

Revolución en el Diseño Estructural: IA vs. Métodos Tradicionales en Diseño de Cimentaciones

Revolution in Structural Design: AI vs. Traditional Methods in Foundations Design

Gabriel Montúfar^{1*} 

¹ Universidad de Panamá. (Panamá).

*Autor por correspondencia: Gabriel Montúfar, gabriel.montufar@up.ac.pa

Recibido: 10 de agosto de 2024

Aceptado: 18 de noviembre de 2024

Resumen

El diseño estructural tradicional requiere conocimientos técnicos, análisis de factores, y cumplimiento de normativas (Ching & Adams, 2019). El proceso implica recopilar información, realizar investigaciones y proponer soluciones optimizadas (Das, 2019). La tecnología ha agilizado los cálculos matemáticos, pero la fase creativa sigue siendo tarea del profesional. El software de diseño permite modelado 3D, memorias de cálculo y planos constructivos rápidamente, siempre que el profesional introduzca la información correcta. Sin embargo, la introducción de GPUs y redes neuronales está cambiando el panorama. Ahora se plantea el diseño estructural mediante ingeniería de prompts, donde la red neuronal realiza tanto el trabajo creativo como el de diseño, supervisado por el profesional. Esto reduce significativamente el tiempo y esfuerzo requeridos en comparación con el método tradicional. Surge la pregunta sobre cuánto tiempo faltará para que el ingeniero civil calificado deje de ser relevante en el diseño estructural. Algunos expertos sugieren que para 2030, las redes neuronales podrían superar la necesidad de intervención humana en tareas analíticas (Tartaglione, 2019). El artículo propone comparar el diseño de una cimentación compleja utilizando el método tradicional contra el realizado por un ingeniero usando tres redes neuronales avanzadas: Chat-GPT 4o, Gemini 1.5 Pro y Claude 3.5 Sonnet.

Palabras clave: diseño estructural, inteligencia artificial, ingeniería civil, automatización, redes neuronales.

Abstract

Traditional structural design requires technical knowledge, factor analysis, and regulatory compliance (Ching & Adams, 2019). The process involves gathering information, conducting research, and proposing optimized solutions (Das, 2019). Technology has streamlined mathematical calculations, but the creative phase remains the task of the professional. The design software allows 3D modeling, calculation reports and construction plans quickly, as long as the professional enters the correct information. However, the introduction of GPUs and neural networks is changing the landscape. Now the structural design is proposed through prompt engineering, where the neural network carries out both the creative and design work, supervised by the professional. This significantly reduces the time and effort required compared to the traditional method. The question arises as to how long it will take before the qualified civil engineer is no longer relevant in structural design. Some experts suggest that by 2030, neural networks could overcome the need for human intervention in analytical tasks (Tartaglione, 2019). The article proposes to compare the design of a complex foundation using the traditional method against that carried out by an engineer using three advanced neural networks: Chat-GPT 4o, Gemini 1.5 Pro and Claude 3.5 Sonnet.

Keywords: structural design, artificial intelligence, civil engineering, automation, neural networks.

Introducción

El diseño estructural requiere tener conocimientos técnicos profundos sobre los factores que intervienen en el desempeño del elemento o conjuntos de elementos estructurales (Hibbeler, 2018). Consiste en un procedimiento de análisis en donde el ingeniero o profesional idóneo requiere tener toda la información posible para evaluar las variables que afectarán su diseño de forma directa o indirecta. Para realizar un diseño adecuado existen una serie de normativas, reglamentos y códigos de diseño los cuales se deben cumplir fielmente para garantizar la seguridad y eficiencia de la estructura.

El procedimiento convencional de diseño consiste en consultar esas normas, realizar visitas a sitio, reunir información relevante, elaborar campañas de investigación ya sea con ensayos de laboratorio o campo y generar una posible solución al desafío en cuestión que se tiene mediante una propuesta de diseño. Posterior a este proceso se optimiza el resultado hasta llegar a la solución más adecuada en términos de costo beneficio.

Con el avance de la tecnología y la introducción del poder computacional como herramienta de uso cotidiano, los ingenieros hemos sabido sacar provecho de este recurso y lo hemos utilizado para agilizar el cálculo matemático de las estructuras que diseñamos, aunque el procedimiento de diseño en su fase creativa desde la idea, el concepto, el boceto y el pre-diseño sigue siendo parte de las labores que realiza el profesional técnico, ultimadamente por razones de recortar los tiempos para obtener resultados en análisis de estructuras complejas o de ofrecer distintas opciones al cliente para que este pueda personalizar el resultado final de su obra civil y darle su toque personal sin comprometer el tiempo necesario para realizar cada una de las iteraciones hasta llegar a un diseño adecuado gracias al creciente poder computacional con que contamos hoy día.

Con el uso de software de diseño podemos ofrecer este servicio, generando un modelado 3D de la estructura, realizando memorias de cálculo e incluso llegando a ofrecer planos constructivos y presupuestos sin mucho esfuerzo que los de unos cuantos clics, siempre y cuando teniendo la consideración de que el profesional debe estar capacitado para incorporar la información correcta en el software que le lleve a un diseño que cumpla con las normativas actualizadas del país donde labora. Hoy día el panorama ha cambiado con la introducción de las unidades de procesamiento gráfico GPU para procesamiento de datos a través de redes neuronales con configuraciones complejas y de tamaño cada vez más colosal.

Se plantea el diseño de estructuras a partir de la ingeniería de *prompts*, es decir la comunicación óptima de las solicitudes de diseño a la red neuronal por parte del profesional capacitado y competente para que el trabajo tanto creativo como de diseño sea realizado por la red neuronal de principio a fin, solamente bajo la supervisión de los resultados finales por el usuario para modificar cualquier aspecto que no considere adecuado en el diseño producido por dicha red neuronal de acuerdo a sus conocimientos y experiencias previas.

Es decir, ya no estamos hablando de usar un software, incorporar un modelado lo más fielmente posible, introducir datos sobre las propiedades de los materiales, consultar normativas para añadir coeficientes o valores preestablecidos o incluso si quiera optimizar el diseño hasta un punto que cumpla con la relación costo beneficio antes mencionada. Todo este trabajo analítico y matemático que antes se realizaba con el trabajo conjunto del cerebro humano y el software de diseño ahora es realizado sobre todo por los ingenieros jóvenes mediante una red neuronal que se encarga de entregar paso a paso si le es solicitado el diseño estructural desde su concepción como idea hasta su configuración final optimizada.

Esto plantea la pregunta de que si esas capacidades son las actuales en donde las redes más la capacidad analítica del cerebro humano llevan a conseguir un diseño estructural en tiempos cada vez más cortos en comparación con la mancuerna humano-software, *¿cuánto tiempo falta para que el ingeniero civil calificado tenga relevancia como ente contribuyente en un diseño estructural?* Es decir, a cuántos años estamos para que la capacidad analítica de una red neuronal pueda superar la necesidad de tener un ingeniero civil introduciendo unas directrices adecuadas y revisando el resultado final.

Algunos expertos en la materia teorizan que para el año 2030 no será necesario si quiera la contribución del ser

humano en tareas analíticas, ya que las redes neuronales generales serán muy superiores a nosotros para realizar ese procesamiento de información (Wang & Zhang, 2019). Esto motiva la creación del artículo para explorar y comparar a día de hoy el diseño estructural de una cimentación compleja de acuerdo a las limitantes de espacio por estructuras colindantes bajo la mancuerna humano-software, contra el mismo diseño realizado mediante un ingeniero civil incorporando información en tres de las redes neuronales más avanzadas en la actualidad, estas son ChatGPT 4o de la empresa Open AI que lidera el avance en desarrollo e investigación de inteligencia artificial, Gemini 1.5 pro de la empresa Google actualmente una de las compañías más grandes del mundo en cuanto a tecnología y Claude 3.5 Sonnet desarrollado por Anthropic liderada por investigadores que abandonaron *Open AI* por discrepancias de acuerdo a el desarrollo ético de esa red neuronal (OpenAI, 2023). Comparando los resultados de cada una con el diseño realizado de forma tradicional veremos las capacidades actuales de cada una.

Método y materiales

Recopilación de Datos: Ubicación del Proyecto: Ciudad de Panamá. Estructura: Estructura metálica de sistema viga-columna cimentada en suelo con fundación corrida. Restricciones: Limitado por espacio respecto a tuberías colindantes y otras infraestructuras existentes. Información Utilizada: Planos estructurales de la piscina existente, distribución de tuberías soterradas, estructuras de contención y edificaciones aledañas.

Investigaciones y Ensayos: Mapas Topográficos: Análisis del relieve del sitio. Ensayos Geotécnicos: Incluyen el Cono Dinámico de Penetración, pruebas de humedad, límites de Atterberg y compresión no confinada del suelo (Bowles, 2012).

Modelado y Análisis: Software Utilizado: SAP2000 para modelado y análisis estructural. Sistema Estructural: Marco de acero con vigas, columnas y crucetas; zapatas combinadas para fundaciones. Propiedades de Materiales: Concreto con resistencia a compresión de 4 ksi para vigas y 5 ksi para fundaciones; acero de refuerzo grado 60 (ACI, 2014).

Criterios de Diseño: Cargas: Gravedad (peso propio y cargas vivas), cargas laterales (McCormac & Brown, 2018; Sezen, H., 2018). Normativas: Cumplimiento con reglamentos estructurales de Panamá y normas ASTM para materiales. Diseño con Redes Neuronales.

Herramientas Utilizadas: Redes Neuronales: Chat-GPT 4, Gemini 1.5 Pro, y Claude 3.5 Sonnet. Datos de Entrada: Estudio geotécnico en formato PDF, imágenes de la vista frontal y lateral de la superestructura.

Resultados

Resultados usando el software estructural SAP 2000 y SAFE.

El proyecto está ubicado en Ciudad de Panamá, consiste en una estructura metálica de sistema viga columna cimentada en el suelo con fundación corrida a través de las columnas a la izquierda y derecha como puntos de apoyo. La estructura está encima de una piscina construida previamente y su diseño estuvo limitado por espacio respecto a tuberías colindantes de la infraestructura hidráulica actual del sitio. Para realizar el proyecto se contó con información de los planos estructurales de la piscina ya construida, la distribución de las tuberías soterradas, estructuras de contención subterráneas y edificaciones aledañas. Se tenía un registro fotográfico del sitio, se solicitó un mapa topográfico para conocer el relieve como se muestra en la figura 1, se visitó el sitio y se planeó una campaña geotécnica de mecánica de suelos como se muestra en la figura 2, que contó con ensayos de campo y laboratorio como el cono Dinámico de Penetración, pruebas de humedad, límites de Atterberg y compresión no confinada del suelo. Con esto se procedió a modelar la estructura con el uso del software de diseño estructural SAP2000 cuyos detalles se dan a continuación.

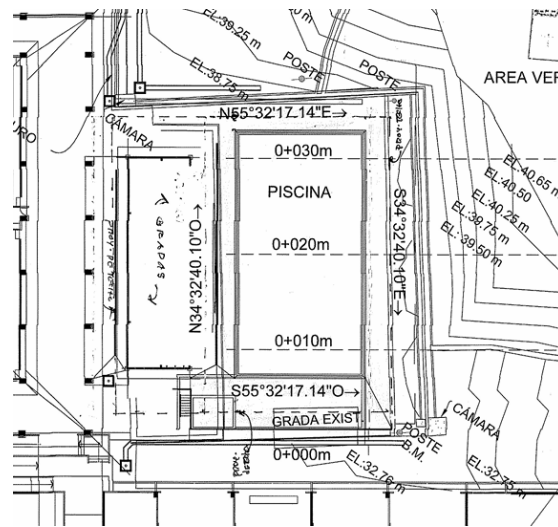


Figura 1. Mapa topográfico de sitio



Figura 2. El ensayo de penetración dinámica de cono

Descripción del sistema estructural:

El sistema estructural que se utilizó para absorber las cargas de gravedad y laterales es un marco de acero conformado por vigas y columnas, además de crucetas. La fundación consiste en zapatas combinadas que transmiten las cargas al terreno natural, techo metálico de carriolas simples con tensores, cubierta metálica galvanizada.

Propiedades de los materiales:

La resistencia a la compresión a los 28 días del concreto es de 4ksi en vigas de gradas, 5ksi en fundaciones. El concreto deberá ser dosificado y evaluado de acuerdo con el *American Concrete Institute* ACI-211 y ACI-214 (American Concrete Institute ACI). Los ensayos para la evaluación deberán cumplir con las normas del American Society for Testing and Materials ASTM C31, ASTM C39 y ASTM C42, American Society for Testing and Materials (ASTM, 2021), (American Society for Testing and Materials (ASTM, 2018); American Society for Testing and Materials (ASTM, 2019); American Society for Testing and Materials (ASTM, 2020). El acero de

refuerzo debe cumplir con la norma ASTM A615 (*American Society for Testing and Materials* ASTM, 2018). El acero para resistir los esfuerzos de corte consistirá en estribos y barras longitudinales grado 60 (60 ksi).

Capacidad de soporte del suelo:

La resistencia a compresión del suelo de 10000 kg/m². Análisis estructural.

Criterios para el análisis:

Las cargas de gravedad consisten en el peso propio de los elementos estructurales y no estructurales (columnas, vigas, losas entre otros), además de las cargas vivas de acuerdo con el Reglamento Estructural Panameño del año 2014 vigente en Panamá al momento del diseño de la estructura. (REP, 2014).

- Sistema de cargas de gravedad para el diseño
Carga viva de techo: 60kgf/ m²
Carga muerta: peso propio de elementos estructurales y no estructurales
- Sistema para resistir cargas laterales
Arriostres laterales y pórtico especial resistente a momento

Sistema de cimientos:

- Zapatas combinadas : Para transmitir las cargas de diseño al terreno se utilizó zapatas combinadas de concreto reforzado como se muestra en la figura 3. Como criterios de dimensionamiento se determinó el área necesaria de acuerdo con las cargas transmitidas desde las columnas estructurales y la capacidad permisible del terreno como está establecido en el American Concrete Institute (*American Concrete Institute* (ACI), 2011). El acero de refuerzo de las zapatas debe estar recubierto mínimo por 8 cm de concreto. La profundidad de desplante establecida es de 2 metro desde el terreno natural. Debajo de la zapata se colocará una cama de material granular rodeada de geotextil de separación no tejido. El pedestal de la zapata consiste en concreto reforzado con resistencia a la compresión f'c = 5ksi, refuerzo longitudinal y transversal grado 60 ASTM A615 (*American Society for Testing and Materials* (ASTM), 2018).

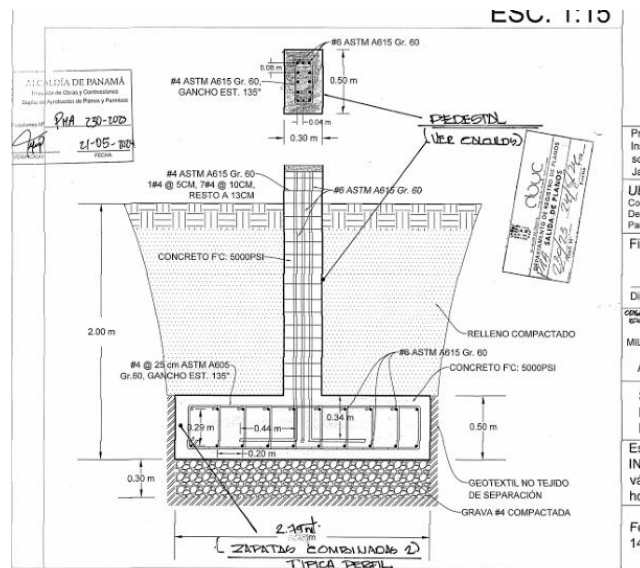


Figura 3. Detallado estructural del sistema de cimientos.

- Columnas y vigas del marco: Las columnas estructurales corresponden a perfiles H de acero formado en caliente grado 50 ASTM 572 (American Society for Testing and Materials (ASTM, 2016).
- Techo: El techo está conformado por vigas principales (perfil H 27cm x 15cm 30 lb/ft y secundarias (carrilas simples) que transmiten las cargas de gravedad y laterales a las columnas estructurales. También se debe colocar arriostramiento cuando la longitud libre sea mayor a 2 m y la luz sea menor a 8 metros cada L/2, de lo contrario a L/3. Los arriostramientos, tensores o alineadores generalmente consisten en: Barras de acero lisas de 1/2" de diámetro enroscadas en sus extremos con sus respectivas tuercas que van ancladas de forma diagonal a las carrilas.

Resultados usando ChatGPT 4°

- Entrada (solicitud a la red neuronal): basado en esta información propon un sistema de fundaciones.
- Información suministrada a la red neuronal: estudio geotécnico completo en formato PDF e imágenes en formato JPG de la vista frontal y lateral de la superestructura como se muestra en la (Figura 4 y 5).

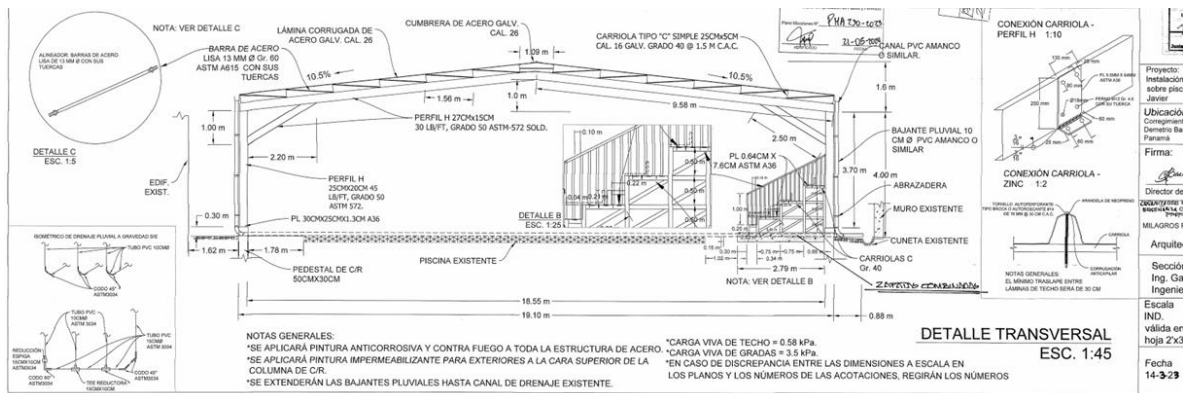


Figura 4. Vista frontal de superestructura de techo.

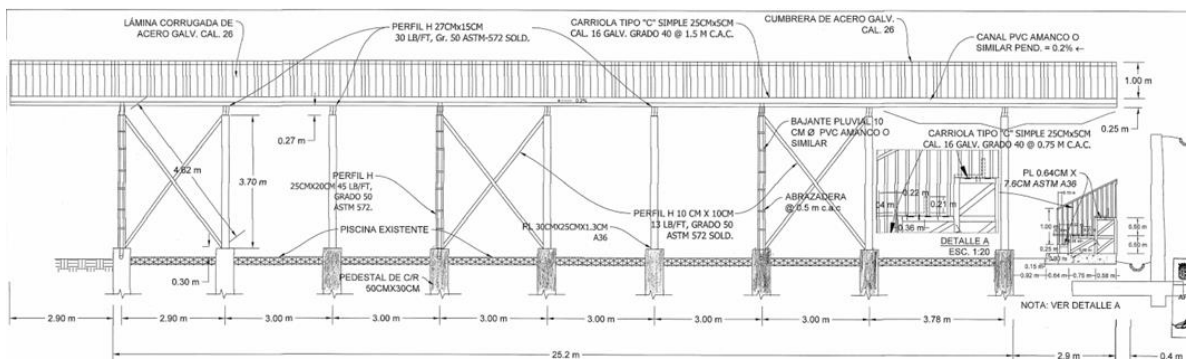


Figura 5. Vista lateral de superestructura de techo.

- Salida: Sistema de Fundaciones Propuesto: Con base en la información anterior, se recomienda utilizar zapatas aisladas conectadas por vigas de amarre. Esto proporciona una buena distribución de las cargas y minimiza los asentamientos diferenciales (Tomlinson, 2017).
- Diseño de Fundaciones: Profundidad de Zapata: Desplantar las zapatas a una profundidad mínima de 2.00 metros.
- Dimensiones de Zapata: Para determinar las dimensiones adecuadas de las zapatas, es necesario considerar las cargas aplicadas y la capacidad de carga del suelo (Bowles, 2012).
- Cálculo de Dimensiones: Carga Total: Calcular la carga total aplicada sobre cada zapata. Por ejemplo, si la carga puntual sobre cada soporte es P kg y considerando un factor de seguridad (FS) de 3, la carga sobre la zapata sería:

$$P_{\text{total}} = P \times \text{FS} \quad (1)$$

Área de Zapata: El área requerida A para cada zapata se puede calcular como:

$$A = P_{\text{total}} / (\text{Capacidad de carga del suelo}) \quad (2)$$

- Dimensiones de la Zapata: Si se asume una zapata cuadrada, el lado de la zapata L se puede determinar a partir del área:

$$L = \sqrt{A} \quad (3)$$

- Conexiones y Detalles: Vigas de Amarre: Utilizar vigas de amarre de concreto armado para conectar las zapatas. Esto ayuda a distribuir cargas y proporciona estabilidad adicional. Refuerzo de Zapatas: Diseñar el refuerzo de las zapatas según los estándares locales de construcción, asegurando la resistencia adecuada contra esfuerzos cortantes y de flexión (Nilson, Darwin, & Dolan, 2019).
- Diseño recomendado: La cimentación recomendada consiste en zapatas combinadas de concreto reforzado, con una profundidad de desplante de 2 metros, adecuada para soportar las cargas de la estructura metálica del techo.

Resultados usando Gemini 1.5 pro

- Entrada: basado en esta información propón un sistema de fundaciones.
- Información suministrada a la red neuronal: estudio geotécnico completo en formato PDF e imágenes en formato JPG de la vista frontal y lateral de la superestructura.
- Salida:

El estudio geotécnico recomienda cimentaciones superficiales debido a la capacidad portante aceptable del suelo, que es de 10,000 kg/m² a una profundidad de 2 metros. Dado que la estructura del techo es metálica y probablemente ligera, se podrían utilizar zapatas aisladas para cada columna.

- Diseño de Zapata Aislada:
Dimensiones: Asumiendo una carga de servicio por columna de 200 kN (aproximación basada en estructuras similares), y usando un factor de seguridad de 3, la carga última sería de 600 kN. Con la capacidad portante del suelo, el área de la zapata sería 600 kN / 10000 kN/m² = 0.06 m². Esto sugiere

unas dimensiones aproximadas de 30 cm x 30 cm para cada zapata.

Profundidad: La profundidad de desplante recomendada es de 2 metros.

Refuerzo: Se necesitaría acero de refuerzo en ambas direcciones para resistir los momentos flectores y esfuerzos de corte. Una estimación inicial podría ser usar varillas de diámetro 12 mm espaciadas cada 20 cm.

Resultados usando Claude 3.5 Sonnet

- Entrada: basado en esta información propon un sistema de fundaciones.
- Información suministrada a la red neuronal: estudio geotécnico completo en formato PDF e imágenes en formato JPG de la vista frontal y lateral de la superestructura.
- Salida:

Utilice zapatas para los cimientos de las columnas. El informe geotécnico indica una capacidad portante del suelo de 10.000 kg/m² a 2 metros de profundidad, lo que es apto para zapatas extendidas. Diseñar las zapatas extendidas con dimensiones de aproximadamente 2m x 2m y un espesor de 0.5m, con base en las cargas de columna proporcionadas en los cálculos estructurales. Las dimensiones exactas deben verificarse mediante un análisis estructural detallado.

Utilice concreto de 5000 psi para los cimientos, como se especifica en el diseño estructural. Prever un recubrimiento mínimo de hormigón de 8 cm para el acero de refuerzo en las zapatas, según lo indicado en el diseño estructural. Utilice acero de refuerzo Grado 60 ($f_y = 60$ ksi) para los elementos de cimentación. Incluya pernos de anclaje para conectar las columnas de acero a los cimientos de concreto, como se detalla en los dibujos estructurales (ASTM, 2015).

Utilice 4 pernos de anclaje por columna, 3/4" de diámetro, 16" de largo, ASTM F1554 Grado 36. Coloque una estera de barro de concreto magro debajo de las zapatas para garantizar una superficie de trabajo limpia. Considere el uso de zapatas combinadas donde las columnas estén muy espaciadas, como se indica en algunas partes del diseño estructural. Asegure un drenaje adecuado alrededor de los cimientos para evitar la acumulación de agua.

Siga todos los códigos y normas de construcción relevantes para el diseño y construcción de cimientos en Panamá. Este sistema de cimentación debe soportar adecuadamente la estructura de acero para la cubierta de la piscina y las gradas y al mismo tiempo cumplir con los requisitos geotécnicos y estructurales descritos en los documentos proporcionados. Sin embargo, un ingeniero estructural autorizado debe revisar y aprobar el diseño final de los cimientos antes de la construcción.

Discusión de resultados

En este estudio se realizó una comparación entre el diseño de cimentaciones utilizando métodos tradicionales y métodos basados en inteligencia artificial, específicamente mediante el uso de los programas SAP 2000 y SAFE, así como las redes neuronales ChatGPT 4, Gemini 1.5 Pro y Claude 3.5 Sonnet.

El diseño tradicional mediante SAP 2000 y SAFE se centró en un análisis exhaustivo del sitio, incluyendo estudios geotécnicos, topográficos y estructurales detallados. Se utilizaron zapatas combinadas de concreto reforzado con especificaciones claras sobre la profundidad de desplante, dimensiones y refuerzo de las zapatas. Este método, aunque laborioso, proporcionó un diseño robusto y confiable basado en normas y reglamentos específicos.

ChatGPT 4o propuso un sistema de zapatas aisladas conectadas por vigas de amarre. La red neuronal utilizó la información proporcionada para recomendar dimensiones basadas en cálculos simples de carga y capacidad del suelo.

Gemini 1.5 Pro recomendó el uso de zapatas aisladas basándose en la capacidad portante del suelo y las características de la estructura metálica del techo. Sus recomendaciones incluyeron dimensiones específicas y un enfoque en el refuerzo necesario para resistir momentos flectores y esfuerzos de corte (Poulos & Davis, 1980).

Claude 3.5 Sonnet propuso zapatas extendidas con dimensiones específicas, un espesor de 0.5 m, y

recomendaciones detalladas sobre el tipo de concreto y refuerzo a utilizar. Además, incluyó consideraciones prácticas como el uso de pernos de anclaje y medidas de drenaje (Coduto, 2011).

Conclusiones

Eficiencia y Precisión: Métodos Tradicionales (SAP 2000 y SAFE): Proporcionan un diseño detallado y preciso basado en normativas específicas, aunque el proceso es laborioso y requiere tiempo.

Redes Neuronales: Ofrecen soluciones rápidas y razonablemente precisas, aunque dependen en gran medida de la calidad y cantidad de la información suministrada.

Adaptabilidad: Métodos Tradicionales: Altamente adaptables a situaciones específicas y complejas, con capacidad para considerar múltiples variables de diseño.

Redes Neuronales: Menos adaptables en situaciones complejas, aunque mejoran significativamente con la calidad de los datos de entrada.

Innovación y Automatización: Métodos Tradicionales: Limitados en cuanto a automatización, requieren la intervención constante del ingeniero. **Redes Neuronales:** Permiten una mayor automatización y pueden reducir significativamente el tiempo de diseño, aunque aún requieren supervisión humana para garantizar la precisión y cumplimiento de normativas.

Agradecimientos

Al profesor Yuanjie Logan Xiao de la Universidad central del sur de la República Popular de China (CSU) por su orientación respecto a la confección de artículos científicos relacionados a la inteligencia artificial.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Referencias

- American Concrete Institute (ACI). (2011). Requisitos del Código de Construcción para Concreto Estructural (ACI 318-11) y Comentario.
- American Concrete Institute (ACI). (2014). ACI 211.1-91: Práctica Estándar para Seleccionar Proporciones para Concreto Normal, Pesado y Masivo.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). ASTM A615/A615M-18: Especificación Estándar para Barras de Acero al Carbono Deformadas y Lisas para Refuerzo de Concreto.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2019). ASTM C31/C31M-19: Práctica Estándar para Fabricar y Curar Especímenes de Prueba de Concreto en el Campo.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2020). ASTM C39/C39M-20: Método de Prueba Estándar para la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2021). ASTM C42/C42M-21: Método de Prueba Estándar para Obtener y Probar Núcleos Perforados y Vigas Aserradas de Concreto.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). ASTM A572/A572M-16: Especificación Estándar para Acero Estructural de Alta Resistencia y Baja Aleación de Columbio-Vanadio.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). ASTM A36/A36M-18: Especificación Estándar para Acero Estructural al Carbono.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2015). ASTM F1554-15: Especificación Estándar para Pernos de Anclaje, Acero, 36, 55, y 105-ksi de Resistencia a la Fluencia.
- Ching, F. D. K., & Adams, C. (2019). *Construcción de Edificios Ilustrada* (6ta ed.). Wiley.
- Das, B. M. (2019). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (9na ed.). Cengage Learning.
- Hibbeler, R. C. (2018). *Análisis Estructural* (9na ed.). Pearson Education.

- McCormac, J. C., & Brown, R. H. (2018). *Diseño de Concreto Reforzado* (9na ed.). Wiley.
- Nilson, A. H., Darwin, D., & Dolan, C. W. (2019). *Diseño de Estructuras de Concreto* (15ava ed.). McGraw Hill Education.
- OpenAI. (2023). ChatGPT 4.0. <https://openai.com/chatgpt>
- Panamá, República de. (2014). Reglamento Estructural Panameño (REP-2014). Gaceta Oficial de Panamá, No. 27,591-A.
- Sezen, H. (2018). *Diseño Sísmico de Cimentaciones*. CRC Press.
- Tartaglione, A. (2019). *Aprendizaje Profundo en Ingeniería Estructural*. Springer.
- Tomlinson, M. J. (2017). *Diseño y Construcción de Cimentaciones* (7ma ed.). Pearson Education.
- Wang, C., & Zhang, Y. (2019). *Inteligencia Artificial en Ingeniería Estructural*. Springer.
- Bowles, J. E. (2012). *Análisis y Diseño de Cimentaciones* (5ta ed.). McGraw-Hill Education.
- Coduto, D. P. (2011). *Diseño de Cimentaciones: Principios y Prácticas* (3ra ed.). Prentice Hall.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Análisis y Diseño de Cimentaciones de Pilotes*. Wiley.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Mecánica de Suelos en la Práctica de la Ingeniería* (3ra ed.). Wiley-Interscience.
- Winterkorn, H. F., & Fang, H.-Y. (1975). *Manual de Ingeniería de Cimentaciones*. Van Nostrand Reinhold.