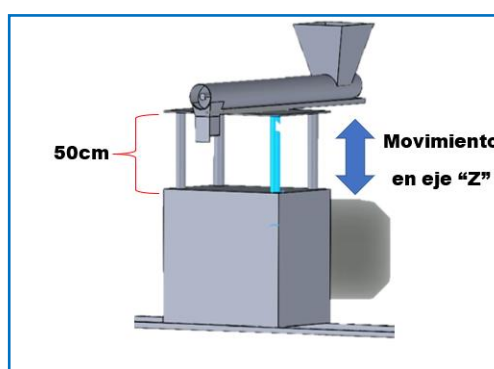


Figura 7. Punto final de placa base.

3. TEORÍA DE VON MISES

La teoría de Von Mises o criterio de energía de distorsión, se utiliza para predecir la falla plástica en materiales dúctiles. Suponiendo que la curva de esfuerzo-deformación unitaria sea esencialmente lineal hasta el punto de fluencia, entonces, se expresa la energía de deformación total por unidad de volumen en cualquier punto de ese intervalo como lo muestra la Ecuación 1.

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad 1$$

Ampliando esto a un estado de esfuerzos tridimensional, mostrado en la Ecuación 2.

$$U = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad 2$$

usando los esfuerzos σ_1, σ_2 y σ_3 y las deformaciones $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ y ε_3 principales que actúan sobre los planos de esfuerzo cortante igual a cero. Resulta conveniente en situaciones que implican esfuerzos de tensión y cortantes combinados que actúan sobre un mismo punto, definir un esfuerzo efectivo que sirva para representar la combinación de esfuerzos. El enfoque de la energía de distorsión proporciona un buen medio para hacer esto en materiales dúctiles. El esfuerzo efectivo de Von Mises σ se define como el esfuerzo de tensión uniaxial que crearía la misma energía de distorsión que la combinación real de los esfuerzos aplicados.

Este enfoque permite tratar casos de esfuerzos combinados multiaxiales de tensión y cortante, como si se debieran a una carga de tensión pura. El esfuerzo efectivo de Von Mises σ para el caso tridimensional es el utilizado por el método de elemento finito, mostrado en la Ecuación 3.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_2 - \sigma_2 \sigma_3 - \sigma_1 \sigma_3} \quad (3)$$

Esto también se expresa en términos de los esfuerzos aplicados como la Ecuación 4:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}}, \quad (4)$$

y para el caso bidimensional y considerando el factor de seguridad, partiendo de la Ecuación 3 (con $\sigma_2 = 0$), mostrada en la Ecuación 5.

$$\frac{S_y}{FS} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (5)$$

y si se expresa en términos de los esfuerzos aplicados, la Ecuación 6.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (6)$$

Se usan estos esfuerzos efectivos para cualquier situación de esfuerzos combinados. Donde se tiene flexión pura, se puede simplificar $\sigma_x = \frac{Mc}{I}$, representa la flexión a lo largo del tubo.

4. PROCESO DE SIMULACIÓN

El proceso de simulación implica un preprocesamiento que consiste en la determinación de las cargas, los apoyos, la geometría, la selección del tipo de análisis, las propiedades del material y el mallado tetraédrico. El procesamiento consiste en la simulación con los parámetros descritos. Por otra parte, el posprocesamiento consiste en una representación gráfica de los resultados. Como lo son las tensiones o esfuerzos, los desplazamientos o deflexiones, el factor de seguridad y las iso-superficies, tal como lo muestra el diagrama de la Figura 8.

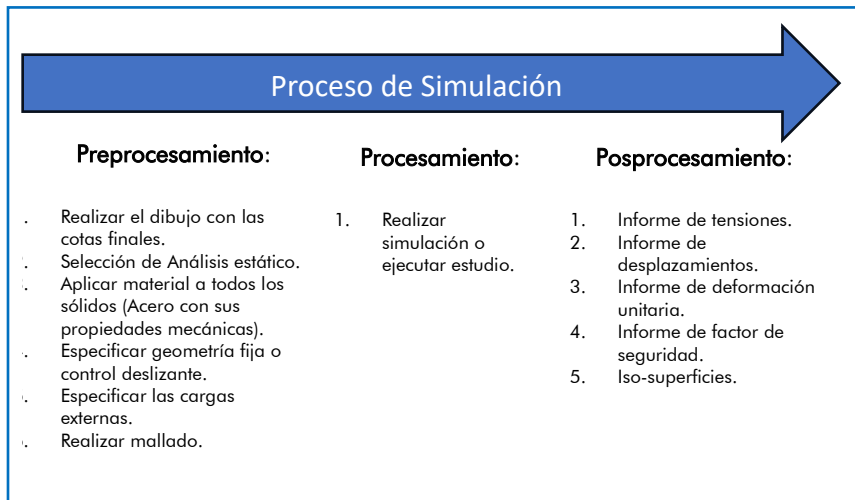


Figura 8. Descripción del proceso de simulación.

Se empleó el software SolidWorks Simulation 2020 (Dassault Systèmes) a través del módulo de análisis estático estructural, utilizando una malla automática por defecto conformada por elementos sólidos tetraédricos tridimensionales. Este tipo de método de elemento finito permite representar con precisión suficiente, desde el punto de vista ingenieril, el comportamiento

estructural en las tres dimensiones del modelo, evaluando la distribución espacial de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en todo el dominio analizado.

Las simulaciones se realizaron en una estación de trabajo equipada con un procesador AMD Ryzen 7 5700G, 16 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 10 de 64 bits. El análisis numérico tridimensional permitió obtener una distribución detallada de tensiones y concentraciones locales bajo el criterio de Von Mises, mientras que el método teórico de Von Mises se aplicó únicamente para la flexión, proporcionando un valor promedio del esfuerzo equivalente, empleado como referencia para validar comparativamente los resultados del modelo numérico.

El estudio de las cargas se realiza con el cálculo de los volúmenes y la densidad del concreto. Se obtiene el volumen de la tolva de $V_{tolva} = 0.0254 \text{ m}^3$ y el cilindro tiene un volumen de $V_c = 0.031 \text{ m}^3$. Se someterán a una carga que podrá ser calculada con estos volúmenes y densidades con la Ecuación 7.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Se utilizó una carga de $2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, simulando la densidad de un concreto convencional, esto multiplicado al volumen de la tolva y el tubo obteniendo su masa $m_t = 63.5 \text{ kg}$ y $m_c = 87.5 \text{ kg}$, respectivamente. Con los datos obtenidos, es momento de iniciar con el análisis estático de cargas que ejercen sobre la tolva y el tubo mostrado en la Figura 9..

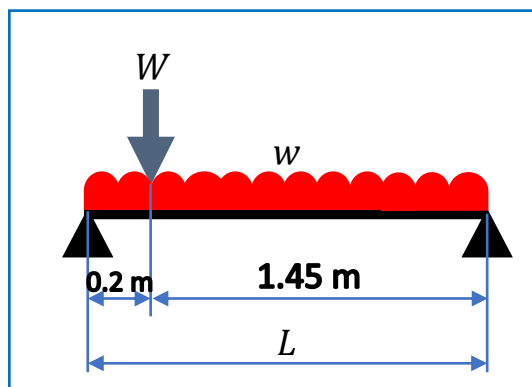


Figura 9. Diagrama de viga.

Como se observa en la Figura 9, se tienen dos tipos de cargas, una carga puntual (W), es por donde entra la mezcla en la tolva y una carga distribuida

(w), es por donde se transporta la mezcla de concreto hasta su salida. Iniciando el cálculo de la carga distribuida $w = 520.23 \frac{N}{m}$ esto por parte de la carga distribuida sobre el cilindro, ahora se analiza la carga concentrada de $W = 622.94 N$ al obtener todos los datos necesarios, se procede a realizar el análisis de cortante y de flexión de la viga, con MD Solid, como se muestra en la Figura 10 y Figura 11 contemplando un factor de carga de 2, se obtienen los valores de la Tabla 1.

Tabla 1. Cargas según la densidad del concreto.

$\rho_{concreto}$	$w \left(\frac{N}{m}\right)$	$W (N)$	$M (Nm)$	$\sigma (MPa)$
500	209.28	255.06	99.01	2
1000	419.75	510.12	198.41	4
1500	629.03	767.14	297.65	6
2000	838.31	1024.16	396.91	9
2500	1040.46	1245.88	489.63	11

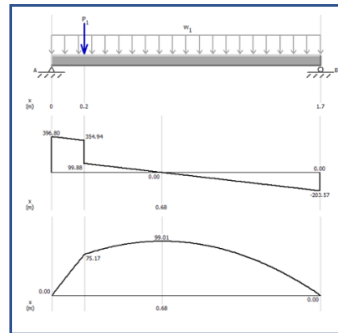


Figura 10. Diagrama de cortante y flexionante con la primera carga de la Tabla 1.

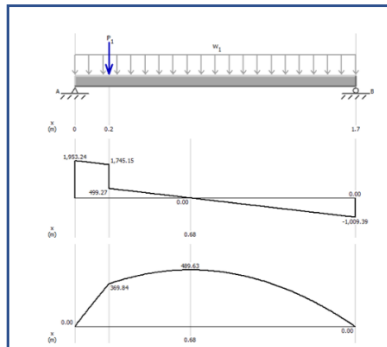


Figura 11. Diagrama de cortante y flexionante con la última carga de la Tabla 1.

Los datos del problema se tienen, el momento flexionante máximo tiene un valor de $M = 99.01 Nm$, para una densidad de $\rho = 500 \frac{kg}{m^3}$ y el momento flexionante máximo de $M = 496.31 Nm$ para una densidad de $\rho = 2500 \frac{kg}{m^3}$. El diámetro exterior es de $D = 0.155 m$ y el diámetro interior es de $d = 0.150 m$, el espesor del tubo es de $e = 0.0025 m$, por lo tanto, se estima el momento de inercia de área, en función del espesor con la ecuación (8)

$$I_{xx} = \frac{\pi}{8}e(D^3 - 3D^2e - 4De^2 - 2e^3) \quad (8)$$

El momento de inercia máximo de $I_{xx} = 3.4828 \times 10^{-6} m^4$, tal y como se observa en la Figura 12, en función del espesor.

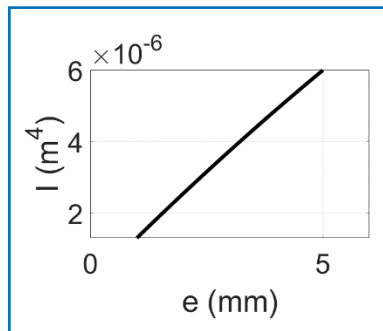


Figura 12. Momento de inercia de área en función del espesor de 1 a 5 mm.

Con el momento de inercia en función del espesor de la Ecuación 8 y se muestra su gráfico en la Figura 13

$$\sigma = \frac{4M}{\pi(D^2e - 3De^2 + e^3 - 2e^4)} \quad (9)$$

La densidad del concreto es variable en función de los elementos que lo componen, como el objetivo es diseñar el dispositivo para concreto de bajo revenimiento se contempla las densidades y su efecto en la carga del dispositivo. En la Figura 13 se muestra el efecto sobre el esfuerzo del espesor del cilindro y de la densidad del concreto. Observándose que, a mayor espesor y menor densidad, se reduce el esfuerzo, y viceversa.

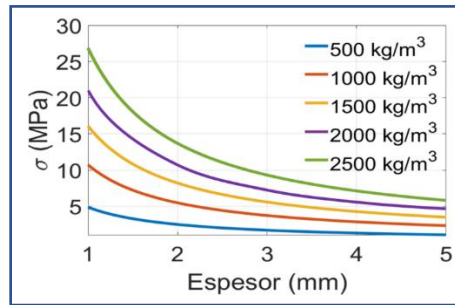


Figura 13. Esfuerzo en función del espesor de 1 a 5 mm.

ESFUERZOS O TENSIONES

Para un espesor de 2.5 mm, el esfuerzo obtenido mediante el método de elementos finitos en SolidWorks, se comparó con el cálculo analítico del esfuerzo promedio de 11 MPa, de acuerdo con la ecuación 9. En SolidWorks se puede observar el gráfico de tensiones, Figura 14 con un rango de 0 – 24 MPa, que representan los esfuerzos en los nodos mínimo y máximo, cuyo promedio por sección transversal es estimado por la ecuación (9). De esta manera se validan los esfuerzos en el método de elemento finito con los esfuerzos calculados por Von Mises en flexión pura, tal y como lo muestra la Figura 20.

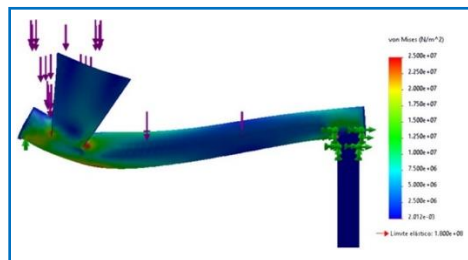


Figura 14. Mapa de estrés de tensiones del extrusor, donde las zonas rojas indican los puntos de mayor tensión, manteniéndose por debajo del límite de ruptura del material, validando la seguridad del diseño.

El factor de seguridad se evaluó considerando el esfuerzo límite elástico del acero AISI 1010, con una resistencia de $\sigma_{LE} = 180 \text{ MPa}$. Este se calcula con la ecuación (10):

$$FS = \frac{\sigma_{LE}}{\sigma_{Calculado}} \quad (10)$$

En la condición menos segura, correspondiente a un espesor de 1 mm, el factor de seguridad es de $FS = \frac{180 \text{ MPa}}{27 \text{ MPa}} = 6.66$, con la carga máxima debida

al concreto de densidad de $2500 \frac{kg}{m^3}$. Con el espesor de 5 mm se tiene un factor de seguridad de $FS = \frac{180 MPa}{7 MPa} = 25.7$. Que comparativamente con SolidWorks se aproxima como lo muestra la Figura 15.

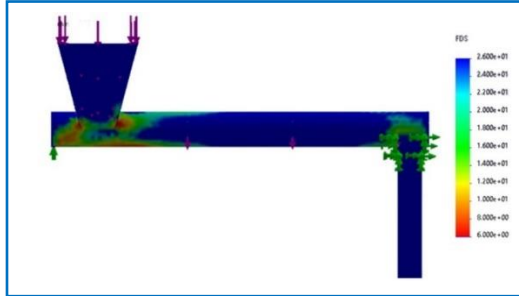


Figura 15. Mapa de colores factor de seguridad.

DEFLEXIONES O DESPLAZAMIENTOS

Tomando un espesor de 2.5 mm, la deformación máxima por carga puntual es de $y_W = -0.06219$ mm más la deflexión por carga distribuida de $y_w = -0.1446$ mm, da una deflexión máxima de $y_{total} = -0.2068$ mm con una carga debida a la densidad de $2500 \frac{kg}{m^3}$, como lo muestra la Figura 23 y el mapa de contornos de SolidWorks de la Figura 16,

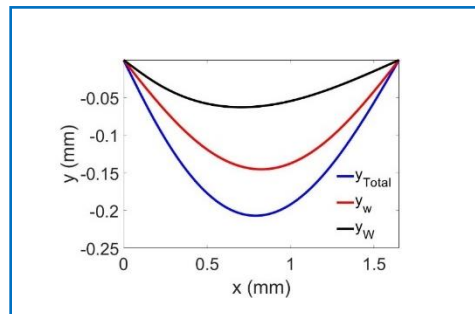


Figura 16. Deflexión de la viga por el método de superposición.

donde y_w es la deformación debida a la carga distribuida y y_W es la deformación debida a la carga puntual y y_{total} es la deformación resultante de la suma de las dos anteriores como se observa en la Figura 17.

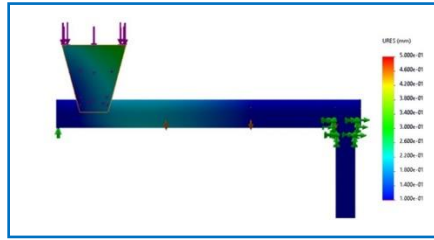


Figura 17. Mapa de colores de desplazamientos o deflexión.

DEFORMACIÓN UNITARIA

La deformación unitaria representa la deformación puntual a la que está sometido cada nodo por cada unidad de longitud, con un valor máximo de 0.0001 mm de deformación, como se expresa en el mapa de contornos de la Figura 18.

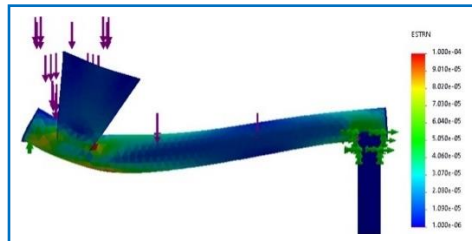


Figura 18. Mapa de colores de deformación unitaria.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Analizando los valores tanto calculados como los que demuestra el programa SolidWorks, se puede hacer una comparativa de dichos valores de esfuerzos, factor de seguridad y deformación, tal y como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación de resultados entre el programa SolidWorks y el calculado por mecánica de materiales.

Parámetro	SolidWorks	Calculado
$\sigma_{Von Mises}$	0 – 24 Mpa	11 Mpa
FS	0 – 8	7.8
y_{max}	-0.22 mm	-0.2068 mm

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso un sistema de impresión de concreto poroso de bajo revenimiento basado en un tornillo sinfín, y se desarrolló un análisis numérico para validar su diseño mediante simulaciones de elementos finitos y las ecuaciones de Von Mises en flexión. El análisis mostró esfuerzos en el rango de 0–24 MPa, siendo la condición más crítica un esfuerzo promedio de 11 MPa, coincidente con el cálculo por mecánica de materiales.

Se obtuvieron valores para el factor de seguridad entre 6.66 – 25.7, que representan un diseño con un factor de seguridad elevado, que se validó por el tipo de carga al que va a estar sometido. Tomando la carga máxima del concreto se realiza con un factor de carga de 2, adicional al factor de seguridad para asegurar una larga vida a los materiales.

Las deflexiones son similares de -0.22 mm en el método de elemento finito y -0.2068 mm en la mecánica de materiales. De esta manera se comprueba que el diseño con estas características soporta las cargas determinadas, con un material AISI 1010, cuya resistencia en el límite elástico es de 180 MPa.

Se podría realizar una optimización para un trabajo futuro del diseño haciéndolo más ligero al bajar el factor de seguridad, sin embargo, para el presente trabajo se logra validar que el diseño propuesto soportará las cargas del concreto para la impresora. Además, se considera el control del posicionamiento de los actuadores y sus ejes de acción con la finalidad de lograr un sistema automatizado.

REFERENCIAS

- Ahmed, G. H., Gao, Y., Chen, H., Jiao, H., Dong, M., Bier, T. A., y Kim, M. (2023). A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*, 66: 105863. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105863>
- ASTM International. (2020). ASTM C143/C143M-20: Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. ASTM International. https://www.astm.org/c0143_c0143m-20.html
- Bákit, M. C. S., Bolaños, E. P., Jiménez, J. J., y Flores, M. M. (2021). Drones y tecnología como elementos claves en la gestión de procesos constructivos: una revisión de literatura. *Technology Inside by CPIC*, 6: 1–15.

- CEMEX. (2022, septiembre 29). CEMEX first to bring 3D printing with concrete to Mexico [Comunicado de prensa]. CEMEX, S.A.B. de C.V. <https://www.cemex.com/w/cemex-first-to-bring-3d-printing-with-concrete-to-mexico>
- Chen, H., Zhang, D., Chen, P., Li, N., y Perrot, A. (2023). A review of the extruder system design for large-scale extrusion-based 3D concrete printing. *Materials*, 16(7): 2661. <https://doi.org/10.3390/ma16072661>
- COBOD International. (2022). D.fab in detail [Página técnica]. COBOD International. <https://cobod.com/solution/materials/dfab/details/>
- Duarte Gutiérrez, N. J., y col. (2021). Stress design approach of a screw conveyor for a specific flow rate. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 11(11, Serie I): 42–50.
- Figueroa-Díaz, R. A., Balvantín-García, A. D. J., Diosdado de la Peña, J. Á., Cruz-Alcantar, P., Murillo-Verduzco, I., y Pérez-Olivas, P. A. (2019). Stress analysis in a screw conveyor axis under a specific fault condition. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 20(3): e031. <https://doi.org/10.22201/fi.01877157p.2019.20.3.031>
- Lugo, F. J. F. (2015). Aplicación de la filosofía Lean Manufacturing en un proceso de producción de concreto. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 4(15): 7–24.
- Lyu, Q., Dai, P., y Chen, A. (2023). Sandwich-structured porous concrete manufactured by mortar-extrusion and aggregate-bed 3D printing. *Construction and Building Materials*, 392: 131909. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131909>
- Phung Van, B., Phan Binh, H., Duc Hai, T., y Tung, P. D. (2023). Tính toán thiết kế và tối ưu hóa kết cấu khung máy in 3D bê tông kích thước lớn dạng cổng trực. *Journal of Science and Technique*, 18(1): 38–54.
- Polychronopoulos, N. D., Sarris, I. E., y Vlachopoulos, J. (2024). Flow analysis of screw extrusion in three-dimensional concrete printing. *Physics of Fluids*, 36(2): 023110. <https://doi.org/10.1063/5.0193235>
- Rahman, S. A., Shaikh, F. U. A., Kumar, P., Sarker, S. K., y Sobuz, M. H. (2024). A study on rheology and mechanical performance of lithium slag incorporated sustainable 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 418:126–139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.127654>
- Si, W., Khan, M., y McNally, C. (2025). A comprehensive review of rheological dynamics and process parameters in 3D concrete printing. *Journal of Composites Science*, 9(6): 299. <https://doi.org/10.3390/jcs9060299>
- Trieu, D. K., Nguyen, A. T., Ta, D. H., y Akoto, R. A. (2025). Development of an automatic program for dynamics analysis of 3D concrete printer frame with flexible links. *Journal of Science and Technique*, 20(2): 45–60.

- Yang, L., Gao, Y., Chen, H., Jiao, H., Dong, M., Bier, T. A., y Kim, M. (2024). Three-dimensional concrete printing technology from a rheology perspective: a review. *Advances in Cement Research*, 36(12): 567–586. <https://doi.org/10.1680/adcr.23.00045>
- Yu, W., Zou, D., Li, D., Wang, Q., y Peng, P. (2024). Development of models relating screw conveying capacity of concrete to operating parameters and their use in conveyor operating strategies to consider batch production. *Applied Sciences*, 14(14): 6351. <https://doi.org/10.3390/app14146351>